

ای نوحه‌ی نامه‌الهی که تویی
ای آنسه‌ی حال شاهی که تویی
سیرون ز تونیست آنچه در عالم هست
از خود بطلب هر آنچه خواهی که تویی



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اصول

دستگاه‌های ارتباطات
الکترونیکی

نویسنده:

Louis E. Frenzel Jr.

ترجمه

دکتر محمد صادق ابریشمیان
استاد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۱۰. پیشگفتار (نویسنده)

این ویرایش چهارم جدید اصول سیستم‌های ارتباط الکترونیکی به‌طور کامل بازبینی و بهروز شده است تا آن را بهیکی از جدیدترین کتاب‌های درسی موجود در زمینه بی‌سیم، شبکه و سایر فناوری‌های ارتباطی تبدیل کند. از آنجایی که دنیای ارتباطات الکترونیکی بسیار سریع تغییر می‌کند، بهروز نگه داشتن یک کتاب درسی چالشی بی‌پایان است. در حالی که اصول تغییر نمی‌کنند، تاکید و ارتباط آنها با تکامل فناوری انجام می‌شود. علاوه بر این، دانشجویان نه تنها نیاز به پایه‌بندی اصولی دارند، بلکه به‌درک اساسی از اجزا، مدارها، تجهیزات و سیستم‌های دنیای واقعی در استفاده روزمره نیز نیاز دارند. این آخرین نسخه سعی دارد اصول را با مروری بر آخرین تکنیک‌ها متعادل کند.

هدف مستمر این آخرین ویرایش، افزایش تاکید بر درک سطح سیستم از فناوری‌های بی‌سیم، شبکه و دیگر ارتباطات است. به‌دلیل ادغام شدید مدارهای ارتباطی امروز، مهندس و تکنسین اکنون بیشتر با بردهای مدار چاپی، مازول‌ها، کارت‌های پلاگین و تجهیزات کار می‌کنند تا مدارهای سطح قطعه. در نتیجه مدارهای قدیمی منسخ از این متن حذف شده و با مدارهای مجتمع بیشتر و تجزیه و تحلیل سطح بلوک دیاگرام جایگزین شده است. مهندسان و تکنسین‌های ارتباطات مدرن با مشخصات و استانداردها کار می‌کنند و وقت خود را صرف آزمایش، اندازه‌گیری، نصب و عیوب‌یابی می‌کنند. این نسخه در آن جهت حرکت می‌کند. تجزیه و تحلیل مدار دقیق هنوز در مناطق انتخاب شده گنجانده شده است که در درک مفاهیم و مسائل موجود در تجهیزات فعلی مفید است.

در گذشته، در بسیاری از برنامه‌های الکترونیکی، یک دوره در ارتباطات به‌عنوان یک گزینه در نظر گرفته می‌شد. امروزه ارتباطات بزرگترین بخش حوزه الکترونیک با بیشترین کارمند و بیشترین فروش سالانه تجهیزات است. علاوه بر این، فناوری‌های بی‌سیم، شبکه یا سایر فناوری‌های ارتباطی تقریباً در هر محصول الکترونیک وجود دارد. این امر باعث می‌شود که دانش و درک ارتباط برای هر دانش آموزی به‌جای یک گزینه ضروری باشد. بدون حداقل یک دوره در زمینه ارتباطات، دانشجو ممکن است با دید ناقصی از محصولات و سیستم‌های رایج امروز فارغ التحصیل شود. این کتاب می‌تواند زمینه رفع نیازهای چنین دوره عمومی را فراهم کند.

من به‌عنوان سردبیر ارتباطات مجله طراحی الکترونیکی (پنتون)، تغییرات مداوم در اجزا، مدارها، تجهیزات، سیستم‌ها و کاربردهای ارتباطات مدرن را مشاهده کرده‌ام. همانطور که در مورد دیگران تحقیق می‌کنم، با مهندسان و مدیران اجرایی مصاحبه می‌کنم و در کنفرانس‌های بسیاری برای مقالات و سخن‌هایی که می‌نویسم شرکت می‌کنم، به‌اهتمام روزافروز ارتباطات در زندگی همه ما پی‌برده‌ام. سعی کرده‌ام این دیدگاه را به‌این آخرین نسخه بیاورم که در آن جدیدترین تکنیک‌ها و فناوری‌ها توضیح داده شده است. این دیدگاه همراه با بازخورد و بینش برخی از شما که این موضوع را تدریس می‌کنید، منجر به یک کتاب درسی شده است که بهتر از همیشه است.

پیشگفتار

خدلون متعال را شاکرم که بمن توفیق داد تا این کتاب را جهت مطالعه دانش پژوهان و دانشجویان رشته مخابرات تهیه کنم. این کتاب ساده، روان و بدون روابط پیچیده ریاضی توسط استاد این فن نگاشته شده است و تقریباً تمام موضوعات فناوریهای ارتباطات را دربر میگیرد. این کتاب در اصل برای ارتباطات ایالات متحده آمریکا نوشته شده اما میتوان بدون توجه به برخی قراردادها آن کشور از آن استفاده کرد.

هدف از تهیه کتاب کمک به دانشجویان دوره هنرستان است که در این رشته تحصیل میکنند، اما مطالب آن نیز برای مهندسین مخابرات و دانشجویان برق نیز خالی از لطف نیست. با توجه به این که جای کتاب **اصول دستگاه‌های ارتباطات الکترونیکی** در میان کتب دانشگاهی ما خالی بود، اقدام به تهیه و ترجمه کتاب

Principles of Electronic Communication Systems

Fourth Edition

Louis E. Frenzel Jr.

نمودیم. حجم کتاب بسیار زیاد و پراز اصطلاحات و تعاریف و اختصارات است. امیدوارم دانشجویان به پاورقی مراجعه و اختصارات را مطالعه و در خاطره خود برای ادامه مطالب بسیارند. علی‌رغم تلاشی که کرده‌ایم تا روابط درستی ارائه دهیم اما کتاب خالی از غلط و اشتباه نخواهد بود. از همه اساتید ارجمند و دانشجویان عزیز تقاضا داریم من را از طریق پست الکترونیکی مطلع کنند تا بتوانم آنها را اصلاح و در اختیار شما عزیزان قرار دهم.

محمد صادق ابریشمیان
msabri@eetd.kntu.ac.ir
۱۴۰۳ دی ۱۸

فهرست مطالب

.....	10. پیشگفتار (نویسنده)	19
۹۳۳		۱۹ ارتباطات نوری
۹۳۴	۱.۱۹ اصول نوری	۱.۱۹
۹۴۰	۲.۱۹ سیستم‌های مخابرات نوری	۲.۱۹
۹۴۵	۳.۱۹ کابل‌های فیبر نوری	۳.۱۹
۹۶۰	۴.۱۹ فرستنده‌ها و گیرنده‌های نوری	۴.۱۹
۹۸۰	۵.۱۹ مولتی‌پلکس تقسیم طول موج	۵.۱۹
۹۸۳	۶.۱۹ شبکه‌های نوری غیرفعال	۶.۱۹
۹۸۶	۷.۱۹ شبکه‌های ۴۰/۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه و فراتر از آن	۷.۱۹
۱۰۰۱		۲۰ فناوری‌های تلفن همراه
۱۰۰۲	۱.۲۰ سیستم‌های تلفن همراه	۱.۲۰
۱۰۱۰	۲.۲۰ مروری بر صنعت سلولی	۲.۲۰
۱۰۱۳	۳.۲۰ سیستم‌های تلفن همراه دیجیتالی ۲G و ۴G	۳.۲۰
۱۰۲۳	۴.۲۰ تکامل بلند مدت و سیستم‌های سلولی ۴G	۴.۲۰
۱۰۳۷	۵.۲۰ ایستگاه‌های پایه و سلول‌های کوچک	۵.۲۰
۱۰۵۳		۲۱ فناوری‌های بی‌سیم
۱۰۵۴	۱.۲۱ شبکه‌های محلی بی‌سیم	۱.۲۱
۱۰۶۵	۲.۲۱ PAN و بلوتوث	۲.۲۱
۱۰۶۸	۳.۲۱ شبکه‌های بی‌سیم ZigBee و Mesh	۳.۲۱
۱۰۷۱	۴.۲۱ وایمکس و شبکه‌های بی‌سیم شهری	۴.۲۱
۱۰۷۲	۵.۲۱ بی‌سیم مادون قرمز	۵.۲۱
۱۰۷۸	۶.۲۱ شناسایی فرکانس رادیویی و ارتباطات میدان نزدیک	۶.۲۱
۱۰۸۴	۷.۲۱ بی‌سیم فوق العاده پهن‌باند	۷.۲۱
۱۰۸۸	۸.۲۱ کاربردهای بی‌سیم اضافی	۸.۲۱

۱۰۹۷	۲۲ آزمایش و اندازه‌گیری در ارتباطات
۱۰۹۸	۱.۲۲ تجهیزات آزمایش در ارتباطات
۱۱۱۹	۲.۲۲ آزمایش‌های رایج در ارتباطات
۱۱۴۲	۳.۲۲ تکنیک‌های عیب‌یابی
۱۱۴۸	۴.۲۲ آزمایش تداخل الکترومغناطیسی
۱۱۷۰	نمایه

فصل ۱۹

ارتباطات نوری

سیستم‌های ارتباط نوری از نور برای انتقال اطلاعات از مکانی به مکان دیگر استفاده می‌کنند. نور نوعی تابش الکترومغناطیسی مانند امواج رادیویی است. امروزه نور مادون قرمز به طور فزاینده‌ای به عنوان سیگнал حامل اطلاعات در یک سیستم ارتباطی استفاده می‌شود. محیط‌های انتقال یا فضای آزاد یا یک کابل مخصوص حامل نور به نام کابل فیبر نوری است. از آنجایی که فرکانس نور بسیار زیاد است، می‌تواند نرخ بسیار بالایی از انتقال داده را با قابلیت اطمینان عالی در خود جای دهد. این فصل مفاهیم اساسی، مدارها و پرکاربردترین فناوری‌های شبکه نوری را معرفی می‌کند.

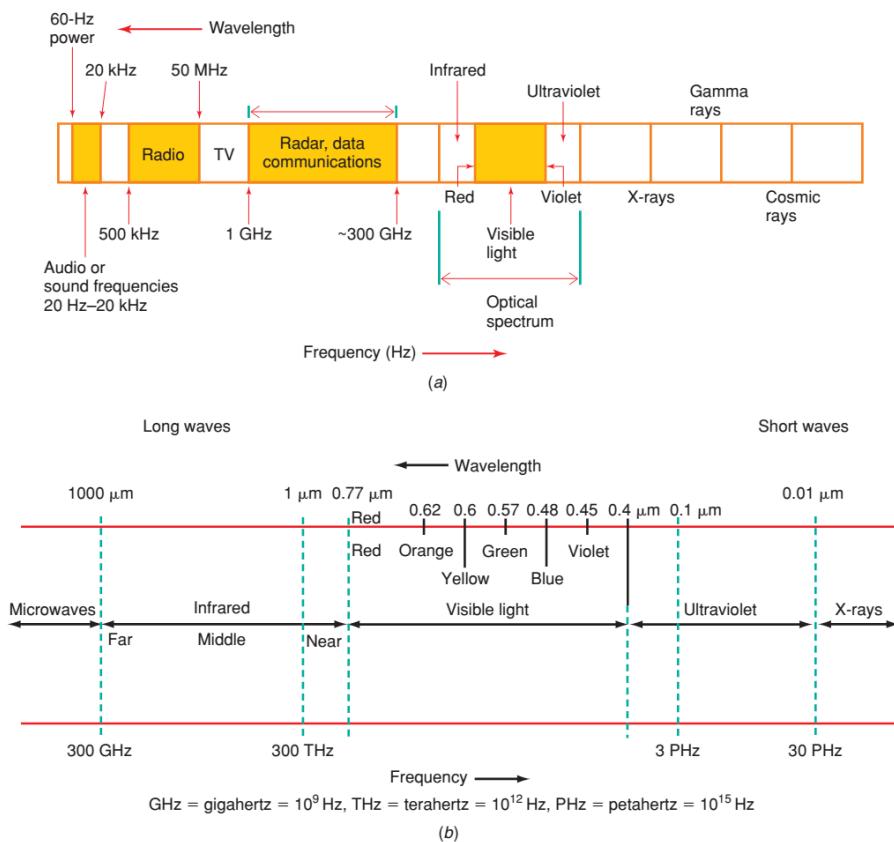
اهداف:

بعداز تکمیل این فصل، شما می‌توانید:

- اصطلاحات نوری و نوری را تعریف کنید. سه باند اصلی طیف نوری را نام ببرید و محدوده طول موج آنها را بیان کنید.
- هشت مزیت کابل‌های فیبر نوری را نسبت به کابل‌های الکتریکی برای ارتباط بیان کنید.
- شش کاربرد ارتباطات معمول برای کابل فیبر نوری را نام ببرید.
- نحوه انتشار نور از طریق کابل فیبر نوری را توضیح دهید. سه نوع اصلی کابل‌های فیبر نوری را نام ببرید و دو ماده‌ای که از آنها ساخته شده‌اند را بیان کنید.
- تلفات انتقال را در کابل فیبر نوری بر حسب دسیبل نسبت به مسافت و کانکتورها محاسبه کنید.
- دو نوع اجزای فرستنده نوری و ویژگی‌های اصلی عملکرد آنها را نام ببرید.
- عملکرد آشکارساز و گیرنده نوری را توضیح دهید.
- طبیعت و محدوده فرکانس باند مادون قرمز را بیان کنید و منابع طبیعی و مصنوعی نور مادون قرمز را نام ببرید.
- سه روش اصلی برای دستیابی به ۴۰، ۱۰۰ و ۴۰۰ گیگابیت بر ثانیه روی فیبر را بیان کنید.

۱.۱۹ اصول نوری

اپتیک به خودی خود یک رشته اصلی مطالعه است و بسیار فراتر از محدوده این کتاب است. اکثر دوره‌های فیزیک اصول اولیه نور و اپتیک را معرفی می‌کنند. ما به طور خلاصه اصولی را که مستقیماً به سیستم‌ها و اجزای ارتباطات نوری مربوط می‌شوند، مرور می‌کنیم.



شکل ۱.۱۹: طیف نوری: (الف) طیف فرکانس الکترومغناطیسی که طیف نوری را نشان می‌دهد. (ب) جزئیات طیف نوری.

نور

نور، امواج رادیویی و امواج مایکروویو همگی اشکال تابش الکترومغناطیسی هستند. همانطور که در شکل (۱.۱۹) نشان داده شده است، فرکانس‌های نور بین امواج مایکروویو و اشعه ایکس قرار می‌گیرند. فرکانس‌های رادیویی از حدود 10^1 کیلوهرتز تا 3×10^{11} گیگاهرتز متغیر است. امواج مایکروویو از ۱ تا 3×10^3 گیگاهرتز گسترش می‌یابند. محدوده حدود ۳۰ تا 3×10^4 گیگاهرتز به طور کلی به نام امواج میلی‌متری تعریف می‌شود.

بالاتر از این مقیاس، طیف نوری است که از نور مادون قرمز، مرئی و فرابنفش تشکیل شده است. فرکانس طیف نوری در محدوده $3 \times 10^{14} \times 10^{16}$ هرتز است. این شامل هر دو نوار مادون قرمز و فرابنفش و همچنین بخش‌های قابل مشاهده طیف است. طیف مرئی از $4 \times 10^{14} \times 7.5 \times 10^{15}$ هرتز

هرتز است.

خوب است بدانید که:

نور به ندرت بر حسب فرکانس ذکر می‌شود. در عوض، طول موج نور اغلب بر حسب متر بین قلهای یک موج اندازه‌گیری می‌شود.

ما بهندرت به "فرکانس نور" اشاره می‌کنیم. نور بر حسب طول موج بیان می‌شود. بهیاد بیاورید که طول موج فاصله‌ای است که بر حسب متر بین قلهای یک موج اندازه‌گیری می‌شود. با عبارت آشنا زیر محاسبه می‌شود

$$\lambda = \frac{300,000,000}{f}$$

که در آن λ (لامبда) طول موج بر حسب متر، $300,000,000$ سرعت نور بر حسب متر بر ثانیه و f فرکانس بر حسب هertz است. جزئیات طیف نوری در شکل (۱.۱۹)(ب) نشان داده شده است. امواج نور بسیار کوتاه هستند و معمولاً در نانومتر (nm، یک میلیارد متر) یا میکرومتر (μm ، یک میلیونیم متر) بیان می‌شوند. یک اصطلاح قدیمی تر برای میکرومتر نام میکرون است. نور مرئی بسته بهرنگ نور در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر یا $400/700$ میکرومتر است. نور با طول موج کوتاه بنفش (۴۰۰ نانومتر) و قرمز (۷۰۰ نانومتر) نور با طول موج بلند است. واحد دیگر اندازه‌گیری طول موج نور، آنگستروم است. یک آنگستروم (\AA) برابر با 10^{-10} متر یا 10^{-4} میکرومتر است. به عبارت دیگر، یک میکرومتر برابر با 10000\AA است.

درست در زیر نور مرئی ناحیه‌ای به نام فروسرخ وجود دارد. طیف آن از $1000/700$ میکرومتر است. گاهی اوقات مادون قرمز را به مادون قرمز نزدیک یا دور اطلاق می‌کنند. مادون قرمز نزدیک فرکانس‌هایی نزدیک به طیف نوری هستند و مادون قرمز دور فرکانس کمتری در نزدیکی ناحیه مایکروویو بالایی دارد [شکل (۱.۱۹)(ب)].

درست بالای طیف مرئی محدوده فرابینفش است. محدوده فرابینفش بالاتر از نور مرئی بنفش است که دارای طول موج ۴۰۰ نانومتر یا $400/4$ میکرومتر تا حدود 10^{-8} متر یا 10^{-10} میکرومتر یا ۱۰ نانومتر است. هر چه فرکانس نور بیشتر باشد طول موج کوتاهتر است. منبع اصلی اشعه ماوراء بنفش خورشید است. مادون قرمز و فرابینفش در طیف نوری قرار دارند.

سرعت نور : امواج نور مانند امواج مایکروویو در یک خط مستقیم حرکت می‌کنند. پرتوهای نوری ساطع شده توسط شمع، لامپ یا سایر منابع نوری در یک خط مستقیم در همه جهات حرکت می‌کنند. فرض بر این است که امواج نور مانند امواج رادیویی دارای یک جبهه موج کروی هستند. سرعت نور در فضای آزاد تقریباً $300,000,000$ متر بر ثانیه یا حدود 186000 مایل بر ثانیه است. اینها مقادیری هستند که معمولاً در محاسبه استفاده می‌شوند، اما برای یک نتیجه دقیق‌تر، مقادیر واقعی نزدیک‌تر به $10^8 m/s$ یا 186280 مایل بر ثانیه است.

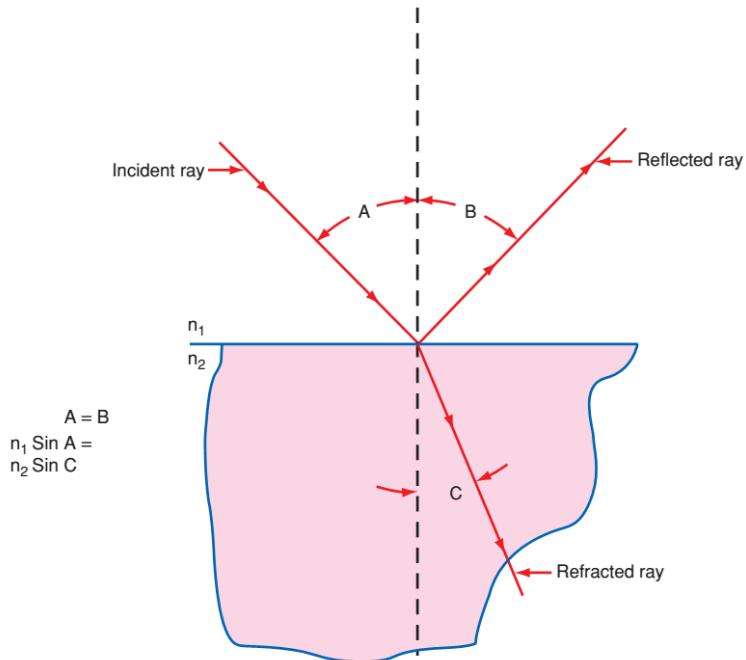
سرعت نور به محیطی که نور از آن عبور می‌کند بستگی دارد. ارقام داده شده در بالا برای حرکت نور در فضای آزاد، یعنی برای نوری که در هوا یا خلاء حرکت می‌کند، صحیح است. وقتی نور از ماده دیگری مانند شیشه، آب یا پلاستیک عبور می‌کند، سرعت آن کمتر می‌شود.

اپتیک فیزیکی

اپتیک فیزیکی به روش‌هایی اطلاق می‌شود که نور را می‌توان پردازش کرد. نور را می‌توان به روش‌های

مختلفی پردازش یا دستکاری کرد. به عنوان مثال، لنزها به طور گسترهای برای فوکوس(کانونی کردن)، بزرگ کردن یا کاهش اندازه امواج نور از منبعی استفاده می‌شوند.

بازتاب (انعکاس) : ساده‌ترین راه برای دستکاری نور بازتاب آن است. هنگامی که پرتوهای نور به یک سطح بازتابنده مانند آینه برخورد می‌کنند، امواج نور به عقب پرتاب می‌شوند یا منعکس می‌شوند. با استفاده از آینه می‌توان جهت پرتو نور را تغییر داد.



شکل ۲.۱۹: نشان دادن بازتاب و شکست در سطح مشترک دو ماده نوری.

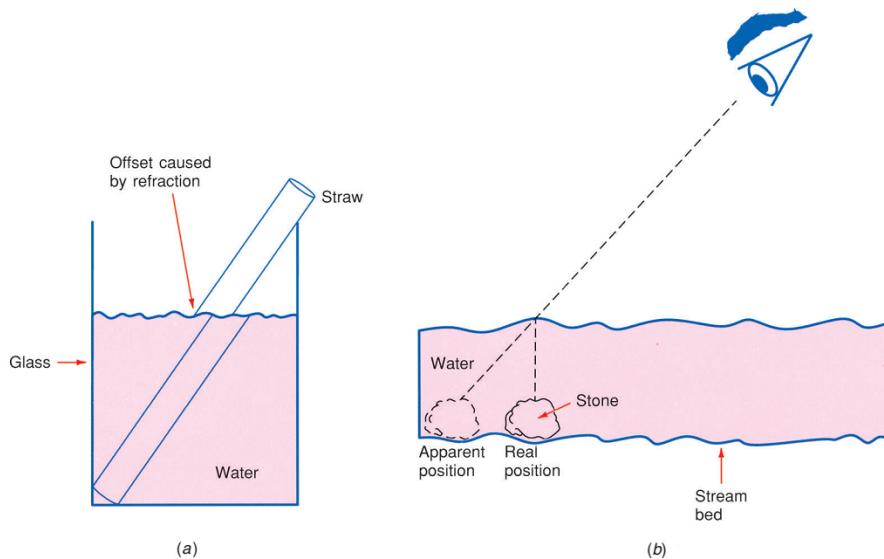
بازتاب نور از آینه از قانون فیزیکی ساده پیروی می‌کند. یعنی در صورتی که زاویه پرتو نوری که به آینه برخورد می‌کند، جهت موج نور منعکس شده را به راحتی پیش بینی کرد (شکل ۲.۱۹). یک خط فرضی را در نظر بگیرید که با سطح صاف آینه عمود باشد. البته همانطور که نشان داده شده است، خط عمود بر سطح، زاویه قائمه ایجاد می‌کند. این خط عمودی فرضی به عنوان نرمال (عمود بر سطح) نامیده می‌شود. معمولاً در نقطه‌ای ترسیم می‌شود که آینه پرتو نور را منعکس می‌کند.

اگر پرتو نور از حالت عمودی پیروی کند، انعکاس به سادگی در همان مسیر بر می‌گردد. پرتو نور منعکس شده دقیقاً با پرتو نور اصلی منطبق خواهد بود.

اگر پرتو نور تحت زاویه A نسبت به حالت عمودی به آینه برخورد کند، پرتو نور بازتاب شده آینه را در همان زاویه B به حالت عمودی ترک می‌کند. این اصل به قانون بازتاب معروف است. معمولاً به شکل زیر بیان می‌شود: زاویه تابش برابر با زاویه بازتاب است.

پرتو نور از منبع نور را معمولاً پرتو تابشی می‌نامند. این زاویه A با حالت عمودی در سطح بازتابنده ایجاد می‌کند که به آن زاویه تابش می‌گویند. اشعه بازتاب شده موج نوری است که از سطح آینه خارج می‌شود. جهت آن با زاویه انعکاس B که دقیقاً برابر با زاویه تابش است تعیین می‌شود.

شکست (انکسار): جهت پرتو نور را می‌توان با انکسار نیز تغییر داد، که عبارت است از خم شدن پرتو نور که هنگام عبور پرتوهای نور از یک محیط به محیط دیگر رخ می‌دهد. در بازتاب، پرتو نور به جای اینکه توسط آینه جذب شود یا از آن عبور کند، از سطح بازتابنده منعکس می‌شود. شکست تنها زمانی اتفاق می‌افتد که نور از مواد شفاف مانند هوای آب و شیشه عبور کند. انکسار در نقطه‌ای اتفاق می‌افتد که دو ماده مختلف به هم می‌رسند. به عنوان مثال، در جایی که هوای آب بهم می‌رسند، شکست رخ می‌دهد. خط تقسیم بین دو ماده یا محیط مختلف به عنوان مرز یا سطح مشترک شناخته می‌شود.



شکل ۳.۱۹: نمونه‌هایی از اثر شکست.

برای تجسم انکسار، یک قاشق یا نی را در یک لیوان آب، همانطور که در شکل (۳.۱۹)(الف) نشان داده شده، قرار دهید. اگر لیوان آب را از کنار مشاهده کنید، به نظر می‌رسد که قاشق یا نی در سطح آب خم شده یا منحرف شده است.

خوب است بدانید که:

ساده‌ترین راه برای دستکاری نور بازتاب آن است. جهت نور منعکس شده را می‌توان با اعمال قانون بازتاب پیش‌بینی کرد: زاویه تابش برابر با زاویه بازتاب است.

پدیده دیگری که در اثر انکسار ایجاد می‌شود، هرگاه جسمی را زیر آب مشاهده کنید، رخ می‌دهد. ممکن است در یک جریان آب صاف ایستاده باشید و سنگی را در پایین مشاهده کنید. سنگ در موقعیتی متفاوت از جایی است که شما مشاهده می‌کنید به نظر می‌رسد [شکل ۱۹-۳(ب)]. شکست به‌این دلیل رخ می‌دهد که نور در مواد مختلف با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کند. سرعت نور در فضای آزاد معمولاً بسیار بیشتر از سرعت نور در آب، شیشه یا مواد دیگر است. مقدار شکست نور یک ماده معمولاً بر حسب ضریب شکست n بیان می‌شود. این نسبت سرعت نور در هوای سرعت نور در ماده است. همچنین تابعی از طول موج نور است.

بهطور طبیعی، ضریب شکست هوا یک است، فقط بهاین دلیل که یک تقسیم بر خودش یک است. ضریب شکست آب تقریباً $1/3$ و ضریب شکست شیشه $1/5$ است.

برای درک بهتر این ایده، یک تکه شیشه با ضریب شکست $1/5$ را در نظر بگیرید. این بدان معنی است که نور از هوا $1/5$ فوت عبور می‌کند، اما در همان زمان، نور تنها یک فوت از طریق شیشه عبور می‌کند. شیشه موج نور را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. ضریب شکست مهم است زیرا دقیقاً نشان می‌دهد که موج نور در مواد مختلف چقدر خم می‌شود.

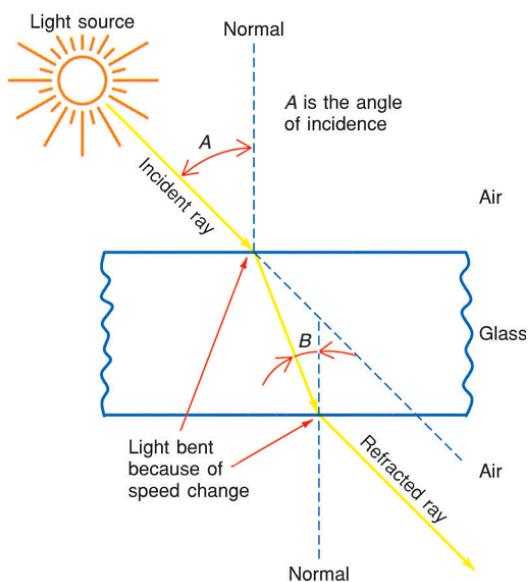
خوب است بدانید که:

خمش پرتوهای نور معروف به شکست بهاین دلیل رخ می‌دهد که نور در مواد مختلف با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کند. این پدیده در نقطه‌ای اتفاق می‌افتد که در آن دو ماده مختلف بهم می‌رسند.

هنگامی که یک پرتو نور از یک محیط به حیط دیگر می‌گذرد، موج نور بر اساس ضریب شکست خم می‌شود. در شکل (۴.۱۹)، پرتو تابشی در زاویه A نسبت به حالت عمود به سطح برخورد می‌کند اما در زاویه C شکسته می‌شود. رابطه بین زاویه‌ها و ضریب‌های شکست خواهد بود:

$$n_1 \sin A = n_2 \sin C$$

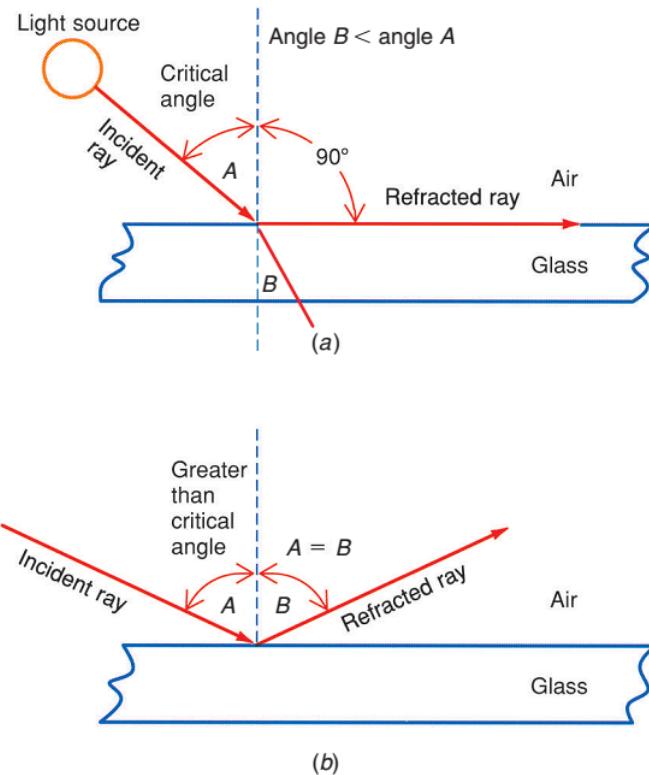
حال به شکل (۴.۱۹) مراجعه کنید. یک پرتو نور از هوا می‌گذرد. زاویه A را با خط عمود بر سطح



شکل ۴.۱۹: چگونه پرتوهای نور هنگام عبور از یک محیط به محیط دیگر خم می‌شوند.

می‌سازد. در سطح مشترک بین هوا و شیشه، جهت پرتو نور تغییر می‌کند. سرعت نور کمتر است. بنابراین، زاویه‌ای که پرتو نور نسبت به خط عمود ایجاد می‌کند با زاویه برخورد متفاوت است. اگر ضریب شکست مشخص باشد، زاویه دقیق را می‌توان با رابطه‌ای که قبله داده شد تعیین کرد.

همانطور که در شکل (۴.۱۹) نشان داده شده است، اگر پرتو نور از شیشه به هوا برگردد، دوباره تغییر جهت می‌دهد. نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که زاویه پرتو شکست B با زاویه تابش A برابر نیست.



شکل ۵.۱۹: موارد خاص انكسار. (الف) در امتداد سطح. (ب) بازتاب.

اگر زاویه تابش افزایش یابد، در نقطه‌ای زاویه شکست برابر با 90° درجه با نرمال (خط عمود بر سطح) خواهد بود، همانطور که در شکل (۵.۱۹)(الف) نشان داده شده است. هنگامی که این اتفاق می‌افتد، پرتوهای نور شکسته بهرنگ قمز در امتداد سطح مشترک بین هوا و شیشه حرکت می‌کند. در این مورد، زاویه تابش A زاویه بحرانی است. مقدار زاویه بحرانی به ضریب شکست شیشه بستگی دارد.

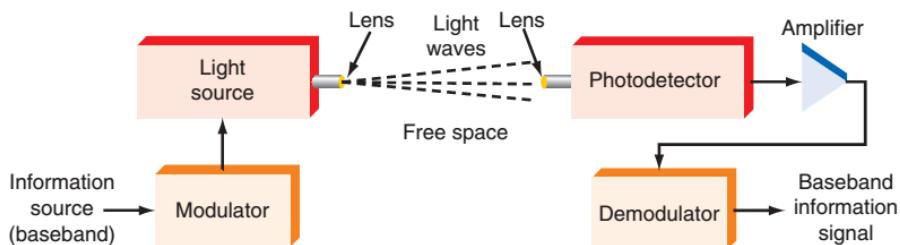
اگر زاویه تابش را بزرگتر از زاویه بحرانی کنید، پرتو نور از سطح مشترک منعکس می‌شود [شکل (۵.۱۹)(ب)]. هنگامی که پرتو نور با زاویه ای بیشتر از زاویه بحرانی به سطح مشترک برخورد می‌کند، پرتو نور از سطح مشترک به شیشه عبور نمی‌کند. اثر بهاین صورت است که انگار یک آینه در فصل مشترک وجود دارد. هنگامی که این اتفاق می‌افتد، زاویه انعکاس B برابر با زاویه برخورد A است، گویی از یک آینه واقعی استفاده شده است. این عمل به عنوان بازتاب داخلی کل شناخته می‌شود که فقط در موادی اتفاق می‌افتد که سرعت نور در آنها کمتر از هوا است. این اصل اساسی است که به کابل فیبر نوری اجازه کار می‌دهد.

۲.۱۹ سیستم‌های مخابرات نوری

سیستم‌های ارتباطات نوری از نور به عنوان حامل اطلاعاتی که قرار است منتقل شوند استفاده می‌کنند. همانطور که قبلًا اشاره شد، محیط ممکن است فضای آزاد باشد مانند امواج رادیویی یا یک "وله" نوری خاص یا موجبر به نام کابل فیبر نوری. هر دو محیط استفاده می‌شوند، اگرچه کابل فیبر نوری بسیار کاربردی‌تر و بطور معتبره استفاده می‌شود. این فصل بر روی کابل فیبر نوری تمرکز دارد.

منطق ارتباطات امواج نوری

محدودیت اصلی سیستم‌های ارتباطی، قابلیت‌های محدود حمل اطلاعات است. به عبارت دقیق‌تر، این بدان معناست که محیط ارتباط می‌تواند پیام‌های زیادی را حمل کند. این توانایی مدیریت اطلاعات به طور مستقیم با پهنای باند کanal ارتباط مناسب است. استفاده از نور به عنوان محیط انتقال، پهنای باند بسیار زیادی را افزایش می‌دهد. به جای استفاده از سیگنال الکتریکی که روی کابل یا امواج الکترومغناطیسی در فضا حرکت می‌کند، اطلاعات روی یک پرتو نور قرار می‌گیرد و از طریق فضا یا از طریق یک موجبر فیبر نوری و پره منتقل می‌شود.



شکل ۶.۱۹: سیستم ارتباط نوری فضای آزاد.

ارتباطات امواج نور در فضای آزاد

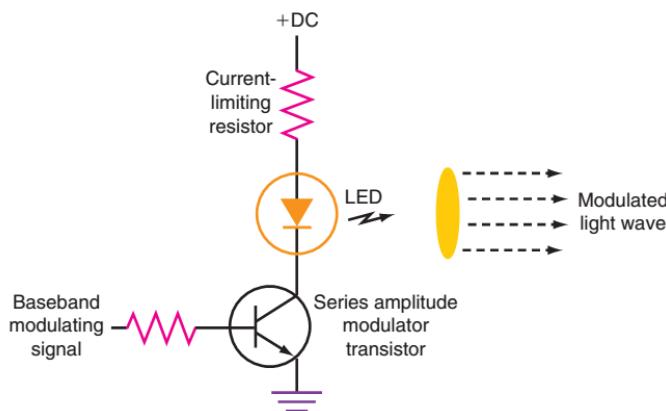
شکل (۶.۱۹) عناصر یک سیستم ارتباط نوری را با استفاده از فضای آزاد نشان می‌دهد. این شامل منبع نور است جهت انتقال سیگنال، یک آشکارساز نوری برای دریافت نور و تبدیل آن به سیگنال الکتریکی، یک تقویت کننده و یک مدولاتور برای بازیابی سیگنال اصلی اطلاعات، مدوله شده است. **منابع نور**: فرستنده منبع نور است. دیگر منابع نوری رایج دیودهای ساطع کننده نور (LED) و لیزرها هستند. این منابع می‌توانند تغییرات سیگنال الکتریکی را با سرعت ۱۰۰ گیگاهرتز یا بیشتر دنبال کنند.

لیزرها نور تک رنگ یا تک فرکانس تولید می‌کنند که کاملاً همدوس (منسجم)^۱ است. یعنی همه امواج نور به طور همگام با یکدیگر ردیف می‌شوند و در نتیجه یک پرتو نور بسیار باریک و شدید تولید می‌کنند.

مدولاتور: یک مدولاتور برای تغییر شدت پرتو نور مطابق با سیگنال باند پایه مدوله کننده استفاده می‌شود. مدولاسیون دامنه، که به عنوان مدولاسیون شدت نیز شناخته می‌شود، در جایی استفاده می‌شود که سیگنال اطلاعات، روشنایی نور را کنترل می‌کند. سیگنال‌های آنالوگ روشنایی را به طور مداوم در یک محدوده مشخص تغییر می‌دهند. این تکنیک در برخی از سیستم‌های تلویزیون کابلی استفاده می‌شود. سیگنال‌های دیجیتالی به سادگی پرتو نور را با سرعت داده خاموش و روشن می‌کنند.

^۱Coherent

مدولاسیون دیجیتال معمولاً داده‌های باینری با فرمت NRZ است که لیزر را خاموش یا روشن می‌کند تا کلیدزنی روشن خاموش^۲ (OOK) یا کلیدزنی تغییر دامنه^۳ (ASK) تولید شود.



شکل ۷.۱۹: یک فرستنده نوری ساده با مدولاتور دامنه سری. سیگنال‌های آنالوگ: ترانزیستور هدایت خود را تغییر می‌دهد و به عنوان یک مقاومت متغیر عمل می‌کند. سیگنال‌های پالس: ترانزیستور به عنوان یک کلید روشن/خاموش اشباع عمل می‌کند.

یک مدولاتور برای سیگنال‌های آنالوگ می‌تواند یک ترانزیستور قدرت به صورت سری با منبع نور و منبع تغذیه dc آن باشد (شکل ۷.۱۹). سیگنال صوتی، تصویری یا سایر سیگنال‌های اطلاعاتی به تقویت کننده‌ای اعمال می‌شود که ترانزیستور مدولاتور کلاس A را هدایت می‌کند. با مثبت شدن سیگنال آنالوگ، درایو بیس روی ترانزیستور افزایش می‌یابد، ترانزیستور سخت‌تر روشن می‌شود و ولتاژ بیس کلکتور به‌امیر آن کاهش می‌یابد. این ولتاژ بیشتری را به منبع نور اعمال می‌کند و آن را روشن‌تر می‌کند. دامنه سیگنال منفی یا کاهشی، ترانزیستور را به سمت قطع سوق می‌دهد، در نتیجه جریان کلکتور آن کاهش و افت ولتاژ در ترانزیستور افزایش می‌یابد. این باعث کاهش ولتاژ منبع نور می‌شود.

خوب است بدانید که:

بیشتر ارتباطات موج نور از طریق مدولاسیون پالس انجام می‌شود، اگرچه مدولاسیون دامنه با سیگنال‌های آنالوگ استفاده می‌شود.

مدولاسیون فرکانس در ارتباطات نوری استفاده نمی‌شود. هیچ راه عملی برای تغییر فرکانس منبع نور وجود ندارد، حتی یک منبع تک رنگ مانند LED یا لیزر. مدولاسیون دامنه با سیگنال‌های آنالوگ استفاده می‌شود، اما در غیر این صورت بیشتر ارتباطات امواج نور توسط مدولاسیون پالس انجام می‌شود.

مدولاسیون پالس به خاموش و روشن کردن منبع نور مطابق با برخی از سیگنال‌های باینری سریالی

^۲On Off Keying (OOK)

^۳Amplitude Shift Keying (ASK)

اشاره دارد. رایج‌ترین نوع مدولاسیون پالس، مدولاسیون کد پالس^۴ (PCM) است که داده‌های باینری سریالی است که در بایت‌ها یا کلمات طولانی تر سازماندهی می‌شوند. فرمتهای RZ و منچستر رایج هستند.

گیرنده: موج نور مدوله شده توسط یک آشکارساز نوری دریافت می‌شود. این معمولاً یک فتودیود یا ترانزیستور است که هدایت آن توسط نور تغییر می‌کند. سیگنال کوچک تقویت شده و سپس برای آشکارسازی سیگنال ارسال شده اولیه، مدوله می‌شود. پردازش دیجیتال ممکن است لازم باشد. به عنوان مثال، اگر سیگنال اصلی صوت است که قبل از انتقال به عنوان سیگنال PCM توسط یک مبدل A/D دیجیتالی شده است، برای بازیابی سیگنال صوتی به یک مبدل D/A در گیرنده نیاز است.

ارتباط با پرتو نور در فضای آزاد در فواصل بسیار طولانی بهدلیل تضعیف زیاد نور در اثر اثرات جوی غیرعملی است. مه، دود، باران، برف و سایر شرایط نور را جذب، بازتاب، شکست و پراکنده می‌کنند و آن را تا حد زیادی کاهش می‌دهند و در نتیجه فاصله انتقال را محدود می‌کنند. پرتوهای نور مصنوعی که برای انتقال اطلاعات استفاده می‌شود در طول ساعات روز توسط خورشید محو می‌شوند. و هر منبع نوری دیگری که در جهت گیرنده باشد می‌تواند با آنها تداخل داشته باشد. معمولاً فاصله‌ها با LED‌ها و لیزرهای کم مصرف به چند صد فوت محدود می‌شود. در صورت استفاده از لیزرهای پرقدرت، فاصله چند مایلی ممکن است.

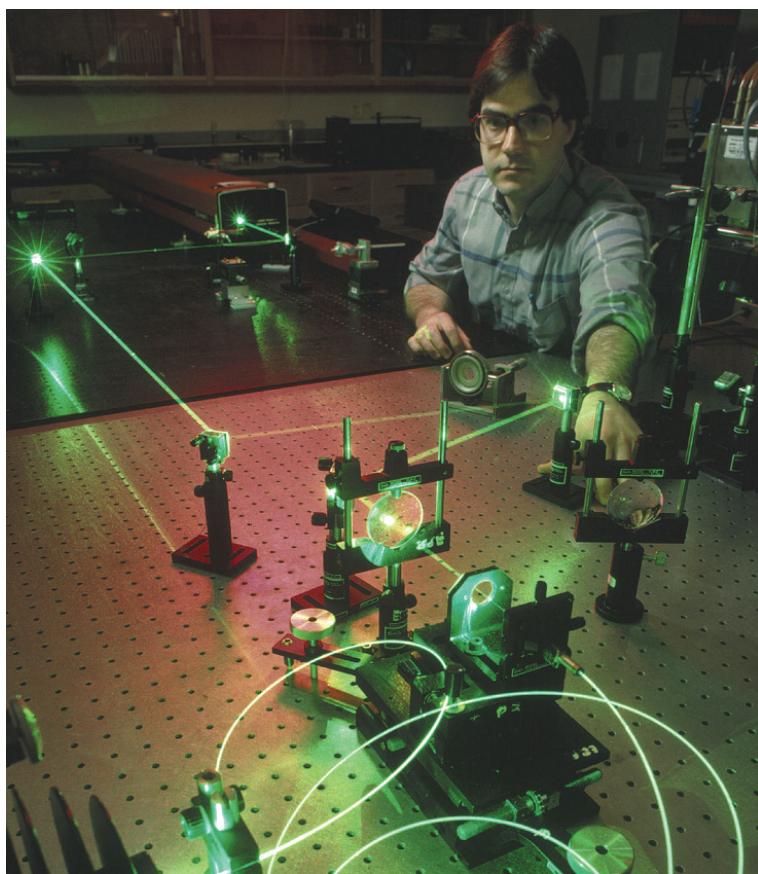
ارتباط پرتو نور با اختراق لیزر، یک منبع نور باشد بالا و تک فرکانس ویژه، بسیار کاربردی تر شده است. یک پرتو بسیار باریک از نور درخشنan با طول موج (رنگ) خاص تولید می‌کند. بهدلیل شدت زیاد، پرتو لیزر می‌تواند بهتر از سایر انواع نور به موانع جوی نفوذ کند و در نتیجه ارتباطات پرتو نور را در فواصل طولانی تر قابل اعتمادتر می‌کند. هنگامی که از لیزر استفاده می‌شود، پرتو نور به قدری باریک است که فرستنده و گیرنده باید کاملاً با یکدیگر هماهنگ باشند تا ارتباط برقرار شود. اگرچه این باعث ایجاد مشکلاتی در تراز نصب اولیه می‌شود، اما به حذف منابع نوری مزاحم خارجی نیز کمک می‌کند.

سیستم ارتباطات فیبر نوری

به جای فضای آزاد، می‌توان از نوعی کابل حامل نور استفاده کرد. امروزه کابل‌های فیبر نوری بهشت اصلاح شده‌اند. کابل‌هایی به طول چندین مایل می‌توانند ساخته شوند و سپس بهمنظور انتقال اطلاعات به یکدیگر متصل شوند. به لطف این کابل‌های فیبر نوری، یک محیط انتقال جدید اکنون در دسترس است. مزیت بزرگ آن ظرفیت بالای حمل اطلاعات (پهنه‌ای باند وسیع) آن است. در حالی که صدها مکالمه تلفنی ممکن است به طور همزمان در فرکانس‌های مایکروویو مخابره شوند، هزاران سیگنال را می‌توان روی یک پرتو نور از طریق یک کابل فیبر نوری حمل کرد. هنگامی که از تکنیک‌های مالتی‌پلکس مشابه با سیستم‌های تلفن و رادیو استفاده می‌شود، سیستم ارتباطی فیبر نوری ظرفیت تقریباً نامحدودی برای انتقال اطلاعات دارد.

اجزای یک سیستم ارتباطی معمولی فیبر نوری در شکل ۸.۱۹ نشان داده شده است. سیگنال اطلاعاتی که قرار است ارسال شود ممکن است داده‌های صوتی، تصویری یا کامپیوتری باشد. اولین قدم تبدیل اطلاعات به صورتی سازگار با محیط ارتباطی است که معمولاً با تبدیل سیگنال‌های آنالوگ پیوسته مانند سیگنال‌های صوتی و تصویری (تلویزیون) به یک سری پالس‌های دیجیتالی انجام می‌شود. برای این منظور از مبدل A/D استفاده می‌شود.

^۴Pulse Code Modulation (PCM)

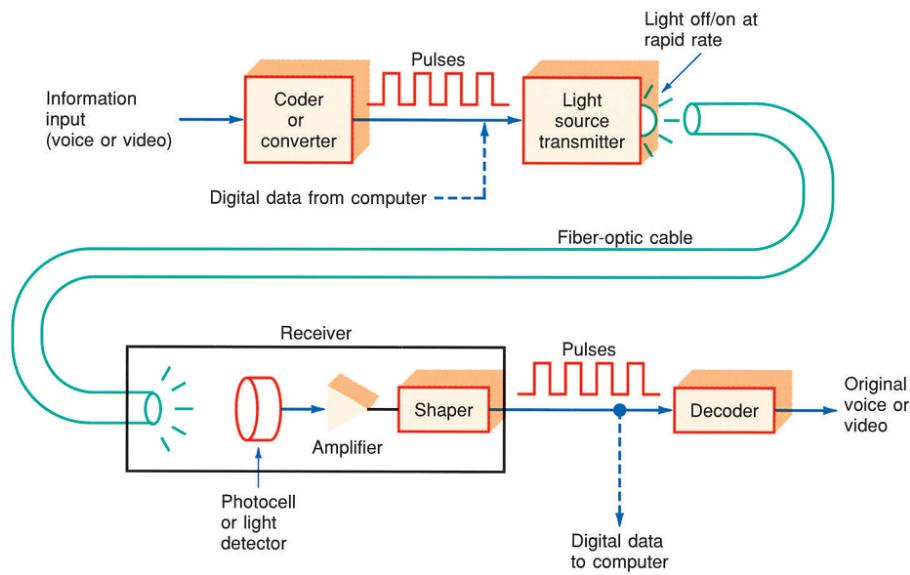


موجبرهای نوری و تحقیقات لیزری موجی از محصولات جدید را در زمینه ارتباطات ایجاد کرد.

سپس از این پالس‌های دیجیتال برای خاموش و روشن شدن یک منبع نور کامل استفاده می‌شود. در سیستم‌های ساده کم‌هزینه که در فواصل کوتاه انتقال می‌یابند، منبع نور معمولاً یک دیود ساطع کننده نور است که یک پرتو نور مادون قرمز با شدت کم ساطع می‌کند. پرتوهای مادون قرمز مانند پرتوهای مورد استفاده در کنترل از راه دور تلویزیون نیز در انتقال استفاده می‌شوند.

پالس‌های پرتو نور سپس به یک کابل فیبر نوری وارد می‌شوند که می‌تواند آنها را در فواصل طولانی منتقل کند. در انتهای گیرنده، یک دستگاه حساس به نور به نام فتوسل یا آشکارساز نور برای تشخیص پالس‌های نور استفاده می‌شود. پالس‌های نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. پالس‌های الکتریکی تقویت شده و دوباره به شکل دیجیتال تغییر شکل می‌دهند. آنها به یک رمزگشا، مانند مبدل D/A، که در آن صدا یا ویدیوی اصلی بازیابی می‌شود، تغذیه می‌شوند.

در سیستم‌های انتقال بسیار طولانی، واحدهای تکرار کننده باید در طول مسیر استفاده شوند. از آنجایی که نور در طول مسیرهای طولانی کابل بسیار ضعیف می‌شود، در برخی مواقع ممکن است آنقدر ضعیف باشد که به طور قابل اعتماد دریافت نشود. برای غلبه بر این مشکل، از ایستگاه‌های رله (تقویت کننده) ویژه برای برداشتن پرتو نور، تبدیل آن به پالس‌های الکتریکی تقویت شده و سپس ارسال مجدد بر روی پرتو نور دیگری استفاده می‌شود.



شکل ۸.۱۹: عناصر اساسی یک سیستم ارتباطی فیبر نوری.

کاربرد کابل‌های فیبر نوری

سیستم‌های ارتباطی فیبر نوری هر روز بیشتر و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد اصلی آنها در سیستم‌های تلفن راه دور و سیستم‌های تلویزیون کابلی است. شبکه‌های فیبر نوری نیز هسته یا ستون فقرات اینترنت را تشکیل می‌دهند. نصب کابل‌های فیبر نوری نسبت به کابل‌های الکتریکی استاندارد گران‌تر یا پیچیده‌تر نیست، اما ظرفیت انتقال اطلاعات آنها چندین برابر بیشتر است.

سیستم‌های ارتباطی فیبر نوری در کاربردهای دیگری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، بهدلیل پهنه‌ای باند وسیع، از آنها برای اتصال کامپیووترها در شبکه‌های داخل یک ساختمان بزرگ، برای حمل سیگنال‌های کنترلی در هواپیماها و کشتی‌ها و در سیستم‌های تلویزیونی استفاده می‌شود. در همه موارد، کابل‌های فیبر نوری جایگزین کابل‌های کواکسیال معمولی یا زوج سیم تابیده شده می‌شوند. شکل (۹.۱۹) برخی از کاربردهایی را که در آنها از کابل‌های فیبر نوری استفاده می‌شود، فهرست می‌کند.

شکل ۹.۱۹: کاربرد کابل‌های فیبر نوری: ۱- استودیو تلویزیونی برای اتصال فرستنده که پیوند رادیویی مایکروبو را حذف می‌کند. ۲- سیستم‌های تلویزیون مدار بسته که در ساختمان‌ها برای امنیت استفاده می‌شود. ۳- سیستم‌های ارتباطی امن در پایگاه‌های نظامی. ۴- شبکه‌های کامپیوترا، منطقه وسیع، مترو و منطقه محلی. ۵- ارتباطات کشتی. ۶- ارتباطات/کنترل هواپیما. ۷- اتصال ابزارهای اندازه‌گیری و نظارت در کارخانه‌ها و آزمایشگاه‌ها. ۸- اکتساب داده و ارتباط سیگنال کنترلی در سیستم‌های کنترل فرآیند صنعتی. ۹- ابزار دقیق نیروگاه هسته‌ای. ۱۰- ارتباط پر دیس دانشکده‌ها. ۱۱- ارتباطات تاسیسات ایستگاه‌ها (برق، گاز، و غیره). ۱۲- سیستم‌های تلویزیون کابلی جایگزین کابل کواکسیال. ۱۳- اینترنت. ۱۴- حمل اطلاعات (Backhaul) برای ایستگاه‌های پایه سلولی. ۱۵- سیستم‌های آنتن توزیع شده (DAS). ۱۶- اتصالات بین سرورها، روتراها و سوئیچ‌ها در مرکز داده. ۱۷- اتصال بین ایستگاه پایه سلولی و رادیویی راه دور نصب شده روی آتن.

مزایای فیبر نوری

مزیت اصلی کابل‌های فیبر نوری، قابلیت عظیم انتقال اطلاعات آنهاست. این ظرفیت به پهنانی باند کابل بستگی دارد. پهنانی باند به محدوده فرکانس‌هایی که یک کابل حمل می‌کند اشاره دارد. کابل‌های الکتریکی مانند کواکسیال پهنانی باند وسیعی دارند (تا حدود ۷۵° مگاهرتز)، اما پهنانی باند کابل فیبر نوری بسیار بیشتر است. سرعت داده‌های بیش از ۱۰° گیگاهرتز به دست آمده است و حتی نرخ‌های بالاتری نیز با مالتی‌پلکس شدن به دست آمده است. کابل فیبر نوری مزایای بسیار دیگری نیز دارد که در شکل (۱۰.۱۹) خلاصه شده است.

خوب است بدانید که:

اندازه کوچک و شکنندگی کابل فیبر نوری به همراه ابزار و تکنیک‌های خاص مورد نیاز کار با آن را دشوار می‌کند.

کابل فیبر نوری معایبی دارد. هزینه بالا بزرگ‌ترین نقطه ضعف است. در غیر این صورت کوچک بودن

شکل ۱۰.۱۹: مزایای کابل‌های فیبر نوری نسبت به کابل‌های الکتریکی معمولی: ۱. پهنانی باند. بیشتر کابل‌های فیبر نوری قابلیت انتقال اطلاعات بالایی دارند. ۲. افت کم. کابل‌های فیبر نوری نسبت به طول معادل کابل کواکسیال تضعیف سیگنال کمتری در یک فاصله معین دارند. ۳. سبک وزن. کابل‌های شیشه‌ای یا پلاستیکی بسیار سبک‌تر از کابل‌های مسی هستند و در موقعی که وزن کم حیاتی است (به عنوان مثال، هوایپیما) مزایایی را ارائه می‌دهند. ۴. اندازه کوچک. کابل‌های فیبر نوری عملی از نظر قطر بسیار کمتر از کابل‌های الکتریکی هستند و بنابراین می‌توانند در فضای نسبتاً کوچکی قرار بگیرند. ۵. امنیت. کابل‌های فیبر نوری را نمی‌توان به‌آسانی به‌اندازه کابل‌های الکتریکی «بهره‌گیری» کرد و سیگنال‌هایی را منتشر نمی‌کنند که بتوان آنها را برای اهداف شنود دریافت کرد. نیاز کمتری به تکنیک‌های رمزگذاری پیچیده و گران قیمت وجود دارد. ۶. مصوبیت تداخلی. کابل‌های فیبر نوری مانند برخی از کابل‌های الکتریکی، سیگنال‌ها را منتشر نمی‌کنند و باعث ایجاد تداخل در سایر کابل‌ها می‌شوند. آن‌ها در برابر تداخل منابع دیگر مصون هستند. ۷. ایمنی بیشتر. کابل‌های فیبر نوری الکتریکی حمل نمی‌کنند. بنابراین، خطر شوک وجود ندارد. آنها همچنین عایق هستند و بنابراین مانند کابل‌های الکتریکی در برابر صاعقه حساس نیستند. آنها را می‌توان در محیط‌های خورنده و یا انفجاری بدون خطر جرقه استفاده کرد.

و شکنندگی آن کار با آن را سخت می‌کند. ابزارهای ویژه و گران قیمت و ابزار آزمایش مورد نیاز است.

۳.۱۹ کابل‌های فیبر نوری

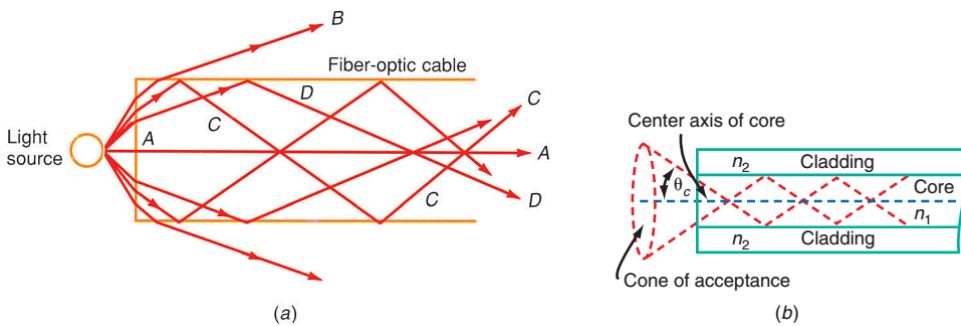
یک کابل فیبر نوری^۵، کابل نازک شیشه‌ای یا پلاستیکی است که به صورت "لوله" سبک عمل می‌کند. این در واقع یک لوله توتالی نیست که نور را حمل می‌کند، بلکه یک رشته بلند و نازک از الیاف شیشه یا پلاستیک است. کابل‌های فیبر دارای مقطع دایره‌ای با قطر تنها کسری از اینچ هستند. برخی از کابل‌های فیبر نوری به‌اندازه یک موی انسان هستند. یک منبع نور در انتهای فیبر قرار می‌گیرد و نور

^۵Fiber Optic Cable

از آن عبور می‌کند و از انتهای دیگر کابل خارج می‌شود. نحوه انتشار نور از طریق فیبر به قوانین نوری بستگی دارد

زاویه بحرانی

زاویه پرتو نور B به گونه‌ای است که زاویه تابش آن نسبت به زاویه بحرانی^۴ کمتر است، و بنابراین شکست رخ می‌دهد. موج نور از فیبر عبور می‌کند و با زاویه متفاوتی از لبه به هوا خارج می‌شود. زاویه تابش پرتوهای نور C و D بیشتر از زاویه بحرانی است. بنابراین، انعکاس داخلی کامل (انعکاس کلی)^۵ صورت می‌گیرد و پرتوهای نور از سطح کابل فیبر منعکس می‌شوند. پرتو نور بین سطوح به جلو و عقب باز می‌گردد تا در انتهای دیگر کابل خارج شود.



شکل ۱۱.۱۹: (الف) پرتوهای نور در یک کابل فیبر نوری. (ب) زاویه بحرانی و مخروط پذیرش.

هنگامی که پرتو نور از سطح داخلی منعکس می‌شود، زاویه تابش برابر با زاویه بازتاب است. بهدلیل این اصل، پرتوهای نوری که از زوایای مختلف وارد می‌شوند، مسیرهای مختلفی را از طریق کابل طی می‌کنند و برخی از مسیرها طولانی‌تر از مسیرهای دیگر خواهند بود. بنابراین، اگر چندین پرتو نور وارد انتهای کابل شود، مسیرهای مختلفی را طی می‌کند و بنابراین برخی زودتر و برخی دیرتر از دیگران خارج می‌شوند.

در عمل منبع نور طوری قرار می‌گیرد که زاویه به گونه‌ای باشد که پرتو نور مستقیماً از محور مرکزی کابل عبور کند تا زوایای انعکاس زیاد باشد. این از بین رفتن نور بهدلیل شکست در رابط جلوگیری می‌کند. بهدلیل انعکاس کامل داخلی، پرتو نور در فیبر حتی اگر خم شده باشد به انتشار خود ادامه می‌دهد. با خمیدگی‌های طولانی مدت، نور در داخل کابل باقی می‌ماند.

همانطور که در شکل (۹.۱۹)(ب) نشان داده شده است، هسته فیبر دارای ضربی شکست بالاتری نسبت به روکشی است که هسته را احاطه کرده است. نور با تعداد بی‌نهایت زاویه وارد هسته می‌شود اما فقط آن پرتوهایی که با زاویه کمتر از زاویه بحرانی وارد هسته می‌شوند در واقع از هسته عبور می‌کنند. این پرتوهای نور هنگام عبور از کابل از رابط بین هسته و روکش منعکس می‌شوند.

شکل (۹.۱۹)(ب) زاویه بحرانی کابل^۶ را نشان می‌دهد که گاهی به عنوان زاویه پذیرش θ_A نیز نامیده می‌شود. این زاویه بین خط محور مرکزی هسته و خطی که حداقل نقطه‌ای را که نور ورودی به کابل تحت انعکاس کامل داخلی قرار می‌گیرد را تعیین می‌کند، تشکیل می‌شود. اگر پرتو نور وارد شده به انتهای کابل دارای زاویه کمتر از زاویه بحرانی باشد، به صورت داخلی منعکس شده و در کابل

^۴Critical Angle

^۵Total Internal Reflection

منتشر می‌شود.

روزنۀ عددی: به زوایای شکل (۱۱.۱۹) (ب) مراجعه کنید. بیرون انتهای کابل چیزی است که مخروط پذیرش نامیده می‌شود. با زاویه بحرانی تعریف می‌شود. هر پرتو نوری خارج از مخروط به صورت داخلی منعکس نمی‌شود و به پایین کابل منتقل نمی‌شود.

مخروط پذیرش روزنۀ عددی^۱ (NA) کابل را مشخص می‌کند. این عددی کوچکتر از یک است که نشان دهنده محدوده زوایایی است که یک کابل خاص روی آن کار خواهد کرد. NA را می‌توان با عبارت زیر محاسبه کرد

$$NA = \sin \theta_c$$

برای مثال، اگر روزنۀ عددی برابر 20° باشد، NA خواهد بود:

$$NA = \sin 20^\circ = 0,342$$

همچنین NA را می‌توان از ضریب‌های شکست هسته و روکش تعیین کرد:

$$NA = \sqrt{n_1 - n_2}$$

اگر $n_1 = 1/5$ و $n_2 = 1/4$ باشد، روزنۀ عددی برابر است با:

$$NA = \sqrt{(1/5)^2 - (1/4)^2} = \sqrt{0,29} = 0,5385$$

روزنۀ عددی برای کابل‌های معمولی $0,29$ و $0,26$ است.

مثال ۱-۱۹

دیافراگم عددی کابل فیبر نوری $0,29$ است. زاویه بحرانی چقدر است؟

$$NA = \sin \theta_c$$

$$0,29 = \sin \theta_c$$

$$\theta_c = \sin^{-1} 0,29 = 16,86^\circ$$

ساخت کابل فیبر نوری

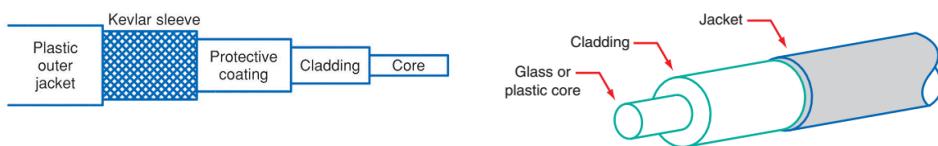
کابل‌های فیبر نوری در اندازه‌ها، شکل‌ها و انواع مختلفی وجود دارند. ساده‌ترین کابل شامل یک رشته فیبر است. یک کابل پیچیده از فیبرهای متعدد با لایه‌های مختلف و عناصر دیگر تشکیل شده است. بخشی از کابل فیبر نوری که نور را حمل می‌کند از شیشه یا پلاستیک ساخته شده است. نام دیگر شیشه سیلیس است. ویژگی‌های نوری شیشه نسبت به پلاستیک برتر است. با این حال، شیشه بسیار گران‌تر و شکننده‌تر از پلاستیک است. اگرچه پلاستیک ارزان‌تر و انعطاف‌پذیرتر است، اما کاهش نور آن بیشتر است. برای یک شدت معین، نور در شیشه مسافت بیشتری را نسبت به پلاستیک طی می‌کند.

^۱Numerical Aperture

خوب است بدانید که:

کابل‌های فیبر نوری پلاستیکی ارزان‌تر و انعطاف‌پذیرتر از شیشه هستند، اما ویژگی‌های نوری شیشه برتر هستند.

ساخت یک کابل فیبر نوری در شکل (۱۲.۱۹) (ب) نشان داده شده است. فیبر نوری شیشه‌ای یا پلاستیکی درون یک روکش خارجی قرار دارد. ضریب شکست روکش خارجی N_2 کمی کمتر از ضریب شکست N_1 هسته است. مقادیر معمول برای N_1 و N_2 به ترتیب $1/5$ و $1/4$ هستند. روکش روکش یک روکش پلاستیکی مشابه عایق بیرونی کابل الکتریکی قرار دارد. فیبر، که هسته نامیده می‌شود، معمولاً



شکل ۱۳.۱۹: لایه‌های معمولی در یک کابل فیبر

شکل ۱۲.۱۹: ساخت اولیه یک کابل فیبر نوری.

توسط یک روکش محافظ احاطه شده است (شکل ۱۲.۱۹). روکش نیز از شیشه یا پلاستیک ساخته شده است اما ضریب شکست کمتری دارد. این تضمین می‌کند که سطح مشترک مناسب به‌دست می‌آید به‌طوری که امواج نور در هسته باقی می‌مانند. روکش فلزی علاوه بر محافظت از هسته فیبر در برابر خط و خش، استحکام می‌بخشد. برخی از کابل‌های فیبر نوری دارای هسته شیشه‌ای با روکش شیشه‌ای هستند. سایر کابل‌ها دارای یک هسته پلاستیکی با روکش پلاستیکی هستند. آرایش دیگر، کابل سیلیکا با روکش پلاستیکی^۹ (PCS)، یک هسته شیشه‌ای با روکش پلاستیکی است.

معمولًاً تقسیم بین هسته و روکش قابل مشاهده نیست. آنها معمولاً از همان نوع مواد ساخته می‌شوند. روکش معمولاً یک ژاکت پلاستیکی مشابه عایق بیرونی کابل الکتریکی قرار دارد.

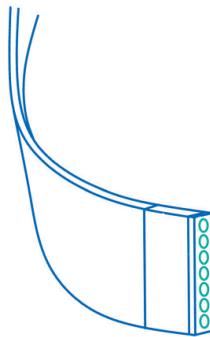
کابل فیبر نوری علاوه بر هسته، روکش آن و یک ژاکت، معمولاً شامل یک یا چند عنصر برای تشکیل یک کابل کامل است. ساده‌ترین کابل هسته با روکش آن است که توسط یک ژاکت محافظ احاطه شده است. مانند کابل‌های برق، این ژاکت بیرونی یا عایق از نوعی پلاستیک، معمولاً پلی‌اتیلن، پلی اورتان یا پلی‌وینیل کلراید (PVC) ساخته شده است. هدف اصلی این ژاکت بیرونی محافظت از هسته و روکش در برابر آسیب است. معمولاً کابل‌های فیبر نوری در زیر زمین دفن می‌شوند یا بین تکیه گاه‌ها قرار می‌گیرند. بنابراین، الیاف باید از رطوبت، کثیفی، تغییرات دما و سایر شرایط محافظت شوند. ژاکت بیرونی همچنین برای به‌حداقل رساندن آسیب‌های فیزیکی مانند بریدگی، خراش و له شدن کمک می‌کند.

کابل‌های پیچیده‌تر ممکن است حاوی دو یا چند عنصر فیبر نوری باشند. کابل‌های معمولی با ۲، ۶، ۱۲ و ۲۴ هسته فیبر نوری در دسترس هستند.

انواع مختلفی از پیکربندی کابل وجود دارد. بسیاری از آنها چندین لایه ژاکت محافظ دارند. برخی از کابل‌ها دارای یک عنصر مقاومت یا کشن انعطاف‌پذیر هستند که به‌حداقل رساندن آسیب به‌عنصر فیبر نوری در هنگام کشیدن کابل یا این که باید وزن خود را تحمل کند، کمک می‌کند.

⁹Plastic Clad Silica (PCS)

به طور معمول، این عضو استحکام از یک فولاد رشته‌ای یا نخ خاصی به نام کولار^{۱۰} تشکیل شده است که به دلیل عایق بودن، قوی است و بر فولاد ترجیح داده می‌شود. در برخی از کابل‌ها، کولار یک آستین یا ژاکت محافظ روی روکش تشکیل می‌دهد. بیشتر روکش‌ها برای استحکام بیشتر و مقاومت در برابر رطوبت و آسیب با یک پوشش محافظ شفاف پوشانده شده‌اند (شکل ۱۳.۱۹).



شکل ۱۴.۱۹: کابل نواری مسطح چند هسته‌ای.

کابل‌های فیبر نوری نیز به صورت نوار مسطح موجود هستند (شکل ۱۴.۱۹). کابل نواری تخت با چندین فیبر به خوبی کار می‌کند. دست زدن و شناسایی الیاف فردی آسان است. کابل تخت همچنین برای برخی از کاربردها از نظر فضا کارآمدتر است.

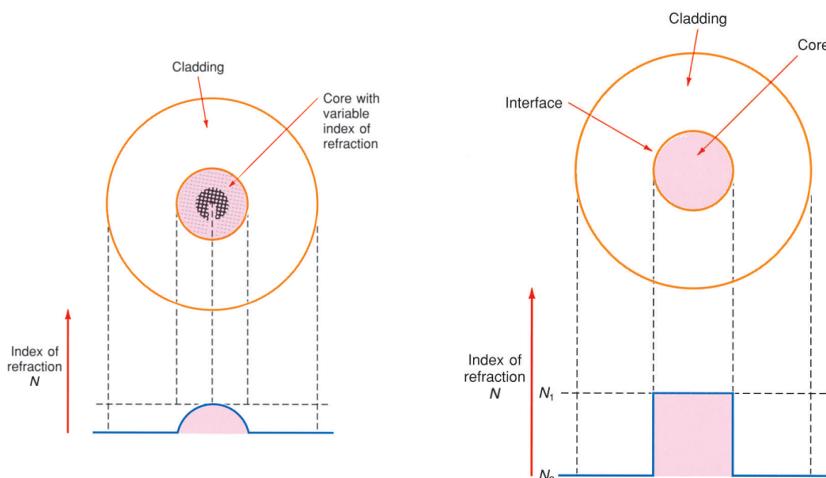
انواع کابل فیبر نوری

دو روش اساسی برای طبقه‌بندی کابل‌های فیبر نوری وجود دارد: روش اول با ضربه شکست است که در سطح مقطع کابل متفاوت است. روش دوم طبقه‌بندی به روش مودی (mode) است که به مسیرهای مختلفی اشاره دارد که پرتوهای نور می‌توانند در عبور از فیبر طی کنند. معمولاً این دو روش طبقه‌بندی برای تعریف انواع کابل با هم ترکیب می‌شوند.

کابل با ضربه شکست پله‌ای: دو روش برای تعریف ضربه شکست در کابل، ضربه شکست پله‌ای و ضربه شکست تدریجی درجه بندی شده است. ضربه شکست پله‌ای به این واقعیت اشاره دارد که یک مرحله کاملاً مشخص در ضربه شکست وجود دارد که در آن هسته فیبر و سطح روکش وجود دارد. به این معنی که هسته دارای یک ضربه شکست ثابت ثابت N_1 و روکش دارای ضربه شکست ثابت دیگری از N_2 است (شکل ۱۵.۱۹). هنگامی که این دو با هم می‌آیند، یک مرحله متمایز وجود دارد. اگر بخواهید منحنی را ترسیم کنید که ضربه شکست را نشان دهد، در زیرا شکل سطح مقطع کابل به صورت عمودی از چپ به راست تغییر می‌کند، در هنگام مواجهه با هسته شاهد افزایش شدید ضربه شکست و سپس کاهش شدید ضربه شکست در هنگام مواجهه با روکش خواهد بود.

کابل با ضربه شکست تدریجی: نوع دیگر کابل دارای ضربه شکست تدریجی شده است. در اینجا، ضربه شکست هسته ثابت نیست. در عوض، به‌آرامی و به طور مداوم در قطر هسته تغییر می‌کند (شکل ۱۶.۱۹). با نزدیک‌تر شدن به مرکز هسته، ضربه شکست به تدریج افزایش می‌یابد و در مرکز به‌اوج می‌رسد و سپس با رسیدن به لبه خارجی دیگر هسته کاهش می‌یابد. ضربه شکست روکش ثابت است.

^{۱۰} Kevlar



شکل ۱۶.۱۹: سطح مقطع کابل با ضریب شکست

شکل ۱۵.۱۹: سطح مقطع کابل با ضریب شکست تدریجی پلهای.

کابل مودی: مود به تعداد مسیرهای پرتوهای نور در کابل اشاره دارد. دو طبقه بندی وجود دارد: تک مودی و چند مودی. در تک مودی، نور یک مسیر واحد را از طریق هسته دنبال می‌کند. در حالت چند مودی، نور مسیرهای زیادی را طی می‌کند.

هر نوع کابل فیبر نوری از یکی از این روش‌ها برای رتبه بندی ضریب شکست یا مود استفاده می‌کند. در عمل، سه نوع پرکاربرد کابل فیبر نوری وجود دارد: ضریب شکست پلهای چند مودی، ضریب شکست پلهای تک مودی و ضریب شکست چند مودی تدریجی.

کابل با ضریب شکست پلهای چند مودی: کابل فیبر با ضریب شکست پلهای چند مودی احتمالاً رایج‌ترین و پرکاربردترین نوع آن است. همچنین ساخت آن ساده‌ترین و در نتیجه کم هزینه‌ترین است. به طور گسترده‌ای برای فواصل کوتاه تا متوسط در فرکانس‌های پالسی نسبتاً پایین استفاده می‌شود.

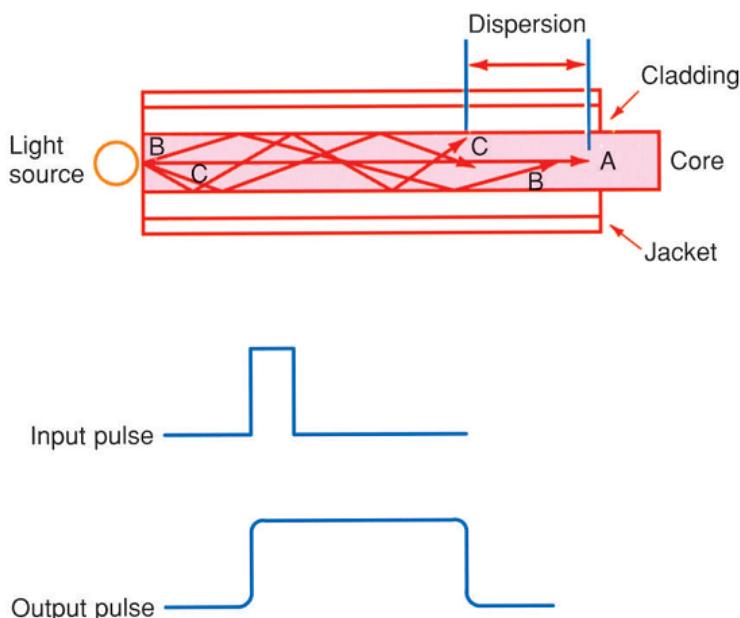
مزیت اصلی فیبر ضریب شکست پلهای چند مودی اندازه بزرگ آن است. قطر هسته معمولی در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر است. چنین هسته‌هایی با قطر زیاد در جمع آوری نور و انتقال موثر آن عالی هستند. این بدان معنی است که می‌توان از یک منبع نور ارزان قیمت مانند LED برای تولید پالس‌های نور استفاده کرد. نور قبل از خروج، صدها یا حتی هزاران مسیر را در هسته طی می‌کند (شکل ۱۱.۱۹). بدلیل طول‌های مختلف این مسیرها، برخی از پرتوهای نور نسبت به سایرین طول می‌کشد تا به انتهای دیگر کابل برسد. مشکل این است که پالس‌های نور را کش می‌دهد. این پاشندگی^{۱۱} نامیده می‌شود.

^{۱۱}Dispersion

خوب است بدانید که:

کابل فیبر نوری با ضریب شکست پلهای چند مودی به طور گسترده در فواصل کوتاه تا متوسط در فرکانس‌های پالسی نسبتاً پایین استفاده می‌شود. این کابل همچنین ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین کابل فیبر نوری است.

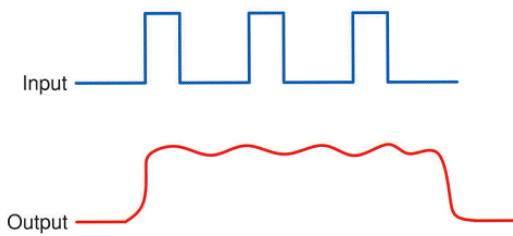
پاشندگی: پاشندگی از اعوجاج سیگنال نوری به دلیل ویژگی‌های کابل ناشی می‌شود. به عنوان



شکل ۱۷.۱۹: کابل فیبر نوری با ضریب شکست پلهای چند مودی.

مثال، در شکل (۱۷.۱۹)، یک پالس نور کوتاه توسط منبع به‌انتهای کابل اعمال می‌شود. پرتوهای نور از منبع در مسیرهای متعددی حرکت می‌کنند. در انتهای کابل، پرتوهایی که کمترین مسافت را طی می‌کنند اول به‌انتهای می‌رسند. پرتوهای دیگر بعداً شروع به رسیدن به‌انتهای کابل می‌کنند، تا زمانی که پرتو نور با طولانی‌ترین مسیر در نهایت به‌انتهای کابل برسد و پالس را به‌پایان برساند. در شکل (۱۷.۱۹)، اشعه A اول به‌انتهای رسیده، سپس B و سپس C می‌رسند. نتیجه یک پالس در انتهای دیگر کابل است که به‌دلیل تضعیف نور در کابل، دامنه آن کمتر است. به‌دلیل زمان‌های مختلف رسیدن پرتوهای مختلف نور، مدت زمان افزایش یافت. به‌این کشش پالس پاشندگی موی گفته می‌شود.

از آنجایی که پالس کشیده شده است، پالس‌ها در ورودی نمی‌توانند با سرعتی بیشتر از مدت زمان پالس خروجی رخ دهند. در غیر این صورت، پالس‌ها اساساً ادغام می‌شوند (شکل ۱۸.۱۹). در خروجی، یک پالس طولانی رخ می‌دهد و از سه پالس مجزا که در ابتدا ارسال شده‌اند قابل تشخیص نیست. یعنی اطلاعات نادرستی دریافت خواهد شد. تنها راه درمان این مشکل کاهش فواصل تکرار پالس یا دفعات پالس است. هنگامی که این کار انجام می‌شود، عملکرد مناسب رخ می‌دهد. اما با پالس‌هایی با فرکانس پایین‌تر، اطلاعات کمتری قابل مدیریت است. نکته کلیدی در اینجا این است که



شکل ۱۸.۱۹: اثر پاشندگی مودی بر پالس‌هایی که در کابل ضریب شکست پله‌ای چند مودی خیلی سریع رخ می‌دهند.

نوع کابل انتخابی باید دارای پاشندگی مودی بهاندازه کافی کم باشد تا بتواند فرکانس بالایی کار کرد و مورد نظر را انجام دهد.

نوع دیگری از پاشندگی، پاشندگی رنگی است که باعث کشش پالس نیز می‌شود. پاشندگی رنگی زمانی اتفاق می‌افتد که از طول موج‌های چندگانه نور استفاده می‌شود، مانند سیستم‌های مالتی پلکس با تقسیم طول موج متراکم^{۱۲} (DWDM). از آنجایی که فرکانس‌های نور بالاتر سریعتر از فرکانس‌های نور پایین‌تر حرکت می‌کنند، کشش پالس رخ می‌دهد. این نوع پاشندگی در سرعت‌های داده بالای ۱۰ گیگابیت بر ثانیه در دسرسازترین است. بخش‌های فیبر یا فیلترهای مخصوص برای اصلاح آن استفاده می‌شود.

یک نوع دیگر از کشش پالس ناشی از پاشندگی مود قطبش^{۱۳} (PMD) است. این پدیده ای است که در فیبر تک مودی^{۱۴} (SMF) رخ می‌دهد. SMF اساساً از دو قطبش متعامد (در زاویه ۹۰ درجه) در طول کابل پشتیبانی می‌کند. از آنجایی که کابل یک استوانه کامل نیست و به دلیل اعوجاج کابل ناشی از خمس، پیچش و تنش‌های دیگر، پالس‌هایی با جهت قطبش متفاوت می‌توانند با سرعت‌های متفاوتی در قسمت‌های مختلف کابل حرکت کنند. جهت‌گیری کانکتورها و اتصالات نیز این اثر را ایجاد کرده و سیگنال را مخدوش می‌کند. رایج‌ترین اثر دو پالس تولید شده برای هر پالس ارسالی است. PMD عموماً در پیکوثانیه اندازه گیری می‌شود، بنابراین تأثیری اساسی بر پالس‌ها در نرخ‌های کمتر از ۵ گیگابیت بر ثانیه ندارد. در ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و بالاتر، PMD به ویژه در WAN و MAN‌های دوربرد قابل توجه است. همانند پاشندگی رنگی، کابل مخصوص و جبران کننده‌های فیزیکی برای اصلاح آن موجود است.

یکی از راه‌های جدیدتر و بهتر برای مقابله با پاشندگی استفاده از جبران پاشندگی الکترونیکی^{۱۵} (EDC) است. EDC از تکنیک‌های یکسان‌سازی برای تنظیم شکل موج دریافتی برای جبران هر نوع پاشندگی استفاده می‌کند. اکولایزرها را می‌توان برای تصحیح پاسخ فرکانسی مدار ساخت، اما همچنین می‌تواند برای اصلاح اختلاف فاز و دامنه طراحی شود. اکثر اکولایزرها مدارهای ثابتی هستند و بنابراین فقط برای مشکلات یک نوع درست می‌شوند. با این حال، اکولایزرهای تطبیقی اصلاح را برای سرعت‌ها و فواصل مختلف تنظیم می‌کنند. اکولایزرهای تطبیقی پس از یک دوره آموزشی کوتاه، خود را به پیوند فیبری که به آن متصل هستند تنظیم می‌کنند، اطلاعاتی در مورد نوع و درجه

^{۱۲}Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

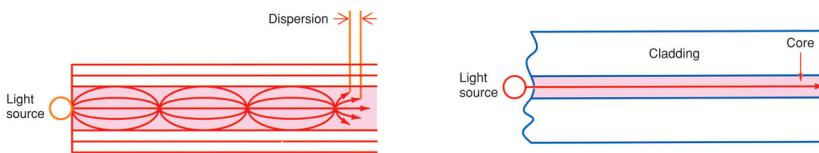
^{۱۳}Polarization Mode Dispersion (PMD)

^{۱۴}Single Mode Fiber (SMF)

^{۱۵}Electronic Dispersion Compensation (EDC)

اعوجاج تولید شده در اختیار آنها قرار می‌دهد. سپس اکولایزر انرژی را به سیگنال در دو یا چند بازه پالس قبلی اضافه یا کم می‌کند تا پاشندگی را تصحیح کند.

یک دستگاه جبران پاشندگی الکترونیکی معمولاً در خروجی سریال گیرنده مستقر می‌شود. اکولایزر در اصل یک فیلتر DSP پاسخ ضربه محدود^{۱۶} (FIR) است. اکولایزر از سرهای بازخورد و بازخورد استفاده می‌کند که ضرایب آنها به طور خودکار قابل تنظیم است. سیگنال دریافتی توسط یک مبدل A/D بسیار سریع نمونه برداری می‌شود و نمونه‌ها در یک تراشه DSP پردازش می‌شوند. تراشه DSP ضرایب را محاسبه می‌کند که به طور فعال روی اکولایزر اعمال می‌شود. اکولایزر در واقع عملکرد معکوس کابل پاشنده را انجام می‌دهد و در نتیجه مشکل را فرستنده‌های نوری ۱۰ گیگابیت بر ثانیه از EDC استفاده می‌کند. اساساً برای را که یک فرستنده نوری معین می‌تواند پوشش دهد دو برابر می‌کند.



شکل ۱۹.۱۹: کابل با ضریب شکست پله‌ای تک مودی (شکل ۲۰.۱۹)؛ کابل با ضریب شکست تدریجی چند مودی.

کابل با ضریب شکست پله‌ای تک مودی: کابل فیبر با ضریب شکست پله‌ای تک مودی اساساً پاشندگی مودی را با کوچک کردن هسته آنقدر حذف می‌کند که تعداد کل مودها یا مسیرهای عبور از هسته به حداقل برسد (شکل ۱۹.۱۹). اندازه هسته معمولی ۲ تا ۱۵ میکرومتر است. تنها مسیری که از هسته می‌گذرد پایین مرکز است. با حداقل انكسار، کشش پالس کمی رخ می‌دهد. پالس خروجی اساساً مدت زمان مشابهی با پالس ورودی دارد.

فیبرهای با ضریب شکست پله‌ای تک مودی تا حد زیادی بهترین هستند زیرا نرخ تکرار پالس می‌تواند بالا باشد و حداقل مقدار اطلاعات را می‌توان حمل کرد. برای انتقال بسیار دور و حداقل محتوای اطلاعاتی، باید از کابل‌های فیبر نوری با ضریب شکست پله‌ای تک مودی استفاده شود.

مشکل اصلی این نوع کابل این است که بسیار کوچک، ساخت آن دشوار و در نتیجه بسیار گران است. همچنین رسیدگی به آن دشوارتر است. اتصال و ایجاد اتصالات سخت‌تر است. در نهایت، برای عملکرد مناسب، باید از یک منبع نور گران قیمت و فوق العاده مانند لیزر استفاده شود. با این حال، برای مسافت‌های طولانی، این نوع کابل ترجیح داده می‌شود.

کابل با ضریب شکست تدریجی چند مودی: کابل فیبر ضریب شکست تدریجی چند مودی دارای چندین مود یا مسیر انتقال از طریق کابل است، اما آنها بسیار منظم‌تر و قابل پیش‌بینی تر هستند. شکل (۲۰.۱۹) مسیرهای معمولی پرتوهای نور را نشان می‌دهد. بهدلیل متغیر پیوسته ضریب شکست در سراسر هسته، پرتوهای نور به آرامی خم می‌شوند و به طور مکرر در نقاطی در طول کابل همگرا می‌شوند. پرتوهای نور نزدیک به لبه هسته مسیر طولانی‌تری را طی می‌کنند اما سریعتر حرکت می‌کنند زیرا ضریب شکست کمتر است. همه مودها یا مسیرهای نور تمایل دارند به یک نقطه به طور همزمان برسند. نتیجه پاشندگی مودی کمتر است. در نتیجه می‌توان از این کابل با نرخ پالس

^{۱۶}Finite Impulse Response (FIR)

بسیار بالا استفاده کرد و بنابراین حجم قابل توجهی از اطلاعات را می‌توان حمل کرد. این نوع کابل همچنین از نظر قطر بسیار گستردگه‌تر است و اندازه هسته آن در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است. بنابراین، پیوند و اتصال آسان‌تر است و می‌توان از منابع نوری ارزان‌تر و با شدت کمتر استفاده کرد. محبوب‌ترین نوع ضریب شکست تدریجی چند مودی OM1 تا OM4 است. OM به معنای چند مودی نوری است. این انواع توسط TIA/EIA استاندارد شده‌اند و در کاربردهایی با بردهای کوتاه‌تر تا حدود چند هزار فوت، مانند یک محوطه کوچک یا یک ساختمان چند متري استفاده می‌شوند. کابل‌های OM می‌توانند رایج‌ترین نرخ‌های داده را از ۱ گیگابیت بر ثانیه و ۱۰ گیگابیت بر ثانیه تا ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه کنترل کنند. هر دو منبع لیزر ساطع کننده سطح حفره عمودی^{۱۷} (VCSEL) و LED در طول موج‌های ۸۵۰ نانومتر و ۱۳۰۰ نانومتر رایج هستند.

به‌دلیل پاشندگی، سرعت داده‌های فیبر OM در واحد طول محدود است. اندازه‌گیری این مشخصه پهنهای باند مودی موثر^{۱۸} (EMB) است. پهنهای باند یک فیبر OM نقطه فرکانسی است که در آن سطح توان نوری نسبت به توان فرکانس صفر به $-2dB$ کاهش می‌یابد. EMB به عنوان پهنهای باند در واحد طول، معمولاً یک کیلومتر بیان می‌شود. برای مثال ۵۰۰ مگاهرتز در کیلومتر است. یک مگاهرتز در کیلومتر تقریباً به $0.7/0.8$ مگابیت در ثانیه سرعت داده انتقال داده می‌شود. بنابراین، یک EMB ۵۰۰ مگاهرتز در کیلومتر حداقل سرعت داده ۳۵۰ تا ۴۰۰ مگابیت بر ثانیه را امکان پذیر می‌کند.

OM1 • فیبر ۵۰/۱۲۵ با $62.5/125$ میکرومتر است. با اترنت ۱۰۰ مگابیت در ثانیه ۲۰۰۰ متر یا اترنت ۲۰۰۰ متر با ۱ گیگابیت بر ثانیه 100BASE-SX ۱۰۰۰BASE-FX می‌شود. می‌توان از آن با اترنت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه 10GBASE-SR ۳۳ متر استفاده کرد.

OM2 • فیبر ۵۰/۱۲۵ با $50/125$ میکرومتر است. با اترنت ۱۰۰ مگابیت در ثانیه ۲۰۰۰ متر، اترنت ۱ گیگابیت در ثانیه تا ۵۵۰ متر و اترنت ۱۰ گیگابیت در ثانیه تا ۸۲ متر استفاده می‌شود.

OM3 • فیبر ۵۰/۱۲۵ با یک EMB در ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مگاهرتز در کیلومتر است. همچنین با اترنت ۱۰۰ مگاهرتز تا ۲۰۰۰ متر، اترنت ۱ گیگابیت در ثانیه تا ۵۵۰ متر و اترنت ۱۰ گیگابیت در ثانیه تا ۳۰۰ متر کار می‌کند.

OM4 • همچنین دارای فیبر ۵۰/۱۲۵ با یک EMB در ۳۵۰۰ تا ۴۷۰۰ مگاهرتز در کیلومتر است. همچنین با اترنت ۱۰۰ مگاهرتز تا ۲۰۰۰ متر، اترنت ۱ گیگابیت در ثانیه تا ۱۰۰۰ متر و اترنت ۱۰ گیگابیت در ثانیه تا ۵۵۰ متر کار می‌کند.

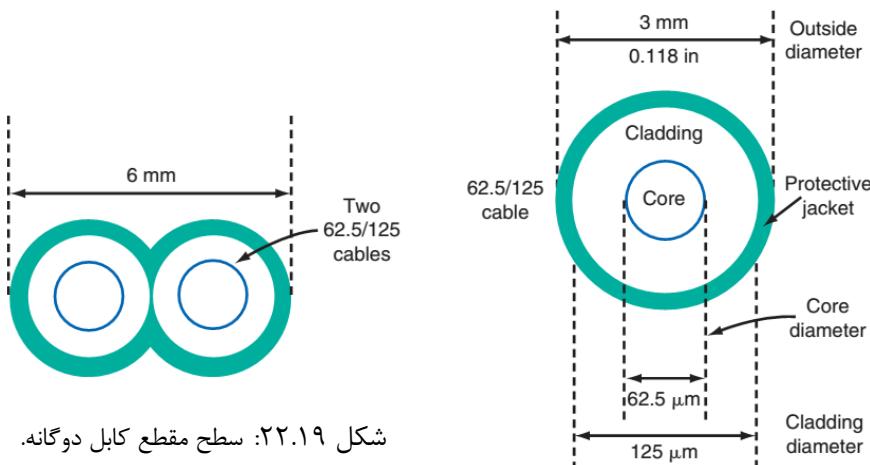
هر دو OM3 و OM4 همچنین می‌توانند با اترنت ۴۰ گیگابیت بر ثانیه یا ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه، تا ۱۰۰ متر با OM3 یا تا ۱۵۰ متر با OM4 استفاده شوند.

مشخصات کابل فیبر نوری

مهمنترین مشخصات یک کابل فیبر نوری اندازه، تضعیف و پهنهای باند است. NA نیز گاهی اوقات داده می‌شود، اگرچه این مشخصات تنها زمانی مورد نیاز است که اتصال دهنده‌ها در حال طراحی هستند - یک اتفاق نادر، زیرا اتصال دهنده‌های استاندارد در دسترس هستند.

^{۱۷}Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)

^{۱۸}Effective Modal Bandwidth (EMB)



شکل ۲۲.۱۹: سطح مقطع کابل دوگانه.

شکل ۲۱.۱۹: ابعاد کابل فیبر نوری.

اندازه کابل: کابل فیبر نوری در اندازه‌ها و پیکربندی‌های مختلف همانطور که قبل ذکر شد وجود دارد. اندازه معمولاً به صورت قطر هسته مشخص می‌شود و روکش فلزی بر حسب میکرومتر (μm) داده می‌شود که در آن یک میکرومتر یک میلیونیم متر است. به عنوان مثال، یک اندازه معمول برای فیبر چند مودی 62.5/125 است، که در آن ۶۲.۵ قطر هسته و ۱۲۵ قطر روکش، هر دو بر حسب میکرومتر است (شکل ۲۱.۱۹). یک روکش پلاستیکی PVC یا پلی یورتان روی روکش بیرونی، قطر خارجی کلی حدود ۳ میلی متر یا ۱۱۸٪ اینچ می‌دهد. سایر اندازه‌های کابل رایج برای فیبر چند مودی 50/125 و 100/140 هستند، اگرچه 62.5/125 به مراتب زیاد استفاده شده. اندازه‌های معمول برای فیبرهای تک مودی 9/125 یا 8.3/125 میکرومتر است.

کابل‌ها در دو نوع رایج سیم‌پلکس و دوبلکس وجود دارند. همانطور که در شکل (۲۱.۱۹) نشان داده شده است، کابل سیم‌پلکس، همانطور که از نام آن پیداست، فقط یک کابل فیبر تک هسته‌ای است. در یک کابل دوبلکس معمولی، همانطور که در شکل (۲۲.۱۹) نشان داده شده است، دو کابل در یک روکش خارجی واحد ترکیب شده‌اند. کابل‌ها با ۴، ۱۰ و ۱۲ فیبر موازی در دسترس هستند.

تضعیف: مهمترین ویژگی کابل فیبر نوری تضعیف آن است. تضعیف به از دست دادن انرژی نور اشاره دارد که پالس نور از یک سر کابل به انتهای دیگر منتقل می‌شود. پالس نور با دامنه یا درخشندگی خاص به یک سر کابل اعمال می‌شود، اما پالس خروجی نور در انتهای دیگر کابل از نظر دامنه بسیار کمتر خواهد بود. شدت نور در خروجی به دلیل تلفات مختلف در کابل کمتر است. دلیل اصلی کاهش شدت نور در طول کابل، جذب^{۱۹}، پراکندگی^{۲۰} و پاشندگی^{۲۱} نور است.

جذب بهنحوه تبدیل انرژی نور به گرما در مواد هسته به دلیل ناخالصی شیشه یا پلاستیک اشاره دارد. این پدیده مشابه مقاومت الکتریکی است. پاشندگی به نور از دست رفته به دلیل ورود امواج نور با زاویه نامناسب و از بین رفتن در روکش به دلیل شکست اطلاق می‌شود. پاشندگی همانطور که

^{۱۹}Absorption^{۲۰}Scattering^{۲۱}Dispersion

گفته شد به کشش پالس ناشی از مسیرهای مختلف کابل اشاره دارد. اگرچه هیچ نوری در پاشندگی از بین نمی‌رود، اما خروجی همچنان از نظر دامنه کمتر از ورودی است، اگرچه طول پالس نور در مدت زمان افزایش یافته است.

میزان تضعیف با نوع کابل و اندازه آن متفاوت است. شیشه نسبت به پلاستیک میرایی کمتری دارد. هسته‌های پهن‌تر نسبت به هسته‌های باریک‌تر از یک ماده، میرایی کمتری دارند. هسته‌های پهن‌تر جذب کمتر و پاشندگی بسیار بیشتری دارند. هسته‌های پهن‌تر نیز معمولاً پلاستیکی هستند که ظرفیت جذب بیشتری نسبت به شیشه دارند.

مهمنتر از آن، میرایی (تضعیف) مستقیماً با طول کابل متناسب است. بدیهی است که هر چه نور باید مسافت بیشتری را طی کند، تلفات ناشی از جذب، پراکندگی و پاشندگی بیشتر است.

تضعیف یک کابل فیبر نوری بر حسب دسی‌بل (dB) در واحد طول بیان می‌شود. استاندارد دسی‌بل در هر کیلومتر است. رابطه استاندارد دسی‌بل زیر استفاده می‌شود

$$dB = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

که در آن P_{out} توان خروجی و P_{in} قدرت ورودی است. از آنجایی که شدت نور نوعی تابش



Loss, dB	Power Output, %
1	79
2	63
3	50
4	40
5	31
6	25
7	20
8	14
9	12
10	10
20	1
30	0.1
40	0.01
50	0.001

شکل ۲۳.۱۹: جدول تلفات بر حسب دسی‌بل.
دستگاه اپتومتر برای اندازه‌گیری توان خروجی دیودهای لیزر، LEDها و کابل‌های فیبر نوری در محدوده ۲۰ تا ۶۰ دسی‌بل.

الکترومغناطیسی است، معمولاً در واحدهای توان، وات یا بخشی از آن بیان و اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۲۳.۱۹) درصد توان خروجی را برای تلفات دسی‌بل مختلف نشان می‌دهد. به عنوان مثال، ۳ دسی‌بل نشان دهنده نیم توان است. به عبارت دیگر، اتلاف ۳ دسی‌بل بهاین معنی است که تنها ۵۰ درصد ورودی در خروجی ظاهر می‌شود. ۵۰ درصد دیگر توان در کابل تلف می‌شود. هر چه عدد دسی‌بل بیشتر باشد، تضعیف و تلفات بیشتر است. افت ۳۰ دسی‌بل بهاین معنی است که تنها یک هزارم توان ورودی در پایان ظاهر می‌شود. مشخصات استاندارد کابل فیبر نوری، میرایی است که بر حسب دسی‌بل در کیلومتر (dB/km) بیان می‌شود. درجه میرایی کابل‌های فیبر نوری در محدوده قابل توجهی متفاوت است. بهترین کابل‌های

شاخص پله تک مودی تنها 1 dB/km میرایی دارند. با این حال، کابل‌های فیبر پلاستیکی هسته‌ای بسیار بزرگ می‌توانند تضعیف چند هزار دسی‌بل در هر کیلومتر داشته باشند. یک کابل معمولی $62.5/125$ دارای تلفات در محدوده ۳ تا ۵ دسی‌بل بر کیلومتر است. به طور معمول، فیبرهایی با تضعیف کمتر از 10° دسی‌بل در کیلومتر، فیبرهای کم تلفات و آنها می‌باشند. فیبرهایی که میرایی بین 10° تا 100° دسی‌بل در کیلومتر دارند، فیبرهای با تلفات متوسط نامیده می‌شوند. فیبرهای با تلفات بالا دارای عدد بیش از 100° دسی‌بل در کیلومتر هستند. طبیعتاً هرچه عدد دسی‌بل کوچکتر باشد، تضعیف کمتر و کابل بهتر است.

میرایی کل برای یک کابل خاص را می‌توان از روی درجه تضعیف کابل تعیین کرد. به عنوان مثال، اگر یک کابل دارای میرایی $3/75$ دسی‌بل در کیلومتر باشد، آن کابل به طول 15 کیلومتر دارای تضعیف کلی $15 \times 3/75 = 25$ دسی‌بل است. اگر دو کابل بهم وصل شده باشند و یکی دارای میرایی 17 دسی‌بل و دیگری 24 دسی‌بل باشد، مجموع تضعیف صرفاً حاصل جمع یا $17 + 24 = 41$ دسی‌بل است.

پهنهای باند : پهنهای باند یک کابل فیبر نوری حداقل سرعت پالس‌های داده‌ای را که کابل می‌تواند تحمل کند، تعیین می‌کند. پهنهای باند معمولاً بر حسب مگاهرتز کیلومتر ($\text{MHz} \cdot \text{km}$) بیان می‌شود. یک کابل معمولی $62.5/125$ میکرومتر دارای پهنهای باند در محدوده 100° تا 300° مگاهرتز · کیلومتر است. کابل‌های با فرکانس 500° و 600° مگاهرتز کیلومتر نیز رایج هستند. حتی کابل‌های با پهنهای باند بالاتر تا 5000° مگاهرتز کیلومتر برای انتقال سیگنال‌های برد گیگاهرتز در دسترس هستند. با افزایش طول کابل، پهنهای باند به نسبت کاهش می‌یابد. اگر طول کابل 16° مگاهرتز کیلومتر از 1 به 2 کیلومتر دو برابر شود، پهنهای باند آن به نصف کاهش می‌یابد و به 8° مگاهرتز کیلومتر می‌رسد.

مثال ۲-۱۹

یک کابل فیبر نوری دارای پهنهای باند $600^\circ \text{ MHz} \cdot \text{km}$ است. پهنهای باند یک بخش 50° فوتی کابل چقدر است؟

$$1\text{ km} = 0,62\text{ mi} \quad 1\text{ mi} = 5280\text{ ft} \quad 1\text{ km} = 0,62(5280) = 3274\text{ ft}$$

$$50^\circ \text{ ft} = \frac{50^\circ}{3274} = 0,153\text{ km}$$

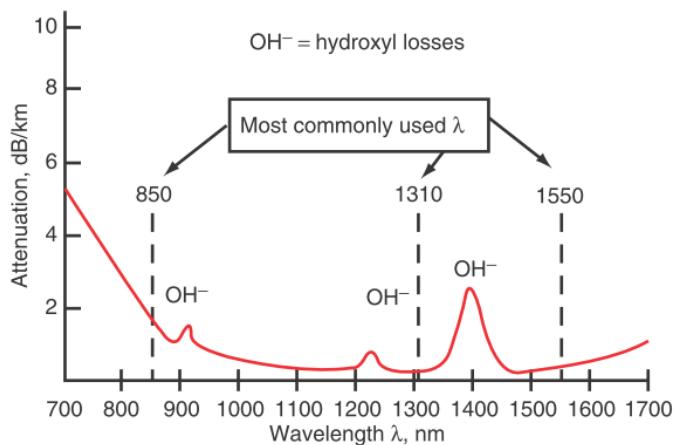
$$600\text{ MHz} \cdot \text{km} = 600\text{ MHz}(1\text{ km})$$

$$600\text{ MHz} \cdot \text{km} = X_{\text{MHz}}(0,153\text{ km})$$

$$X_{\text{MHz}} = \frac{600\text{ MHz} \cdot \text{km}}{0,153\text{ km}} = 3928/3\text{ MHz} \quad 3,93\text{ GHz}$$

ناحیه فرکانسی : اکثر کابل‌های فیبر نوری در محدوده فرکانس‌های نور نسبتاً وسیعی کار می‌کنند، اگرچه معمولاً برای محدوده باریکی از فرکانس‌های نور بهینه شده است. رایج‌ترین فرکانس‌های نوری 850° ، 1310° و 1550° نانومتر (یا $0,85$ ، $1,31$ و $1,55$ میکرومتر) هستند. کابل دارای حداقل تضعیف در این فرکانس‌ها است.

شکل (۲۴.۱۹) تضعیف نسبت به طول موج را برای یک کابل معمولی نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که یک پیک در میرایی تقریباً $1/4$ میکرومتر وجود دارد. این ناشی از یون‌های هیدروکسیل یا یون‌های اکسیژن هیدروژن نامطلوب است که در طول فرآیند ساخت تولید می‌شوند. با انتخاب دقیق



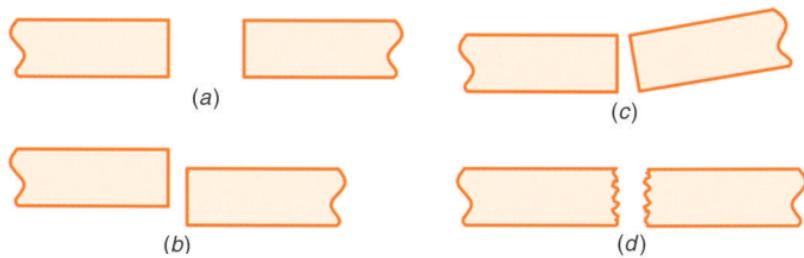
شکل ۲۴.۱۹: تضعیف در برابر طول موج یک کابل فیبر نوری معمولی.

فرکانس انتقال نور از این نوع تلفات آب جلوگیری می‌شود. حداقل تلفات در $1/3$ و $1/55$ میکرومتر رخ می‌دهد. اکثر منابع نور LED یا لیزر در یکی از این طول موج‌ها یا نزدیک به آن کار می‌کنند.

اتصالات و پیوندها

هنگامی که به کابل‌های فیبر نوری طولانی نیاز است، دو یا چند کابل می‌توانند به یکدیگر متصل شوند. انتهای کابل کاملاً در یک راستا قرار گرفته و سپس با گرمایش با هم ذوب می‌شوند. انواع کانکتورها در دسترس هستند که راه مناسبی برای اتصال کابل‌ها و اتصال آنها به فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و تکرار کننده‌ها فراهم می‌کنند.

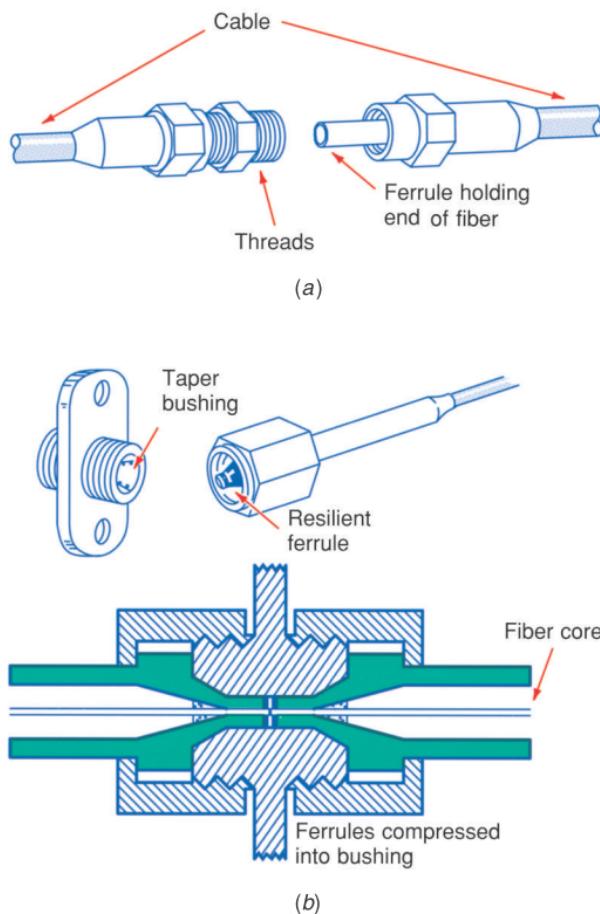
کانکتورها (اتصال دهنده‌ها): کانکتورها مجموعه‌های مکانیکی خاصی هستند که به کابل‌های فیبر نوری اجزه می‌دهند به یکدیگر متصل شوند. کانکتورهای فیبر نوری معادل نوری دوشاخه و پریز برق هستند. آنها مجموعه‌های مکانیکی هستند که انتهای یک کابل را نگه می‌دارند و باعث می‌شوند که آنها به طور دقیق با انتهای یک کابل دیگر هماهنگ شوند. اکثر کانکتورهای فیبر نوری یا به هم می‌چسبند یا به هم می‌پیچند یا دارای رزووهایی هستند که به دو قطعه اجزه می‌دهد به هم پیچند.



شکل ۲۵.۱۹: نامهنهنگی و سطوح انتهایی ناهموار باعث از بین رفتن نور و میرایی زیاد می‌شود. (الف) جداگانه از حد انتهایی. (ب) انحراف محوری. (ج) انحراف زاویه‌ای. (د) سطوح ناهموار و ناهموار.

اتصال دهنده‌ها تراز دقیق کابل‌ها را تضمین می‌کنند. انتهای کابل‌ها باید با دقیق در یک راستا قرار گیرند تا حداکثر نور از یک کابل به کابل دیگر منتقل شود. اتصال یا پیوند ضعیف باعث تضعیف

بیش از حد می‌شود زیرا نور از یک کابل خارج شده و وارد کابل دیگر می‌شود. شکل (۲۵.۱۹) چندین راه را نشان می‌دهد که هسته‌ها را می‌توانند ناهم تراز شوند. یک کانکتور می‌تواند این مشکلات را اصلاح کند.



شکل ۲۶.۱۹: جزئیات کانکتور کابل فیبر نوری.

یک کانکتور فیبر نوری معمولی در شکل (۲۶.۱۹)(الف) نشان داده شده است. یک سر کانکتور که فروول(بست فلزی)^{۲۲} نام دارد، فیبر را محکم در جای خود نگه می‌دارد. اتصالات تطبیق فیبر دیگر را محکم در جای خود نگه می‌دارد. هنگامی که این دو به یکدیگر پیچ می‌شوند، انتهای الیاف با هم برخورد می‌کنند و در نتیجه یک زوج کم تلفات ایجاد می‌شود. شکل (۲۶.۱۹)(ب) با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد که چگونه کانکتور الیاف را تراز می‌کند.

دها نوع اتصال دهنده مختلف برای کاربردهای مختلف موجود است. آنها در قسمت‌هایی از سیستم استفاده می‌شوند که ممکن است گهگاهی برای انجام آزمایش یا تعمیر کابل فیبر نوری جدا شود. اتصال دهنده‌ها معمولاً در انتهای کابل اعمال شده به منبع نور یا انتهای کابل متصل به ردیاب

^{۲۲}Ferrule

نور استفاده می‌شوند.

همچنین از اتصال دهنده‌ها در واحدهای تکرار کننده استفاده می‌شود که در آن نور گرفته و به یک پالس الکتریکی تبدیل، تقویت و شکل می‌گیرد و سپس برای ایجاد یک پالس جدید برای ادامه انتقال در یک خط طولانی استفاده می‌شود. کانکتورها در پشت آداتورهای رابط که به کامپیوتر وصل و استفاده می‌شوند.

دو نام متداول کانکتور ST و SMA هستند. کانکتورهای ST که به آنها کانکتورهای سرنیزه نیز گفته می‌شود، از آرایش بادامک نیمه چرخشی مانند آنچه در کانکتورهای کواکسیال BNC استفاده می‌شود، استفاده می‌کنند. آنها برای اتصال و قطع سریع راحت هستند. کانکتورهای SMA تقریباً یک اندازه هستند اما دارای اتصالات رشته‌ای هستند. دو نوع کانکتور محبوب دیگر LC و SC هستند. هر دو کانکتور از نوع اتصال سریع هستند و کانکتور LC کوچکتر است.

پیوند کابل‌های فیبر نوری : پیوند کابل فیبر نوری به معنای اتصال دائم انتهای یک کابل به کابل دیگر است. این کار معمولاً بدون کانکتور انجام می‌شود. اولین مرحله برش کابل است که به آن شکاف کابل می‌گویند، به طوری که در انتهای کاملاً مربع باشد. برش برای به حداقل رساندن اتلاف نور به قدری مهم است که ابزارهای ویژه‌ای برای اطمینان از برش کامل ایجاد شده است.

سپس دو کابلی که قرار است بهم متصل شوند، با حرارت دادن آنی تا دمای بالا به طور دائمی به یکدیگر پیوند می‌شوند تا با هم جوش خورده یا ذوب شوند. برای اطمینان از هم ترازی کامل باید از ابزارهای ویژه و ماشین‌های پیوند استفاده شود.

نصب کانکتور با جدا کردن فیبر به طوری که کاملاً مربع باشد شروع می‌شود. پولیش معمولاً به دنبال دارد. باز هم باید ماشین‌های مخصوص برش و پولیش که برای این منظور ابداع شده‌اند همیشه مورد استفاده قرار گیرند. اتصال ضعیف کابل یا کانکتورهای فیبر نوری و مدار فرستنده افت زیادی ایجاد می‌کند.

۴.۱۹ فرستنده‌ها و گیرنده‌های نوری

در یک سیستم ارتباط نوری، انتقال با فرستنده آغاز می‌شود که از یک مولد سیگنال حامل و یک مدولاتور تشکیل شده است. سیگنال حامل یک پرتو نور است که معمولاً با روشن و خاموش کردن آن با پالس‌های دیجیتال مدوله می‌شود. فرستنده اصلی اساساً یک منبع نور است.

گیرنده یک نور یا آشکارساز نوری است که نور دریافتی را دوباره به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. در این بخش، انواع منابع نور مورد استفاده در سیستم‌های فیبر نوری و مدار فرستنده و همچنین انواع آشکارسازهای نور و مدارهای گیرنده مربوطه مورد بحث قرار گرفته است.

منابع نور

منابع نور معمولی مانند لامپ‌های رشته‌ای را نمی‌توان در سیستم‌های فیبر نوری استفاده کرد زیرا آنها بسیار کند هستند. برای انتقال پالس‌های دیجیتالی پرسرعت باید از منبع نور بسیار سریع استفاده کرد. دو منبع نور پرکاربرد دیودهای ساطع کننده نور^{۲۳} (LED) و لیزرهای نیمه‌هادی هستند.

دیودهای ساطع کننده نور : دیود ساطع نور (LED) یک عنصر نیمه‌هادی اتصال PN است که هنگام بایاس مستقیم نور ساطع می‌کند. هنگامی که یک الکترون آزاد با حفره در ساختار نیمه‌هادی مواجه می‌شود، این دو با هم ترکیب و در این فرآیند انرژی را به شکل نور از دست می‌دهند. نیمه‌هادی‌هایی

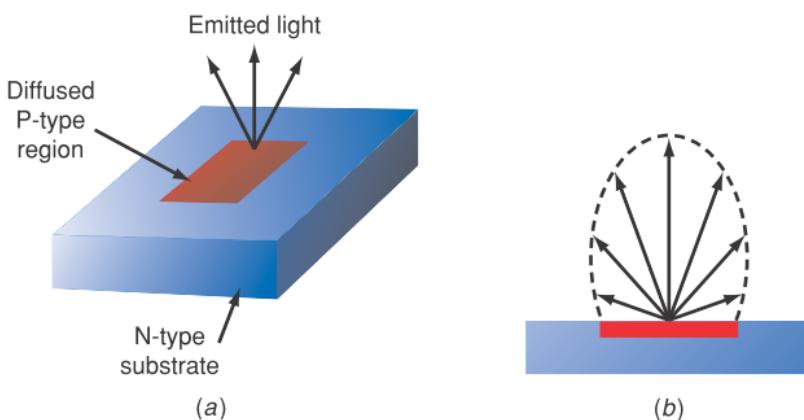
^{۲۳}Light Emitting Diode (LED)

مانند گالیم آرسناید (GaAs) از نظر انتشار نور نسبت به سیلیکون برتری دارند. بیشتر LED‌ها عنصرهای GaAs هستند که برای تولید نور قرمز بهینه شده‌اند. LED‌ها به طور گسترده برای نمایشگرهایی که خاموش یا روشن بودن مدار را نشان می‌دهند یا برای نمایش داده‌های اعشاری و باینری استفاده می‌شوند. با این حال، از آنجایی که LED یک دستگاه نیمه‌هادی سریع است، می‌تواند خیلی سریع خاموش و روشن شود و قادر به انتقال پالس‌های نور باریک مورد نیاز در یک سیستم فیبر نوری دیجیتالی است.

خوب است بدانید که:

پرکاربردترین منبع نور در سیستم‌های فیبر نوری، دیود لیزر تزریقی است که نور سطح پایین را در محدوده فرکانسی نسبتاً وسیع با جریان بایاس مستقیم سطح پایین یا نور درخشان در محدوده فرکانس بسیار باریکتری آستانه تولید می‌کند.

الایدی‌ها را می‌توان طوری طراحی کرد که تقریباً هر نور رنگی دلخواه را ساطع کنند. LED‌های مورد استفاده برای انتقال فیبر نوری معمولاً در محدوده قرمز و نزدیک به مادون قرمز هستند. طول موج‌های معمول نور LED که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند 850 nm ، 1310 nm و 1550 nm میکرومتر هستند، معمولاً 850 nm و 1550 nm نانومتر تعیین می‌شوند که در آن یک میکرومتر (μm) برابر با 1000 nm نانومتر است. این فرکانس‌ها همگی در محدوده مادون قرمز نزدیک و درست زیر نور قرمز قرار دارند که با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نیست. این فرکانس‌ها اساساً بهاین دلیل انتخاب شده‌اند که اکثر کابل‌های فیبر نوری کمترین تلفات را در این محدوده فرکانس دارند.

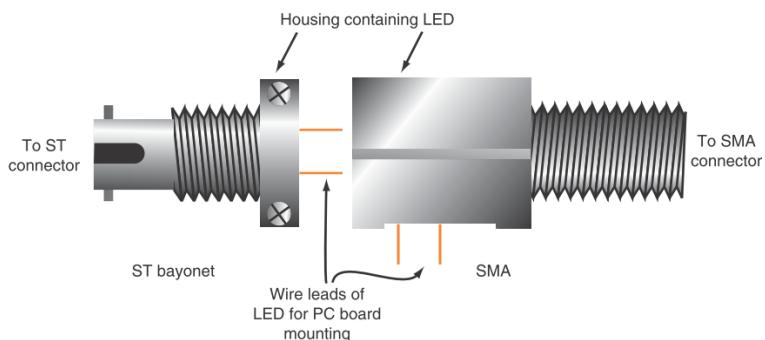


شکل ۲۷.۱۹: (الف) ساخت و ساز LED معمولی. (ب) الگوی تابش نور.

یک آرایش فیزیکی LED در شکل (الف) نشان داده شده است. یک ماده از نوع P در زیرلایه نوع N پخش می‌شود و یک دیود ایجاد می‌کند. تابش از مواد نوع P و اطراف محل اتصال رخ می‌دهد. شکل (ب) یک الگوی رایج تابش نور را نشان می‌دهد. نور خروجی از یک LED بر حسب توان بیان می‌شود. سطح خروجی نور معمولی در محدوده 10 mW تا 5 mW میکرووات است. گاهی اوقات خروجی نور بر حسب dBm یا dB نسبت به یک میلی وات بیان

می‌شود. سطوح رایج 15° تا 30° دسی بل می‌باشد. سطوح جریان بایاس مستقیم برای دستیابی به‌این سطح توان در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌آمپر است. LEDهای با خروجی بالا با رتبه‌های خروجی در محدوده ۶۰۰ تا ۲۵۰۰ میکرووات نیز موجود هستند.

یک LED معمولی که برای روشنایی استفاده می‌شود نسبتاً کند روشن و خاموش می‌شود. زمان روشن/خاموش معمولی حدود 15° ثانیه است. این برای اکثر برنامه‌های کاربردی ارتباط داده توسعه پیشر نوری بسیار کند است. LEDهای سریعتر با قابلیت سرعت داده تا 5° مگاهرتز در دسترس هستند. برای سرعت داده‌های سریعتر، باید از دیود لیزر استفاده شود.



شکل ۲۸.۱۹: مجموعه‌های LED با اتصالات.

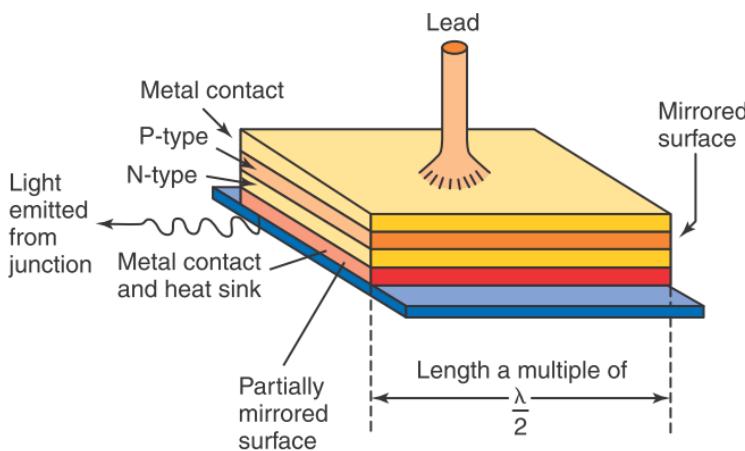
الای‌دی‌های ویژه فقط برای کاربردهای فیبر نوری ساخته شده‌اند. این واحدها از گالیوم آرسناید (GaAs) یا اوریندیوم فسفاید (InP) ساخته شده‌اند و نور را در $1/3$ میکرومتر ساطع می‌کنند. LEDهای دیگر با شش لایه چند لایه از مواد نیمه‌هادی برای بهینه سازی دستگاه برای فرکانس و خروجی نور خاص استفاده می‌شوند. شکل (۲۸.۱۹) برخی از مجموعه‌های LED ساخته شده برای پذیرش کانکتورهای ST سرنیزه و کابل فیبر نوری SMA را نشان می‌دهد. اینها برای نصب برد PC ساخته شده‌اند.

دیودهای لیزر: یکی دیگر از فرستندهای نور که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد، لیزر است و منبع نوری است که نور تک رنگ منسجم (همدوس) ساطع می‌کند. نور تک رنگ، نور تک فرکانس خالص است. اگرچه LED نور قرمز ساطع می‌کند، این نور طیف باریکی را در اطراف فرکانس‌های قرمز پوشش می‌دهد. همدوس به‌این واقعیت اشاره دارد که تمام امواج نوری ساطع شده با یکدیگر هم فاز هستند. همدوسی یک اثر متمنکز روی پرتو ایجاد می‌کند به طوری که باریک و در نتیجه بسیار شدید است. این اثر تا حدودی شبیه به استفاده از یک آنتن بسیار جهت‌دار برای متمنکز کردن امواج رادیویی در یک پرتو باریک است که شدت سیگنال را نیز افزایش می‌دهد.

پرکاربردترین منبع نور در سیستم‌های فیبر نوری دیود لیزر تزریقی (ILD)^{۲۴} است که به عنوان لیزر فری-پرو (FP)^{۲۵} (FP) نیز شناخته می‌شود. مانند LED، یک دیود اتصال PN است که معمولاً از GaAs ساخته می‌شود. شکل (۲۹.۱۹). در برخی از سطوح جریان، نور درخشانی از خود ساطع می‌کند. ساختار فیزیکی ILD به گونه‌ای است که ساختار نیمه‌هادی به صورت مربع در انتهای بردیه می‌شود تا سطوح بازتابنده داخلی را تشکیل دهد. یکی از سطوح معمولاً با مواد بازتابنده مانند طلا

^{۲۴}Injection Laser Diode (ILD)

^{۲۵}Fabry-Pero (FP)



شکل ۲۹.۱۹: دیود لیزر تزریقی فبری-پرو

پوشانده می‌شود. سطح دیگر فقط تا حدی منعکس کننده است. هنگامی که دیود به درستی بایاس شود، نور ساطع و بین سطوح بازتابنده به عقب و جلو باز جهش می‌کند. فاصله بین سطوح بازتابی به دقت اندازه‌گیری شده است به طوری که در فرکانس نور مضربی از نیم موج باشد. جهش به جلو و عقب امواج نور باعث تقویت و افزایش شدت آنها می‌شود. این ساختار مانند یک محفظه تشدید کننده برای نور است. نتیجه یک پرتو نوری تک فرکانس با درخشندگی فوق العاده بالا است که از سطح نیمه بازتابنده ساطع می‌شود.

دیودهای لیزر تزریقی قادر به تولید توان نوری تا چندین وات هستند. آنها بسیار قدرتمندتر از LED‌ها و بنابراین، قادر به انتقال در فواصل بسیار طولانی تر هستند. مزیت دیگری که ILD‌ها نسبت به LED‌ها دارند، خاموش و روشن شدن با سرعت بیشتر است. دیودهای لیزری پرسرعت قادر به سرعت داده دیجیتالی گیگابیت بر ثانیه هستند.

اگرچه بیشتر نور ساطع شده توسط ILD فبری-پرو در یک فرکانس واحد است، نور نیز در فرکانس‌های کمی پایین‌تر تا کمی بالاتر از فرکانس اصلی نور منتشر می‌شود. در نتیجه، نور طیف باریکی را روی فیبر اشغال می‌کند. در سیستم‌هایی که از چندین طول موج نور استفاده می‌کنند، لیزرهای FP می‌توانند با یکدیگر تداخل داشته باشند. برای غلبه بر این مشکل می‌توان از لیزر بازخورد توزیع شده^{۲۶} (DFB) استفاده کرد. این لیزر با محفظه رزونانسی ساخته شده است که شامل یک ساختار توری یکپارچه است که به عنوان فیلتر انتخابی عمل می‌کند. خروجی لیزر DFB پهنه‌ای باند بسیار باریکتری دارد و نسبت به هر نوع لیزر دیگری به یک طول موج نور نزدیکتر است. لیزرهای FP و DFB پرقدرت‌ترین لیزرهای ساخته شده هستند و عمدها در انتقال فیبر از راه دور و در شبکه‌های شهری استفاده می‌شوند.

نوع دیگری از لیزر مورد استفاده در سیستم‌های فیبر نوری، لیزر ساطع کننده سطح حفره عمودی^{۲۷} (VCSEL) است. VCSEL به جای ساطع نور از لبه دیود، روی سطح ترانزیستورهای سیلیکونی مانند ویفر و مدارهای مجتمع ساخته شده است. حفره روی سطح ویفر عمودی ساخته

^{۲۶}Distributed FeedBack (DFB)

^{۲۷}Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)

می‌شود تا نور از سطح ساطع شود. ساخت VCSEL بسیار آسان و کم هزینه است. علاوه بر این، آنها را می‌توان به صورت آرایه بر روی سطح ویر ساخت. توان خروجی ساطع شده توسط VCSEL بیشتر از LED است اما کمتر از لیزر FB است. پهنهای باند آن کمتر از LED است اما از لیزر FB گستردگر است. این باعث می‌شود VCSEL‌ها برای شبکه‌های MAN یا LAN یا مسافت کوتاه‌ایده آل باشند. اکثر VCSEL‌ها ۸۵° نانومتر هستند، اما اخیراً VCSEL‌های ۱۳۱° نانومتری در دسترس قرار گرفته‌اند.

محبوب‌ترین فرکانس‌های لیزر ۱۳۱° و ۸۵° ۱۵۵۰ نانومتر هستند. برخی از لیزرها نیز برای کارکرد در ۹۸° و ۱۴۹° نانومتر ساخته شده‌اند. لیزرهای ۸۵° و ۱۳۱° نانومتری عمدها در شبکه‌های LAN و در برخی از MAN‌ها استفاده می‌شوند. لیزرهای ۱۵۵۰ نانومتری عمدها در سیستم‌های فیبر نوری دوربرد استفاده می‌شوند، زیرا تضعیف فیبر در باندهای ۸۵° و ۱۳۱° ۱۵۵۰ نانومتر نزدیک به ۱۵۵۰ نانومتر کمتر است.

توسعه اخیر، لیزر قابل تنظیم است که فرکانس آن را می‌توان با تغییر بایاس dc در دستگاه یا تنظیم مکانیکی یک حفره خارجی تغییر داد. محدوده طول موج بیش از ۱۰۰ نانومتر در بالا و پایین یک طول موج مرکزی امکان پذیر است. لیزرهای قابل تنظیم با برد وسیع‌تری در حال توسعه هستند. لیزرهای قابل تنظیم در کاربردهایی که به فرکانس‌های متعدد مورد نیاز است، مانند مالتی پلکس تقسیم طول موج متراکم (DWDM) استفاده می‌شود. به جای نیاز به فهرستی از لیزرهای گران قیمت، هر کدام در یک طول موج جداگانه یا حداقل چندین لیزر برای پوشش فرکانس‌های متعدد، یک لیزر واحد کافی است.

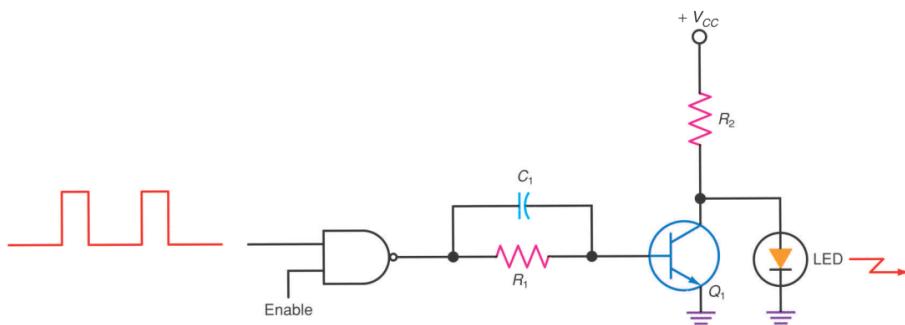
لیزرها توسط داده‌ها به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم مدوله می‌شوند. در مدولاسیون مستقیم، داده‌ها لیزر را خاموش و روشن می‌کنند تا پالس‌های باینری را تشکیل دهند. در واقع لیزر هرگز به طور کامل خاموش نمی‌شود، اما در سطح نور کم روشن نگه داشته می‌شود، زیرا روشن کردن لیزر زمان زیادی می‌برد. این امر سرعت عمل را محدود می‌کند. برای تولید حداقل پالس نور، بایاس با یک سطح باینری ۱ به مقدار اوج خود افزایش می‌یابد. این روشن تا حدود چندین گیگابیت در ثانیه به خوبی کار می‌کند، اما برای نرخ‌های فرآت از این، یک مدولاتور غیرمستقیم استفاده می‌شود.

لیزرها مقدار زیادی گرمای تولید می‌کنند، بنابراین برای عملکرد صحیح باید به هیئت سینک متصل شوند. از آنجایی که عملکرد آنها به گرمای حساس است، بیشتر لیزرها در مداری استفاده می‌شوند که برخی بازخوردها را برای کنترل دما فراهم می‌کند. این نه تنها از لیزر محافظت می‌کند، بلکه شدت نور و فرکانس مناسب را نیز تضمین می‌کند. بسیاری از لیزرها از خنک کننده ترموالکتریک بر اساس اثر پلتیر^{۲۸} استفاده می‌کنند.

فرستنده‌های نور

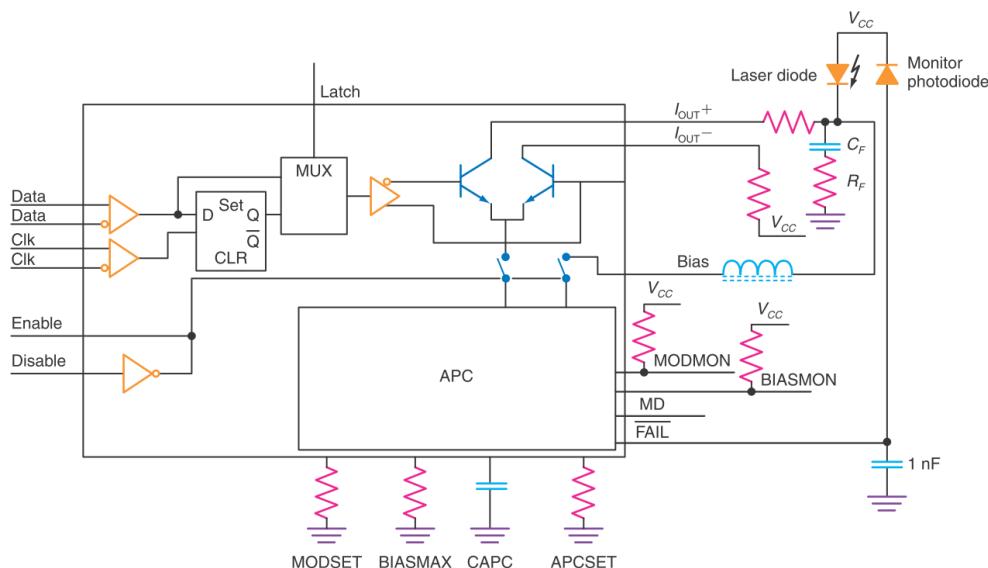
فرستنده LED: یک فرستنده نور از LED و مدارهای تغذیه مرتبط با آن تشکیل شده است. یک مدار معمولی در شکل (۳۰.۱۹) نشان داده شده است. پالس‌های داده باینری به یک گیت منطقی اعمال می‌شود که به‌نوبه خود سوئیچ ترانزیستوری Q_1 را به کار می‌اندازد و LED را خاموش و روشن می‌کند. پالس مثبت در ورودی گیت NAND باعث می‌شود که خروجی NAND به صفر برسد. این Q_1 را خاموش می‌کند، بنابراین LED سپس از طریق R_2 بطور مستقیم هدایت و روشن می‌شود. با ورودی صفر، خروجی NAND زیاد است، به‌طوری که Q_1 روشن شده و جریان را از LED دور می‌کند.

^{۲۸}Peltier effect



شکل ۳۰.۱۹: مدار فرستنده نوری با استفاده از LED

برای اطمینان از نور بسیار روشن از پالس‌های جریان بسیار بالا استفاده می‌شود. اگر قرار است داده‌ها به طور قابل اعتماد در فواصل طولانی منتقل شوند، شدت بالا مورد نیاز است. اکثر LED‌ها قادر به تولید سطوح توان تا حدود چندین هزار میکرووات هستند. با چنین شدت کم، فرستنده‌های LED فقط برای مسافت‌های کوتاه مناسب هستند. علاوه بر این، سرعت LED محدود است. زمان خاموش و روشن شدن بیش از ده‌ها نانوثانیه نیست و بنابراین نرخ انتقال محدود است. بیشتر فرستنده‌های LED برای سیستم‌های فیر نوری دیجیتالی با فاصله کوتاه و با سرعت کم استفاده می‌شوند.

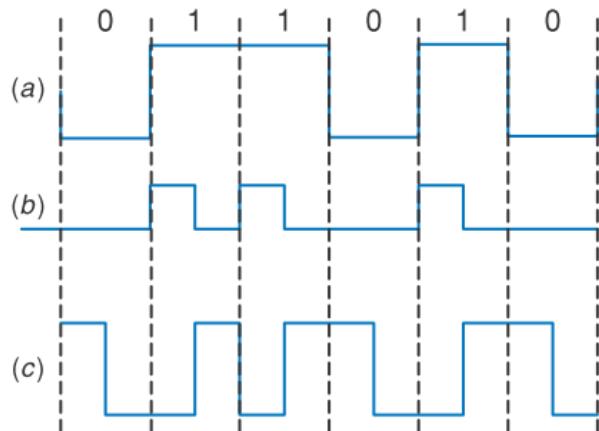


شکل ۳۱.۱۹: یک مدار درایور (راه انداز) لیزر معمولی.

فرستنده لیزر : یک مدار محرک لیزر معمولی در شکل (۳۱.۱۹) نشان داده شده است. بیشتر مدارها در یک مدار مجتمع به نام VSC7940 و توسط شرکت نیمه‌هادی Vitesse ساخته شده است. این از ۳/۳ یا ۵ ولت کار می‌کند و دارای مدار کنترل خودکار برق (APC) ویژه‌ای است که خروجی لیزر را ثابت نگه می‌دارد. این مدار می‌تواند با سرعت داده تا ۱۲۵ گیگابیت بر ثانیه کار کند.

داده‌های ورودی به شکل دیفرانسیلی بوده، همانطور که اکثر سیگنال‌های منطقی بالای چند صد مگاهرتز هستند. یک مالتی پلکسر برای ارسال مستقیم داده‌ها به ترانزیستورهای درایور لیزر یا انتخاب داده‌هایی که از طریق یک فلیپ فلاپ و یک سیگنال ساعت دیفرانسیلی خارجی کلاک می‌شوند استفاده می‌شود. سیگنال‌های فعل/غیرفعال برای خاموش یا روشن کردن لیزر به دلخواه استفاده می‌شود.

دیود لیزر با استفاده از چندین مقاومت و یک خازن که جریان و پاسخ سوئیچینگ را تنظیم می‌کند به درایور متصل می‌شود. اکثر بسته‌های لیزری همچنین حاوی یک فتودیود هستند که برای نظرارت بر خروجی نور لیزر و ارائه بازخورد به مدار APC در تراشه استفاده می‌شود. اگر خروجی لیزر به دلیل تغییرات دما تغییر کند یا به دلیل تغییرات طول عمر کاهش یابد، APC به طور خودکار آن را تصحیح و روشنایی ثابت را تضمین می‌کند. ترانزیستورهای درایور خروجی می‌توانند تا ۱۰۰ میلیآمپر سوئیچ کنند و زمان صعود و سقوط معمولی ۶۰ ثانیه دارند. مقاومت‌ها و خازن‌های خارجی بایاس لیزر، سطح بایاس مدولاسیون، جریان متوسط و زمان پاسخ حلقه کنترل را تنظیم می‌کنند.



شکل ۳۲.۱۹: فرمتهای داده مورد استفاده در انتقال فیبر نوری. (الف) NRZ (بدون بازگشت به صفر). (ب) RZ (بازگشت به صفر). (ج) دوفاز (منچستر).

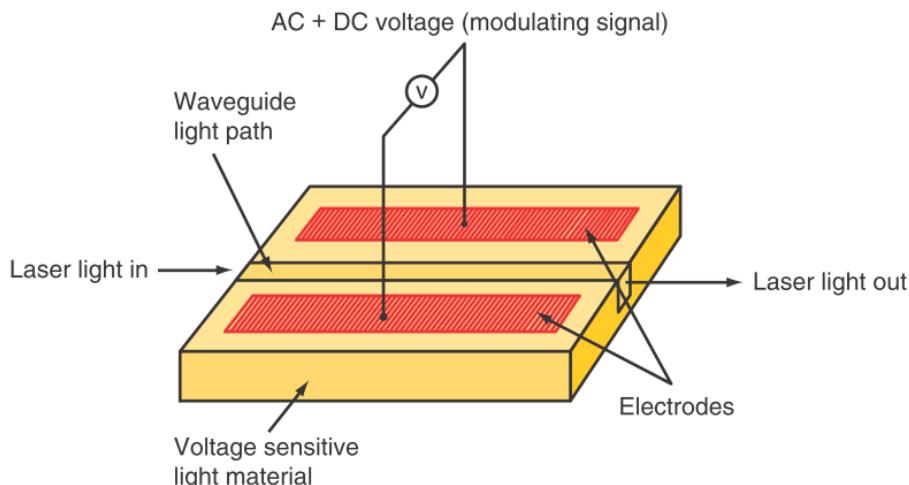
فرمت داده: داده‌های دیجیتالی به روش‌های مختلفی در سیستم‌های فیبر نوری فرمت می‌شوند. برای انتقال اطلاعات توسط کابل فیبر نوری، داده‌ها معمولاً به یک جریان داده دیجیتال سریال تبدیل می‌شوند. فرمت متداول سریال NRZ در شکل ۳۲.۱۹(الف) نشان داده شده است. قالب NRZ در A در فصل یازدهم مورد بحث قرار گرفت. هر بیت یک شکاف زمانی جداگانه را اشغال می‌کند و در آن بازه زمانی یا باینری ۱ یا باینری ۰ است.

در قالب RZ شکل ۳۲.۱۹(ب)، دوره زمانی یکسانی برای هر بیت اختصاص داده شده است، اما هر بیت به صورت یک پالس بسیار باریک (معمولًا ۵۰ درصد زمان بیت) یا به عنوان عدم وجود پالس ارسال می‌شود. همانطور که در شکل ۳۲.۱۹(ج) نشان داده شده است، در برخی از سیستم‌ها، از کد منچستر یا دو فاز استفاده می‌شود. اگرچه می‌توان از کد NRZ استفاده کرد، اما کدهای RZ و منچستر در نرخ‌های داده بالاتر به طور قابل اعتماد تشخیص داده و بنابراین ترجیح داده می‌شوند.

مدولاتورهای نوری

متداول ترین راه برای مدوله کردن پرتو لیزر، صرفاً خاموش و روشن کردن لیزر مطابق با داده‌های باینری است که قرار است ارسال شود. به این کلیدزنی خاموش و روشن^{۲۹} (OOK) می‌گویند. مطلوب نیست که لیزر را به طور کامل خاموش کنیم، بنابراین جریان تغذیه dc به لیزر توسط داده‌های باینری مدوله می‌شود تا کلید زنی تغییر دامنه^{۳۰} (ASK) تولید شود. در حالی که این کار با نرخ‌های کمتر از چندین گیگابیت بر ثانیه کار می‌کند، در نرخ‌های داده بالاتر مطلوب نیست. تغییر توان dc به لیزر باعث ایجاد تغییر فرکانس در نور لیزر می‌شود. چیرپ^{۳۱}، نوعی مدولاسیون فرکانس که با تغییر جریان dc رخ می‌دهد. و عمق محدود (درصد) مدولاسیون. بنابراین، در فرکانس‌های بالاتر از یک مدولاتور خارجی استفاده می‌شود.

مدولاتورهای خارجی به عنوان مدولاتورهای غیر مستقیم یا مدولاتورهای الکتروپتیکال (EOM)^{۳۲} شناخته می‌شوند. یکی از انواع EOM یک دستگاه نیمه‌هادی است که به طور فیزیکی به لیزر متصل است و همیشه به طور کامل روشن است. مدولاتور که گاهی به آن مدولاتور الکترو جذبی (EAM)^{۳۳} می‌گویند، به عنوان یک شاتر فعال الکتریکی عمل می‌کند که توسط داده‌ها خاموش و روشن می‌شود. سرعت داده از ۱۰ گیگابیت بر ثانیه تا بیش از ۴۰ گیگابیت در ثانیه با EAM قابل دستیابی است. گاهی اوقات EAM با لیزر بسته بندی می‌شود، اما به عنوان یک جزء جداگانه نیز موجود است.



شکل ۳۳.۱۹: نمونه مدولاسیون فاز تولید EOM

یک EOM مطلوب، مدولاتور ماخ زندر^{۳۴} (MZ) است. مدولاتور MZ از یک میدان الکتریکی خارجی برای کنترل ضریب شکست یک ماده برای ایجاد تغییر فاز یا پلاریزاسیون استفاده می‌کند. شکل (۳۳.۱۹). این بر اساس اثر پوکل^{۳۵} است که از یک ولتاژ خارجی برای القای تاخیر فاز یا تغییر

^{۲۹}On Off Keying (OOK)

^{۳۰}Amplitude Shift Keying (ASK)

^{۳۱}Chirp

^{۳۲}Electro Optical Modulator (EOM)

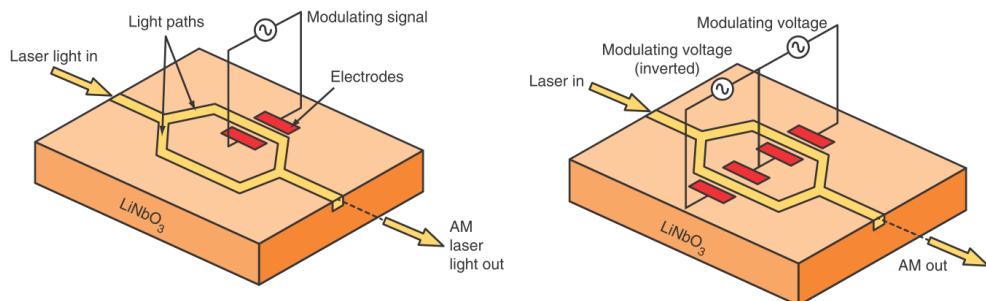
^{۳۳}ElectroAbsorption Modulator (EAM)

^{۳۴}Mach-Zehnder (MZ)

^{۳۵}Pockel Effect

فاز استفاده می‌کند. ولتاژ مورد استفاده برای ایجاد تغییر فاز π (۱۸۰ درجه) V_π یا ولتاژ نیموج نامیده می‌شود. این ولتاژ یک بایاس dc است که با یک موج سینوسی با فرکانس بالا ترکیب شده است که یک جریان الکتریکی بین الکترودها ایجاد می‌کند که باعث تاخیر می‌شود.

برای ایجاد تغییر دامنه، از تداخل سنج استفاده می‌شود. تداخل سنج از دو مسیر مساوی نور از لیزر استفاده می‌کند که برای کمک یا تداخل با یکدیگر برای تبدیل یک تغییر فاز به یک تغییر دامنه، مخلوط می‌شوند.



شکل ۳۴.۱۹: یک مدولاتور ماخ زندر (الف) تک مسیره، (ب) مدولاسیون مسیر دوگانه.

یک مدولاتور MZ در شکل ۳۴.۱۹(الف) نشان داده شده است. پایه از ماده‌ای ساخته شده است که اثر پوکل را نشان می‌دهد. یک ماده محبوب لیتیوم نیوبات ($LiNbO_3$) است. لیزر به طور مداوم روشن است و نور به دو مسیر تقسیم می‌شود. در یک مسیر، نور فقط از آن عبور می‌کند. مسیر دیگر همانطور که در بالا توضیح داده شد به صورت فاز مدوله می‌شود. اگر ولتاژ خارجی اعمال نشود، تغییر فاز رخ نمی‌دهد. سیگنال‌های نور در انتهای هر مسیر در فاز ترکیب شده تا خروجی را تشکیل دهند. اگر دو پرتو هم فاز باشند یا به طور سازنده اضافه شوند، خروجی نور قوی رخ می‌دهد. این باینری ۱ است. اگر یک تغییر فاز بزرگ با اعمال ولتاژ مدوله کننده خارجی ایجاد شود، دو پرتو نور به طور مخربی با هم مخلوط می‌شوند و باعث نور باشد کم یا عدم خروجی نور می‌شود. این باینری ۰ است. با تغییر فاز در مسیر کنترل شده، مدولاسیون دامنه (AM) تولید می‌شود.

در برخی از مدولاتورهای MZ، هر دو مسیر نور توسط سیگنال‌های خارجی مدوله می‌شوند، که همانطور که در شکل ۳۴.۱۹(ب) نشان داده شده است، معکوس یکدیگر می‌شوند. این امکان کنترل بهتر خروجی نور را فراهم می‌کند و امکان جابجایی فاز متغیر پیوسته و یا تغییرات دامنه را فراهم می‌کند.

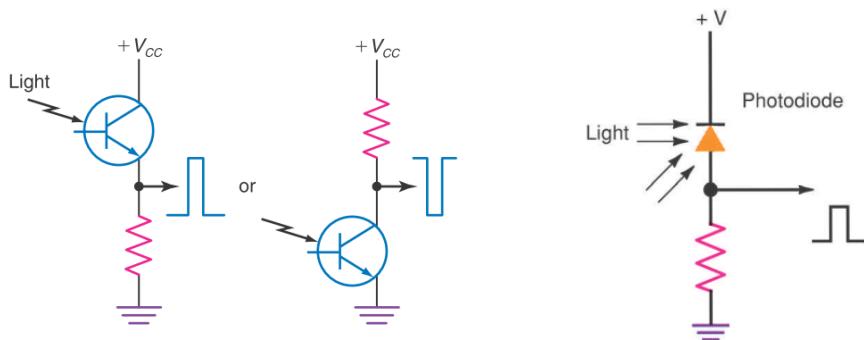
آشکارسازهای نوری

بخش گیرنده سیستم ارتباط نوری نسبتاً ساده است. از یک آشکارساز تشکیل شده است که پالس‌های نور را حس کرده و آنها را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. این سیگنال تقویت شده و به داده‌های دیجیتال سریالی اصلی تبدیل می‌شوند. مهم‌ترین جزء حسگر (سنسور) نور است.

فوتودیود : پرکاربردترین حسگر نور، فوتودیود^{۳۶} است. این یک دیود اتصال PN سیلیکونی است که به نور حساس است. همانطور که در شکل ۳۵.۱۹ نشان داده شده، این دیود معمولاً بایاس معکوس است. تنها جریانی که از آن عبور می‌کند یک جریان نشتی معکوس بسیار کوچک است. هنگامی که نور به دیود برخورد می‌کند، این جریان نشتی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این جریان از یک

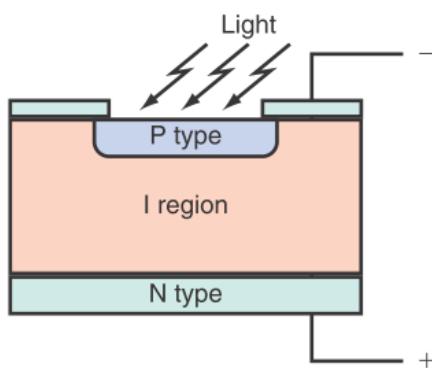
^{۳۶}Photodiode

مقاومت عبور کرده و افت ولتاژ در آن ایجاد می‌کند. نتیجه یک پالس ولتاژ خروجی است.



شکل ۳۶.۱۹: تبدیل نور توسط دیود نوری به پالس‌های ولتاژ.

فوتولترانزیستور: جریان معکوس در یک دیود حتی زمانی که در معرض نور قرار می‌گیرد بسیار کم است. پالس ولتاژ حاصل بسیار کوچک است و بنابراین باید تقویت شود. محل اتصال بیس-کلکتور در معرض نور قرار دارد. جریان نشستی پایه تولید شده باعث کاهش جریان امیتر به کلکتور بزرگتر می‌شود. بنابراین ترانزیستور جریان نشستی کوچک را به یک خروجی بزرگتر و مفیدتر تقویت می‌کند (شکل ۳۶.۱۹). مدارهای فوتولترانزیستور نسبت به سطوح نور کوچک بسیار حساس‌تر هستند، اما نسبتاً کند هستند. بنابراین به طور معمول از تقویت بیشتر و شکل دهنده پالس استفاده می‌شود.

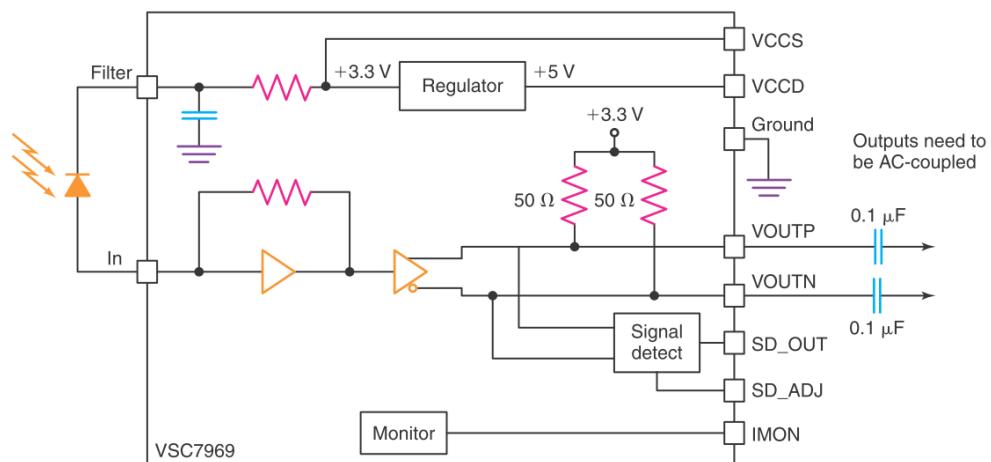


شکل ۳۷.۱۹: ساختار دیود پین.

دیود پین (PIN): حساسیت یک فتودیود اتصال استاندارد PN را می‌توان با ایجاد یک دستگاه جدید افزایش داد و زمان پاسخ را کاهش داد که یک لایه (I) پاک نشده یا ذاتی بین نیمه‌های P و N اضافه می‌کند. نتیجه یک دیود پین است (شکل ۳۷.۱۹). لایه نازک P در معرض نور قرار می‌گیرد که به محل اتصال نفوذ کرده و باعث جریان الکترون متناسب با مقدار نور می‌شود. دیود بایاس معکوس است و جریان بسیار کم است تا زمانی که نور به دیود برخورد کند که به طور قابل توجهی جریان را افزایش می‌دهد. دیودهای پین در پاسخ به پالس‌های نور سریع با فرکانس بالا به طور قابل توجهی سریعتر هستند.

و حساسیت آنها به نور بسیار بیشتر از یک فتودیود معمولی است.

دیود بهمنی : فتودیود بهمنی (APD) یک حسگر پر کاربرد است. این سریع ترین و حساس ترین فتودیود موجود است، اما گران و مدار آن پیچیده است. مانند فتودیود استاندارد، APD بایاس معکوس است. با این حال، عملیات متفاوت است. APD از مود شکست معکوس استفاده می کند که معمولاً در دیودهای زنر مایکروویو و IMPATT یافت می شود. هنگامی که مقدار کافی ولتاژ معکوس اعمال شود، جریان بسیار بالایی به دلیل اثر بهمن جریان می یابد. به طور معمول، چند صد ولت بایاس معکوس، درست زیر آستانه بهمن، اعمال می شود. هنگامی که نور به محل اتصال برخورد می کند، شکست رخ می دهد و جریان زیادی عبور می کند. این جریان معکوس بالا نیاز به تقویت کمتری نسبت به جریان کم در یک فتودیود استاندارد دارد. APD های ژرمانیوم نیز به طور قابل توجهی سریعتر از فتودیودهای دیگر هستند و می توانند سرعت داده بسیار بالای گیگابیت در ثانیه را در برخی از سیستم ها مدیریت کنند.



شکل ۳۸.۱۹: مدار گیرنده فتودیود عبوری.

خوب است بدانید که:

فتودیود بهمنی سریع ترین و حساس ترین فتودیود موجود است.

گیرنده های نوری

شکل ۱۹-۳۸ یک مدار گیرنده نور را نشان می دهد. این مدار مجتمع، VSC7969 توسط Vitesse Semiconductor Corporation، از یک پین خارجی یا فتودیود APD استفاده می کند و می تواند با سرعت ۳/۱۲۵ گیگابیت بر ثانیه کار کند. مرحله ورودی که عموماً به عنوان تقویت کننده ترانس امپدانس^{۴۸} (TIA) شناخته می شود، جریان دیود را به ولتاژ خروجی تبدیل کرده و آن را تقویت

^{۴۷} Avalanche PhotoDiode (APD)

^{۴۸} Transimpedance Amplifier (TIA)

می‌کند. مرحله زیر یک محدود کننده است که سیگنال را شکل می‌دهد و آن را به تقویت کننده درایبور دیفرانسیلی اعمال می‌کند. خروجی به صورت خازنی به مرحله بعدی در سیستم کوپل می‌شود. مدار تشخیص سیگنال یک خروجی منطقی CMOS را ارائه می‌کند که اگر جریان دیود از حد پایین تر تجاوز کند، وجود سیگنال ورودی را نشان می‌دهد. یک مانیتور جریان فتودیود نیز ارائه شده است. مدار از $\frac{2}{3}$ یا ۵ ولت dc کار می‌کند و یک رگولاتور روی تخته مدار را به کار می‌اندازد و بایاس را برای فتودیود فراهم می‌کند.



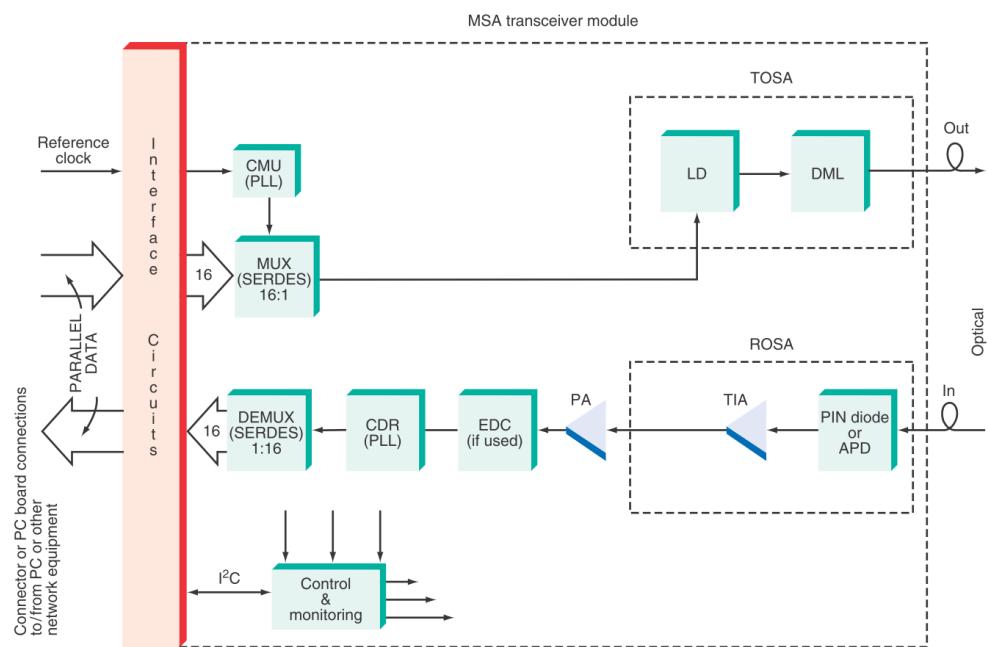
شکل ۳۹.۱۹: ترانسپوندر یا فرستنده-گیرنده نوری استاندارد.

فرستنده-گیرنده‌های نوری

فرستنده یا فرستنده نوری مجموعه‌هایی به نام مژول‌های نوری هستند که هر دو فرستنده نور و گیرنده نور در کنار هم قرار می‌گیرند تا یک مژول واحد را تشکیل دهند. شکل (۳۹.۱۹). این مژول‌ها رابط بین محیط انتقال نوری و رابط الکتریکی به کامپیوتر یا سایر تجهیزات شبکه را تشکیل می‌دهند. این مژول‌ها از زیر مجموعه نوری انتقال (TOSA) و زیر مجموعه نوری دریافت (ROSA) ساخته شده‌اند. هر کدام دارای یک کانکتور نوری برای دریافت سیگنال‌ها به داخل و خارج از واحد هستند. این مجموعه‌های فرعی به مدارهای واسطه که سیگنال‌های ارسالی را تامین و سیگنال‌های ورودی را دریافت می‌کنند متصل می‌شوند. کل واحد در یک محفظه فلزی مناسب برای نصب بر روی برد مدار چاپی کارت خط روتر یا مدار رابط دیگر قرار دارد.

شکل (۴۰.۱۹) بلوک دیاگرام یک مژول فرستنده گیرنده معمولی را نشان می‌دهد. اتصالات کابل فیبر نوری در سمت راست و اتصالات الکتریکی به تجهیزات شبکه در سمت چپ قرار دارند. فیبر نوری به ورودی دیود پین یا آشکارساز IR و تقویت کننده ترانس امپدانس^{۳۹} (TIA) متصل می‌شود. فتودیود و TIA یک بسته واحد هستند که به ن زیرمجموعه نوری گیرنده می‌گویند. این امر با تقویت

^{۳۹}TransImpedance amplifier (TIA)



شکل ۴۰.۱۹: بلوک دیاگرام یک نوع مازول فرستنده گیرنده نوری.

اضافی در پستقویت کننده^{۴۰} (PA) دنبال می‌شود. اگر از جبران پاشندگی الکترونیکی^{۴۱} (EDC) استفاده شود، در اینجا در عبور سیگنال ظاهر می‌شود. سپس خروجی EDC به ساعت و واحد بازیابی اطلاعات^{۴۲} (CDR) متصل می‌شود.

CDR یک حلقه قفل فاز (PLL) است که سیگنال ساعت را از داده‌های دریافتی استخراج می‌کند. سپس سیگنال ساعت بازیابی شده برای زمان بندی داده‌های ورودی سریالی و عملیات مربوطه استفاده می‌شود. نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ PLL در فرکانس ساعت کار می‌کند و در فرکانس داده‌های ورودی قفل می‌شود. PLL به صورت فیلتر و مدار بازسازی سیگنال برای تولید یک سیگنال ساعت تمیز از سیگنال دریافتی تخریب شده عمل می‌کند.

مدار سریال‌ساز / سریال گشا^{۴۳} (SERDES) داده‌های سریالی را به موازی تبدیل می‌کند و کلمات داده‌ای را از هم جدا می‌کند و آنها را به رابط ارسال می‌کند، جایی که آنها به کامپیوتر می‌ذینان یا تجهیزات دیگر متصل می‌شوند. مدارهای رابط الکتریکی گاهی اوقات موازی هستند اما ممکن است سریالی نیز باشند. یک کلمه ۱۶ بیتی رایج است.

در سمت فرستنده گیرنده، داده‌هایی که قرار است ارسال شوند معمولاً از یک دستگاه شبکه به صورت موازی از طریق رابط دریافت می‌شوند. داده‌های موازی توسط یک مدار سریال‌ساز / سریال گشا به داده‌های سریال تبدیل می‌شوند که به عنوان یک مالتی پلکسر عمل می‌کند که در آن کلمات موازی در یک دنباله سریالی برای انتقال قرار می‌گیرند. داده‌های سریالی از مالتی پلکسر توسط یک

^{۴۰} PostAmplifier (PA)

^{۴۱} Electronic Dispersion Compensation (EDC)

^{۴۲} Clock and Data Recovery (CDR)

^{۴۳} SERializer/DESerializer (SERDES)

سیگنال ساعت با نرخ انتقال مورد نظر کلک می‌شود.^{۴۴} یک نوسان ساز ساعت مرجع، معمولاً خارج از فرستنده گیرنده، با یک واحد ضرب کننده ساعت (CMU)^{۴۵} (CMU) تا نرخ کلک مورد نظر ضرب می‌شود. CMU یک PLL با یک تقسیم کننده فرکانس در مسیر بازخورد است که به عنوان یک ضرب کننده فرکانس استفاده می‌شود. سپس داده‌های سریالی به درایور لیزر (LD)، جایی که دیود لیزر مدوله شده مستقیم (DML)^{۴۶} (DML) را کار می‌کند، ارسال می‌شود. مدولاسیون مستقیم به سادگی به این معنی است که داده‌ها لیزر را خاموش و روشن می‌کنند تا ارسال شوند. در برخی از مژوول‌ها که از لیزرهای با توان و فرکانس بالاتر استفاده می‌کنند، داده‌های سریالی یک مدولاتور خارجی را هدایت می‌کند که به نوبه خود مسیر نور لیزر دائماً کار را قطع می‌کند. توجه داشته باشید که درایور لیزر و لیزر مدوله شده واحدی به نام مجموعه فرعی نوری انتقال را تشکیل می‌دهند.

در نهایت، اکثر فرستنده‌ها گیرنده‌ها دارای یک پایانه سریالی به نام پایانه I^3C ^{۴۷} هستند که برای نظارت بر شرایط خاص در مژوول (دما لیزر، ولتاژ تعذیه و غیره) و کنترل برخی از جنبه‌های مژوول استفاده می‌شود.

در طول سال‌ها، انواع مختلفی از این زیرمجموعه‌ها توسط سازندگان مختلف ساخته شده است. این به مشکلات اتصال و قابلیت همکاری منجر شده است، به این معنی که واحدهای سازنده‌های مختلف نمی‌توانند با یکدیگر استفاده شوند. عدم استانداردسازی به این معنی بود که هیچ منبع دومی از محصولات ممکن نبود. نتیجه این است که سازندگان فرستنده‌های نوری و تجهیزات شبکه گرد هم آمداند تا اندازه‌های فرستنده نوری، ویژگی‌های مکانیکی، ویژگی‌های الکتریکی و کانکتورها را استاندارد کنند. مجموعه‌ای از استانداردها به نام توافق نامه‌های چند منبعی (MSA)^{۴۸} (MSA) پدید آمده است. رایج‌ترین انواع فرستنده گیرنده که به صورت مژوول‌های نوری شناخته می‌شوند، در زیر فهرست شده‌اند.

- 300-pin. پرکاربردترین فرمت و استاندارد. بین سیگنال‌های الکتریکی ۱۶ بیتی ۶۲۲/۰۸ مگابیت بر ثانیه و سیگنال‌های نوری ۱۰ گیگابیت بر ثانیه تبدیل می‌کند. شکل (۴۰.۱۹). برای سیستم SONET، کلمات ۱۶ بیتی با نرخ ۶۲۲/۰۸ مگاهرتز عرضه می‌شوند و با سرعت ۱۶ برابر بیشتر یا ۹۵۳ گیگابیت بر ثانیه به داده‌های سریالی تبدیل می‌شوند. این نرخ سریالی معمولاً گرد شده و به صورت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه بیان می‌شود. رابط الکتریکی استانداردی به نام SPI-4 است که توسط بنیاد کار اینترنتی نوری (OIF)^{۴۹} (OIF) یا XSBI نامیده می‌شود که توسط IEEE توسعه یافته است. مسیرهای داده برای کلمات ۱۶ بیتی هستند و از اتصال دیفرانسیلی دو سیمه استفاده می‌شود.

- QSFP. این یک مژوول قابل اتصال چهار شکل کوچک است که برای پشتیبانی از چهار کanal ۱۰ گیگابیت بر ثانیه طراحی شده است و برای اترنت ۴۰ گیگابیت در ثانیه، SONET/SDH کanal فیبر و اینفینیتی‌باند^{۵۰} مناسب است. یک مژوول QSFP+ چهار کanal ۲۸ گیگابیت بر ثانیه

^{۴۴} Clock Multiplier Unit (CMU)

^{۴۵} Laser Driver (LD)

^{۴۶} Directly Modulated Laser (DML)

^{۴۷} MultiSource Agreement (MSA)

^{۴۸} Optical Internetworking Foundation (OIF)

^{۴۹} Infiniband

را ارائه می‌دهد.

- فرم کوچک فرم SFF. یک مژول توسعه یافته برای کاربردهای نوری با سرعت پایین در محدوده ۱-، ۲- و ۴-Gbps

• فرم کوچک قابل اتصال. مژولی از برنامه‌های کاربردی ۱-، ۲- یا ۴-Gbps "قابل اتصال" است، بهاین معنی که از اتصال دهنده‌های کابل فیبر نوری به جای پیوندهای کوتاه استفاده شده با مژول‌های SFF استفاده می‌کند. مژول‌ها همچنین «قابل اتصال گرم» هستند، بهاین معنی که ممکن است با روش بودن به سیستم وارد شوند یا از آن خارج شوند. مدارهای آنها از گذرا و موج‌هایی که ممکن است در طول اتصال گرم رخ دهد محافظت می‌شوند.

• SFP+. این یک مژول قابل اتصال با فاکتور کوچک پیشرفته است. سرعت داده تا ۱۰ گیگابیت بر ثانیه را پشتیبانی می‌کند و با اترنت ۱۰ گیگابیت در ثانیه، کانال فیبر ۸ گیگابیت در ثانیه و OTN OTU2 سازگار است.

• استانداردی برای یک سیستم نوری ۱۰ گیگابیت بر ثانیه با استفاده از رابط الکتریکی استاندارد اترنت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه واسطه واحد پیوست (XAUI). (توجه: X یک عدد رومی برای ۱۰ است). رابط XAUI از چهار کانال الکتریکی سریالی ۳/۱۲۵ گیگابیت بر ثانیه برای دستیابی به حداقل سرعت داده $12/5 = 4 \times 3/125$ گیگابیت بر ثانیه استفاده می‌کند. این نرخ ناخالص اپتیکال سریالی در سیستم‌های اترنت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه است. نرخ خالص ۱۰ گیگابیت در ثانیه است، اما به دلیل ویژگی تصحیح خطا ۸B/10B این پروتکل، بیت‌های اضافی باعث می‌شوند که نرخ ناخالص با ضریب $10/8 = 12/5$ بیشتر شود: ۱۰ گیگابیت بر ثانیه.

• X2. این استاندارد شبیه XENPAK است اما بسته کوچکتر و پیچیده‌تری است زیرا نیازی به اتلاف حرارت زیاد معمول در مژول‌های XENPAK ندارد. X2 در برنامه‌های کاربردی با دسترسی کوتاه‌تر استفاده می‌شود.

• XFP فرم فاکتور کوچک ۱۰ گیگابیت بر ثانیه قابل اتصال. از تبدیل سریال به موازی یا موازی به سریال استفاده نمی‌کند. رابط الکتریکی یک رابط سریال استاندارد ۱۰ گیگابیت بر ثانیه است که به عنوان XFI شناخته می‌شود. محدوده فرکانس ورودی و خروجی $9/95$ تا $10/7$ گیگابیت بر ثانیه است.

• XPAK. این یک نسخه کوچکتر از یک مژول XENPAK برای رسیدن به ۱۰ کیلومتر است.

اکثر این مژول‌ها بر روی برنامه‌های کاربردی ۱۰ گیگابیت بر ثانیه تمرکز می‌کنند که شامل SONET، اترنت و کانال فیبر می‌شود. هر کدام بسته به استاندارد، استفاده از FEC یا عدم استفاده از FEC، نوع FEC و سایر عوامل، نرخ داده کمی متفاوت دارند. با این حال، مژول‌ها اساساً «پروتکل-آگنوستیک» هستند، به این معنی که می‌توانند هر استاندارد یا پروتکلی را مدیریت کنند. مژول‌ها نیز به طور کلی بر اساس برد یا دسترسی سیگنال‌های نوری طبقه بندی می‌شوند. دسته بندی‌های اساسی بقرار زیر هستند:

دسترسی بسیار کوتاه (VSR) - ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر یا کمتر

دسترسی کوتاه (SR) - ۲ کیلومتر
 دسترسی متوسط (IR) - ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر
 دسترسی طولانی (LR) - ۴۰ تا ۸۰ کیلومتر
 دسترسی بسیار طولانی (VLR) - ۱۲۰ کیلومتر

ماژول‌های SR و VSR از لیزرهای ۸۵۰ نانومتری استفاده می‌کنند. برخی از ماژول‌های SR و LR از لیزرهای ۱۳۱۰ نانومتری استفاده می‌کنند. ماژول‌های LR و VLR از لیزرهای ۱۵۵۰ نانومتری استفاده می‌کنند.

ملاحظات عملکرد

مهمترین ویژگی در یک سیستم ارتباطی فیبر نوری، نرخ داده، یعنی سرعت پالس‌های نوری است. بهترین سیستم‌ها از دیودهای لیزر تزریقی پرقدرت و آشکارسازهای APD استفاده می‌کنند. این ترکیب می‌تواند نرخ داده چند میلیارد (گیگا) بیت در ثانیه (bps) تولید کند. این نرخ به عنوان نرخ گیگابیت شناخته می‌شود. بسته به برنامه، سرعت داده می‌تواند از حدود ۲۰ مگابیت در ثانیه تا ۴۰ گیگابیت در ثانیه باشد.

عملکرد یک سیستم کابل فیبر نوری معمولاً با محصول نرخ بیت - فاصله نشان داده می‌شود. این رتبه‌بندی سریع‌ترین نرخ بیتی را که می‌توان از طریق یک کابل ۱ کیلومتری به دست آورد، نشان می‌دهد. سیستمی با امتیاز $100 \text{ Mbps} \cdot \text{km}$ می‌باشد. این یک رقم ثابت است و حاصل ضرب مگابیت بر ثانیه و مقادیر کیلومتر است. اگر فاصله افزایش یابد، نرخ بیت به نسبت کاهش می‌یابد. در سیستم فوق، در ۲ کیلومتر سرعت به ۵۰ مگابیت در ثانیه کاهش می‌یابد. در ۴ کیلومتر سرعت ۲۵ مگابیت بر ثانیه وغیره است.

نرخ بالای داده نیز توسط ضریب پاشندگی محدود می‌شود. زمان صعود و سقوط پالس دریافتی به میزانی برابر با مقدار پاشندگی افزایش می‌یابد. اگر ضریب پاشندگی 10 ns/km باشد، در یک فاصله ۲ کیلومتری، زمان خیز و سقوط هر کدام 20 ns افزایش می‌یابد. نرخ داده هرگز نمی‌تواند بیشتر از فرکانس مربوط به مجموع زمان‌های افزایش و سقوط در گیرنده باشد.

یک فرمول مفید برای تعیین حداکثر سرعت داده R بر حسب مگابیت بر ثانیه (Mbps) برای یک مسافت معین D بر حسب کیلومتر کابل با ضریب پاشندگی d ، که بر حسب میکروثانیه در هر کیلومتر $(\mu\text{s}/\text{km})$ داده شده است.

$$R = \frac{1}{5dD}$$

طول کابل ۸ کیلومتر و ضریب پاشندگی 10 ns/km یا 10 \mu s/km را فرض کنید:

$$R = \frac{1}{5(0.01)(8)} = \frac{1}{0.04} = 25 \text{ Mbps}$$

این رابطه فقط یک تقریب است، اما روشی مفید برای پیش‌بینی محدودیت‌های سیستم است.

مثال ۳-۱۹

اندازه‌گیری بر روی یک کابل فیبر نوری به طول ۱۲۰۰ فوت انجام می‌شود. حد فرکانس بالای آن ۴۳ مگابیت بر ثانیه تعیین شده است. ضریب پاشندگی d چیست؟

$$1 \text{ km} = 3277 \text{ ft}$$

$$D = ۱۲۰۰ \text{ ft} = \frac{۱۲۰۰}{۳۲۷۴} = ۰,۳۶۷ \text{ km}$$

$$R = \frac{1}{5dD} = \frac{1}{5(۴۳ \times 10^6)(0,367)} = ۱۲,۷ ns/km$$

بودجه توان

بودجه توان^{۵۰}، که گاهی اوقات بودجه شار^{۵۱} نامیده می‌شود، حسابداری از تمام تضعیف‌ها و دستاوردهای یک سیستم فیبر نوری است. بهره باید بیشتر از تلفات باشد تا سیستم کار کند. طراح باید تعیین کند که آیا مقدار کافی از توان نور به‌گیرنده می‌رسد یا خیر. آیا گیرنده با توجه به‌توان خروجی فرستنده و تمام کابل و سایر تلفات، به‌اندازه حساسیت ورودی آن نور دریافت می‌کند؟

تلفات : منابع متعددی برای تلفات در یک سیستم کابل فیبر نوری وجود دارد:

۱. تلفات کابل. اینها بسته به نوع کابل و طول آن متفاوت است. برد از کمتر از ۱ دسی‌بل در کیلومتر تا ده‌ها دسی‌بل در هر کیلومتر است.

۲. اتصالات بین کابل و منبع نور و آشکارساز نور. اینها بسته به نحوه ساخت آنها بسیار متفاوت است. امروزه ضمیمه‌ای توسط سازنده بیان می‌شود که ضریب تلفات را مشخص می‌کند. مجموعه بددست آمده دارای یک کانکتور برای اتصال به کابل است. چنین پایانه‌هایی می‌توانند تضعیف‌های ۱ تا ۶ دسی‌بل را ایجاد کنند.

۳. اتصالات. علی‌غم دقت آنها، کانکتورها هنوز تلفات ایجاد می‌کنند. اینها معمولاً از ۵٪ تا ۲ دسی‌بل کار می‌کنند.

۴. پیوند. اگر بدرستی انجام شود، اتصال ممکن است تنها چند دهم دسی‌بل کاهش یابد. اما اگر اتصال اشتباه انجام شود، مقدار می‌تواند بسیار بیشتر، تا چندین دسی‌بل باشد.

۵. خمش کابل‌ها. اگر یک کابل فیبر نوری با زاویه خیلی زیاد خم شود، پرتوهای نور تحت مجموعه‌ای از شرایط داخلی به‌شدت تغییر می‌کنند. انکاس کلی داخلی دیگر موثر نخواهد بود، زیرا زاویه‌ها به‌دلیل خمیدگی تغییر کرده‌اند. نتیجه این است که مقداری از نور در اثر شکست در روکش از بین می‌رود. اگر شعاع خمی ۱۰۰۰ برابر بیشتر از قطر کابل باشد، تلفات حداقل خواهد بود. کاهش شعاع خم شدن به کمتر از حدود ۱۰۰ برابر قطر کابل باعث افزایش تضعیف می‌شود. شعاع خمی نزدیک به ۱۰۰ تا ۲۰۰ برابر قطر کابل می‌تواند باعث شکستگی کابل یا آسیب داخلی شود.

تمام تلفات فوق بسته به سخت افزار مورد استفاده بسیار متفاوت خواهد بود. مشخصات سازنده را برای هر قطعه بررسی کنید تا مطمئن شوید که اطلاعات درستی دارید. سپس به‌عنوان یک فاکتور ایمنی، ۵ تا ۱۰ دسی‌بل تلفات را اضافه کنید. این عامل احتمالی خسارات اتفاقی را که قابل پیش‌بینی نیست پوشش می‌دهد.

محاسبه بودجه : تلفات در برابر نور تولید شده توسط LED یا ILD عمل می‌کند. ایده این است که از یک توان نور به‌اندازه کافی برای دادن مقدار توان دریافتی بیش از حداقل حساسیت گیرنده با تلفات در سیستم استفاده شود.

^{۵۰} Power Budget

^{۵۱} Flux Budget



در حالی که کابل فیبر نوری همانطور که در اینجا نشان داده شده است، نور مرئی را حمل می‌کند، در عمل، فناوری‌های شبکه از نور مادون قرمز (IR) استفاده می‌کنند که برای چشم انسان نامرئی است.

سیستمی را با مشخصات زیر فرض کنید:

۱. قدرت خروجی LED فرستنده نور: $30 \mu W$

۲. حساسیت گیرنده نور: $1 \mu W$

۳. طول کابل: ۶ کیلومتر

۴. تضعیف کابل: $3 dB/km$ ، $18 dB = 6 \times 3$ در کل

۵. چهار کانکتور: تضعیف هر کدام 8% دسیبل، $2 \times 0.8 = 3.2$ دسیبل کل

۶. تلفات LED به کانکتور: ۲ دسیبل

۷. تلفات اتصال به آشکارساز نوری: ۲ دسیبل

۸. پاشندگی کابل: $8 ns/km$

۹. سرعت داده: ۳ مگابیت بر ثانیه

ابتدا تمام تلفات را محاسبه کنید. تمام عوامل کاهش دسیبل را اضافه کنید.

$$25/2 + 2 + 2 + 3/2 = 29/2 \text{ dB}$$

همچنین یک ضریب احتمالی ۴ دسیبل را اضافه کنید، و مجموع تلفات را به $25/2 + 4 = 29/2$ یا دسیبل تبدیل کنید. چه افزایش قدرتی برای غلبه بر این تلفات لازم است؟

$$dB = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

که در آن P_t توان ارسالی و P_r توان دریافتی است

$$29/2 dB = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

بنابراین

$$\frac{P_t}{P_r} = 10^{dB/10} = 10^{29/2} = 831/8$$

اگر P_t برابر $30 \mu W$ باشد

$$P_r = \frac{30}{831/8} = 0.036 \mu W$$

بر این اساس، توان دریافتی $0.036 \mu W$ خواهد بود. حساسیت گیرنده تنها ۱ میکرووات است. سیگнал دریافتی زیر آستانه گیرنده است. این مشکل ممکن است به کمی از سه راه حل شود:

۱. قدرت فرستنده را افزایش دهید.
۲. گیرنده حساس‌تری تهیه کنید.
۳. یک تکرار کننده اضافه کنید.

در طراحی اولیه، مشکل با افزایش توان فرستنده و/یا افزایش حساسیت گیرنده حل می‌شود. از نظر تئوری می‌توان از یک کابل کم تلفات نیز استفاده کرد. در فواصل کوتاه، تکرار کننده یک هزینه غیر ضروری است. بنابراین، استفاده از تکرار کننده گزینه خوبی نیست.

فرض کنید که توان خروجی فرستنده به ۱ میلی‌وات یا 1000 mW میکرووات افزایش یافته است. قدرت دریافتی جدید پس از آن برابر است با:

$$P_r = \frac{1000}{831/8} = 1/2 \mu W$$

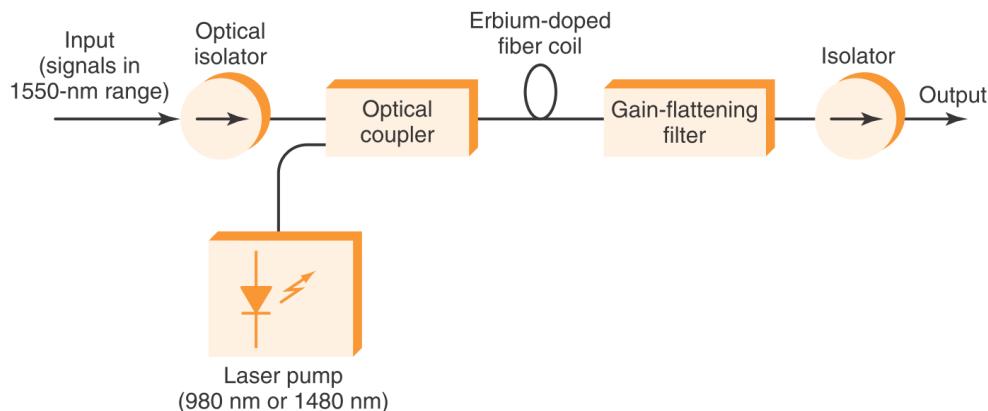
این کمی بیش از آستانه حساسیت گیرنده است. اکنون می‌توانیم فرکانس یا نرخ داده بالاتر را تعیین کنیم.

$$R = \frac{1}{dD} = \frac{1}{5(0.008)(6)} = 4,1666 Mbps$$

این بالاتر از نرخ داده پیشنهادی ۳ مگابیت در ثانیه است، بنابراین سیستم باید کار کند. **بازسازی و تقویت**: راه‌های مختلفی برای غلبه بر تضعیف سیگнал هنگام عبور از کابل فیبر نوری وجود دارد. اول استفاده از انواع جدیدتر کابل است که ذاتاً تلفات کمتر و اثرات پاشندگی کمتری دارند. روش دوم استفاده از بازسازی است. بازسازی فرآیند تبدیل سیگнал نوری ضعیف به معادل الکتریکی آن، سپس تقویت و تغییر شکل آن به صورت الکترونیکی و ارسال مجدد آن بر روی لیزر دیگری است. این فرآیند به طور کلی به صورت تبدیل نوری-الکتریکی-نوری (OEO) شناخته می‌شود. این

^{۵۲} Optical-Electrical-Optical (OEO)

یک فرآیند پرهزینه است، زیرا در اکثر سیستم‌ها بازسازی تقریباً در هر 40° کیلومتر مسافت، حتی با کابل‌های جدیدتر با تضعیف کمتر ضروری است. این فرآیند بهویژه در سیستم‌های چند فرکانسی مانند مالتی پلکس تقسیم طول موج متراکم^{۵۳} (DWDM)، که در آن بسیاری از سیگنال‌ها باید تحت تبدیل OEO قرار گیرند، گران است.



شکل ۴۱.۱۹: تقویت کننده فیبر ناخالص شده با اربیوم.

روش سوم و بهترین روش استفاده از تقویت کننده‌های نوری سطح سیگنال را بدون تبدیل OEO افزایش می‌دهند. یک تقویت کننده نوری معمولی تقویت کننده فیبر ناخالص شده با اربیوم^{۵۴} (EDFA) است که در شکل (۴۱.۱۹) نشان داده است. سیگنال ورودی نوری ضعیف برای جلوگیری از انعکاس سیگنال به‌یک جداکننده نوری اعمال می‌شود. سپس این سیگنال به‌یک ترکیب کننده نوری اعمال می‌شود که به صورت خطی سیگنال تقویت شده را با سیگنال تولید شده توسط پمپ دیود لیزر داخلی مخلوط می‌کند. پمپ لیزر در فرکانس بالاتر (طول موج کمتر) نسبت به طول موج سیگنال‌هایی که قرار است تقویت شوند کار می‌کند. اگر سیگنال‌های 155° نانومتری تقویت شوند، لیزر پمپ در 980° یا 1480° نانومتر کار می‌کند.

سیگنال‌های ترکیبی سپس به سیم پیچی طویل فیبر نوری که به‌شدت با یون‌های اربیوم ناخالص شده است، تعذیه می‌شود. (اربیوم یکی از عناصر خاکی کمیاب است). سیگنال پمپ لیزری اتم‌های اربیوم را به حالت انرژی بالاتر برانگیخته می‌کند. هنگامی که فوتون‌های تولید شده توسط سیگنال ورودی از فیبر اربیوم عبور می‌کنند، با اتم‌های اربیوم برانگیخته تعامل کرده و باعث می‌شوند که آنها به حالت عادی خود آرام شوند. در طول این فرآیند، فوتون‌های اضافی در طول موج سیگنال‌های ورودی آزاد و در نتیجه تقویت می‌شوند. یک EDFA واحد افزایشی در محدوده ۱۵ تا 20° دسی‌بل تولید می‌کند. هنگامی که دو تقویت کننده با لیزرهای پمپ مستقل و سیم‌پیچ‌های فیبر ناخالص شده آبشاری شوند، بهره‌ترکیبی تا 35° دسی‌بل امکان پذیر است. با چنین تقویتی، سیگنال‌ها را می‌توان در فاصله تقریباً 200° کیلومتری بدون بازسازی OEO ارسال کرد.

^{۵۳}Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

^{۵۴}Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

خوب است بدانید که:

یک پمپ لیزری از سیم پیچی از فیبر ناخالص شده با اربیوم برای آزاد کردن فوتون‌های اضافی در همان فرکانس فوتون‌های ورودی استفاده می‌کند.

۵.۱۹ مولتی‌پلکس تقسیم طول موج

داده‌ها به‌آسانی بر روی کابل فیبر نوری با استفاده از مالتی‌پلکس تقسیم زمان (TDM)، مانند سیستم T1 یا سیستم SONET که در ادامه این فصل توضیح داده شد، مالتی‌پلکس می‌شوند. با این حال، پیشرفت‌ها در اجزای نوری استفاده از مالتی‌پلکس تقسیم فرکانس (FDM) را در کابل فیبر نوری (به نام مالتی‌پلکس تقسیم طول موج^{۵۵} یا WDM) ممکن می‌سازد، که به کانال‌های متعدد داده اجزه می‌دهد تا روی پهنه‌ی باند موج نور کابل کار کنند.

مالتی‌پلکس تقسیم طول موج، نام دیگری برای مالتی‌پلکس تقسیم فرکانس، به‌طور گسترده در سیستم‌های رادیویی، تلویزیونی و تلفنی استفاده شده است. بهترین مثال امروزی، مالتی‌پلکس شدن ده‌ها سیگنال تلویزیونی روی یک کابل کواکسیال مشترک است که وارد خانه می‌شود.

در WDM، فرکانس‌ها یا «رنگ‌های» متفاوتی از نور مادون قرمز برای انتقال جریان‌های داده جداگانه استفاده می‌شود. اینها ترکیب شده و روی یک فیبر واحد حمل می‌شوند. اگرچه فرکانس به‌عنوان یک پارامتر بیشتر برای تشخیص مکان سیگنال‌های بی‌سیم زیر ۳۰۰ گیگاهرتز استفاده می‌شود، در فرکانس‌های نور پارامتر طول موج معیار ترجیحی است.

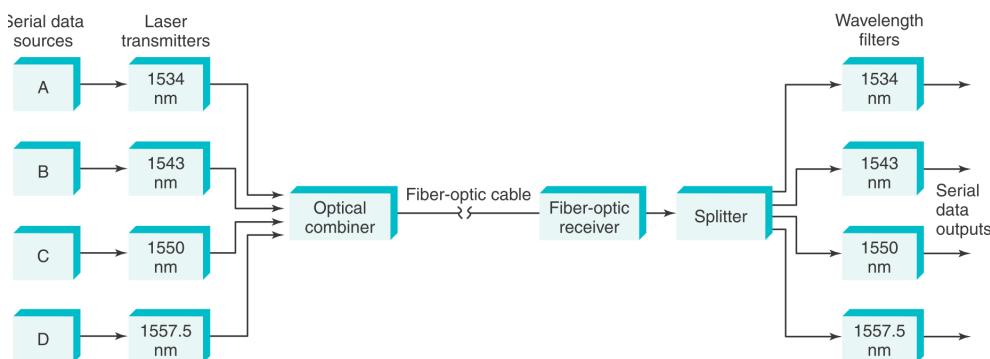
به‌باد داشته باشید که رابطه بین طول موج λ بر حسب متر و فرکانس f برابر $f = c/\lambda$ است که c سرعت نور در خلاء یا 10^8 m/s است. سرعت نور در کابل فیبر کمی کمتر از آن یا حدود $2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ بر ثانیه است. طول موج نوری معمولاً بر حسب نانومتر یا میکرومتر بیان می‌شود. فرکانس‌های نوری بر حسب تراهرتز (THz) یا 10^{12} هرتز بیان می‌شوند.

داده‌هایی که باید در یک شبکه فیبر نوری منتقل شوند برای مدولاسیون (توسط OOK یا ASK) یک نور مادون قرمز تولید شده توسط لیزر استفاده می‌شود. سیگنال‌های مادون قرمز بدبهترین وجه با ویژگی‌های حامل نور کابل فیبر نوری مطابقت دارند، که دارای پاسخ تضعیف به نور مادون قرمز به‌طوری که کمترین تضعیف (حدود ۰٪ دسی‌بل بر کیلومتر) در دو باند فرکانس باریک، یکی در مرکز ۱۳۱۰ نانومتر و دیگر در ۱۵۵۰ نانومتر است.

مالتی‌پلکس تقسیم طول موج درشت

اولین سیستم‌های WDM درشت (CWDM) از دو کانال در طول موج‌های ۱۳۱۰ و ۱۵۵۰ نانومتر استفاده کردند. بعدها، چهار کانال داده مالتی‌پلکس شدند. شکل (۴۲.۱۹) یک سیستم CWDM را نشان می‌دهد. یک منبع داده سریالی جداگانه هر لیزر را کنترل می‌کند. منبع داده ممکن است یک منبع داده واحد یا یک منبع TDM چندگانه باشد. سیستم‌های فعلی از نور در محدوده ۱۵۵۰ نانومتر استفاده می‌کنند. یک سیستم معمولی چهار کاناله از طول موج‌های لیزری ۱۵۴۳، ۱۵۴۴، ۱۵۵۰ و ۱۵۵۷/۴ نانومتر استفاده می‌کند. هر لیزر با داده‌های ورودی خاموش و روشن می‌شود. پرتوهای لیزر

^{۵۵}Wavelength Division Multiplexing (WDM)



شکل ۴۲.۱۹: سیستم فیبر نوری CWDM.

سپس به صورت نوری ترکیب شده و از طریق یک کابل تک فیبر منتقل می‌شوند. در انتهای دریافت کابل، از فیلترهای نوری ویژه‌ای برای جدا کردن پرتوهای نور به کانال‌های جداگانه استفاده می‌شود. هر پرتو نور با یک حسگر نوری شناسایی شده و سپس در چهار جریان داده فیلتر می‌شود.

مالتی‌پلکس تقسیم طول موج متراکم

مالتی‌پلکس با تقسیم طول موج متراکم^{۵۶} (DWDM) به استفاده از ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴ یا بیشتر کanal داده در یک فیبر اشاره دارد. طول موج کانال استاندارد توسط اتحادیه بین المللی مخابرات^{۵۷} (ITU) بین ۱۵۲۵ تا ۱۵۶۵ نانومتر با فاصله کانال ۱۰۰ گیگاهرتز (تقریباً ۰/۸ نانومتر) تعریف شده است. بلوك کانال‌های بین ۱۵۲۵ تا ۱۵۶۵ نانومتر را باند C یا معمولی می‌گویند. اکثر فعالیت‌های DWDM در حال حاضر در باند C رخ می‌دهد. بلوك دیگری از طول موج‌های ۱۵۷۰ تا ۱۶۱۰ نانومتر باند طول موج بلند یا باند L نامیده می‌شود. طول موج‌های ۱۵۲۵ تا ۱۵۳۸ نانومتر باند S را تشکیل می‌دهند.

سیستم‌های DWDM کنونی اجازه می‌دهند تا بیش از ۱۶ کانال داده جداگانه روی یک فیبر واحد با سرعت داده تا ۴۰ گیگابیت در ثانیه حمل شوند که ظرفیت کلی $40 \times 16 = 640$ گیگابیت در ثانیه (۶/۴ ترابیت بر ثانیه) را ارائه می‌کند. پتانسیل سیستم‌های آینده بیش از ۲۰۰ کانال در هر فیبر با سرعت داده ۴۰ گیگابیت بر ثانیه است. حتی کانال‌های بیشتری را می‌توان روی یک فیبر منفرد منتقل کرد زیرا فیلترها و اجزای نوری بهتری به نام اسپلیتر (جداسازی) در دسترس قرار می‌گیرند تا فاصله کانال‌های ۲۵، ۵۰، ۱۲۵ گیگاهرتز را فراهم کنند.

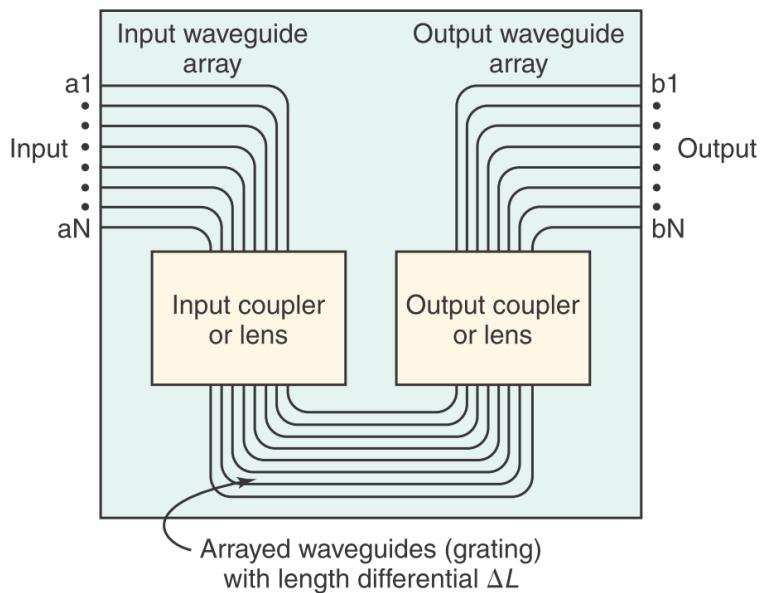
اجزای کلیدی در یک سیستم DWDM مالتی‌پلکس و دی‌مولتی‌پلکس و لیزرهای چندموجی هستند که در جای دیگر این فصل مورد بحث قرار گرفته‌اند. روش‌های متعددی در طول سال‌ها برای افزودن و جداسازی سیگنال‌های نوری توسعه یافته‌اند. می‌توان از کوپلهای نوری برای مالتی‌پلکس کردن استفاده کرد و فیلترهای نوری مانند توری‌های فیبر برآگ یا لایه‌های نازک را می‌توان برای مالتی‌پلکسینگ استفاده کرد. اما یکی از روش‌هایی که به نظر می‌رسد به عنوان محبوب‌ترین روش در حال ظهرور است، توری موجبر آرایه‌ای^{۵۸} (AWG) است. این دستگاه آرایه‌ای از موجبرهای نوری با

^{۵۶}Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM)

^{۵۷}International Telecommunications Union (ITU)

^{۵۸}Arrayed Waveguide Grating (AWG)

طول‌های مختلف است که با سیلیسیم (SiO_2) روی یک تراشه سیلیکونی ساخته شده است و می‌توان از آن هم برای مالتی‌پلکس و هم برای دی‌مالتی‌پلکس استفاده کرد.



شکل ۴۳.۱۹: مفهوم کلی توری موجبر آرایه‌ای.

شکل (۴۳.۱۹) مفهوم AWG را نشان می‌دهد. ورودی‌های متعدد به یک حفره یا ناحیه کوپلر وارد می‌شوند که به صورت عدسی عمل کرده تا ورودی‌ها را به هر یک از موجبرها به طور مساوی تقسیم کنند. هر موجبر در توری دارای طول L است که با همسایه خود ΔL متفاوت است. این باعث ایجاد اختلاف فاز در پرتوهایی می‌شود که از توری‌ها به داخل حفره خروجی می‌آیند.

حفره خروجی به صورت عدسی عمل کرده تا پرتوها را از تمام موجبرهای توری روی آرایه موجبر خروجی مجددًا متمرکز کند. هر خروجی حاوی ورودی‌های چندگانه است. برای دی‌مولتی‌پلکسینگ، سیگنال ورودی تک طول موجی به هر یک از ورودی‌هایی که سیگنال‌های طول موج‌های مختلف از طریق توری منتشر می‌شوند، اعمال می‌شود. گریتینگ (توری) به عنوان فیلترهای متعدد عمل کرده تا سیگنال‌ها را به مسیرهای جداگانه‌ای که در خروجی‌های متعدد ظاهر می‌شوند، جدا کند.

توری موجبر آرایه‌ای محبوب هستند زیرا تولید آنها با فرآیندهای نیمه‌هادی استاندارد نسبتاً آسان است و آنها را بسیار ارزان می‌کنند. آنها افت عبوری بسیار کم و هم‌شناوی کم دارند. یک واحد معمولی دارای ۳۲ یا ۴۰ ورودی و ۳۲ یا ۴۰ خروجی با فاصله ۱۰۰ گیگاهرتز در طول موج‌های شبکه ITU است. برخی از محصولات تا ۶۴ کانال ورودی و خروجی دارند و دستگاه‌هایی با تعداد کانال‌های بالاتر در دست توسعه هستند. افت عبوری AWG در محدوده ۲ تا ۴ دسی‌بل با ۲۰ تا ۳۰ دسی‌بل تضعیف هم‌شناوی کانال مجاور است.

۶.۱۹ شبکه‌های نوری غیرفعال

کاربردهای اولیه برای شبکه‌های فیبر نوری در شبکه‌های گستردۀ مانند خدمات تلفن راه دور و ستون فقرات اینترنت است. با افزایش سرعت و کاهش قیمت‌ها، فناوری فیبر نوری در شبکه‌های شهری، شبکه‌های ذخیره‌سازی^{۵۹} (SAN) و شبکه‌های محلی به کار گرفته شده است. پرکاربردترین این فناوری‌ها - SONET، اترنت و کانال فیبر - در فصل‌های قبلی مورد بحث قرار گرفته‌اند.

یک سیستم فیبر نوری جدیدتر و در حال رشد، شبکه نوری غیرفعال^{۶۰} (PON)، نوعی فناوری شبکه شهری است. این فناوری به عنوان فیبر به خانه^{۶۱} (FTTH) نیز نامیده می‌شود. اصطلاحات مشابه فیبر به محل یا فیبر به حاشیه شهر است که به عنوان FTTx یا FTTC تعیین می‌شود. اصطلاح FTTx استفاده می‌شود که x نشان دهنده مقصد است. PON در حال حاضر به طور گستردۀ در ژاپن و کره استفاده می‌شود. اینجا در ایالات متحده، هم T&AT (سابق SBC) و هم Verizon در حال حاضر PON‌هایی در محل دارند و تعداد بیشتری در راه است.

مفهوم PON

اکثر شبکه‌های نوری از اجزای فعال برای انجام تبدیل‌های نوری به الکتریکی و الکتریکی به نوری^{۶۲} (OEO) در طول انتقال و دریافت استفاده می‌کنند. این تبدیل‌ها گران هستند زیرا هر کدام به یک زوج فرستنده گیرنده و منبع تغذیه مربوطه نیاز دارند. در فواصل طولانی، معمولاً ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر یا بیشتر، تکرار کننده‌ها یا تقویت کننده‌های نوری برای غلبه بر تضعیف، بازیابی قدرت سیگنال و تغییر شکل سیگنال ضروری هستند. این تکرار کننده‌ها و تقویت کننده‌های OEO مزاحم و همچنین گران و پر انرژی هستند. یکی از راه حل‌های این مسئله استفاده از شبکه نوری غیرفعال است. اصطلاح غیرفعال به هیچ تکرار کننده OEO، تقویت کننده یا هر دستگاه دیگری که از منبع تغذیه الکتریکی استفاده می‌کند، اشاره نمی‌کند. در عوض، فرستنده سیگنال را از طریق کابل شبکه می‌فرستد و یک گیرنده در مقصد آن را دریافت می‌کند. هیچ تکرار کننده یا تقویت کننده مداخله‌ای وجود ندارد. فقط از دستگاه‌های نوری غیرفعال مانند اسپلیترها (جدا کننده‌ها) و ترکیب کننده‌ها استفاده می‌شود. با استفاده از کابل فیبر نوری کم تلفات، لیزرها قدرتمند و گیرنده‌های حساس می‌توان بدون دخالت تجهیزات فعال به مسافتی تا حدود ۲۰ کیلومتر دست یافت. این PON‌ها را برای شبکه‌های شهری ایده‌آل است.

روش PON توسط اپراتورهای مخابراتی به عنوان وسیله انتخابی برای اتصالات اینترنت پهن باند بسیار پرسرعت آنها به مصرف کنندگان و مشاغل مورد استفاده قرار گرفته است. این شبکه‌های شهری بخشی از یک شهر یا منطقه‌ای با اندازه مشابه را پوشش می‌دهند. PON‌ها با اتصالات تلویزیون کابلی و DSL رقابتی خواهند بود اما سریعتر از هر دو. با استفاده از تکنیک‌های نوری، کاربر می‌تواند سرعت اتصال به اینترنت ۱۰۰ مگابیت در ثانیه تا ۱ گیگابیت در ثانیه یا بالاتر داشته باشد. این بسیار سریعتر از تلویزیون کابلی معمولی ۱ تا ۲۰ مگابیت بر ثانیه و اتصالات DSL است. و PON‌ها توزیع تلویزیون دیجیتالی را کاربردی تر می‌کنند. علاوه بر این، آنها پهنانی باند اضافی را برای انجام تماس‌های تلفنی اینترنتی (VoIP) فراهم می‌کنند.

^{۵۹}Storage Area Network (SAN)

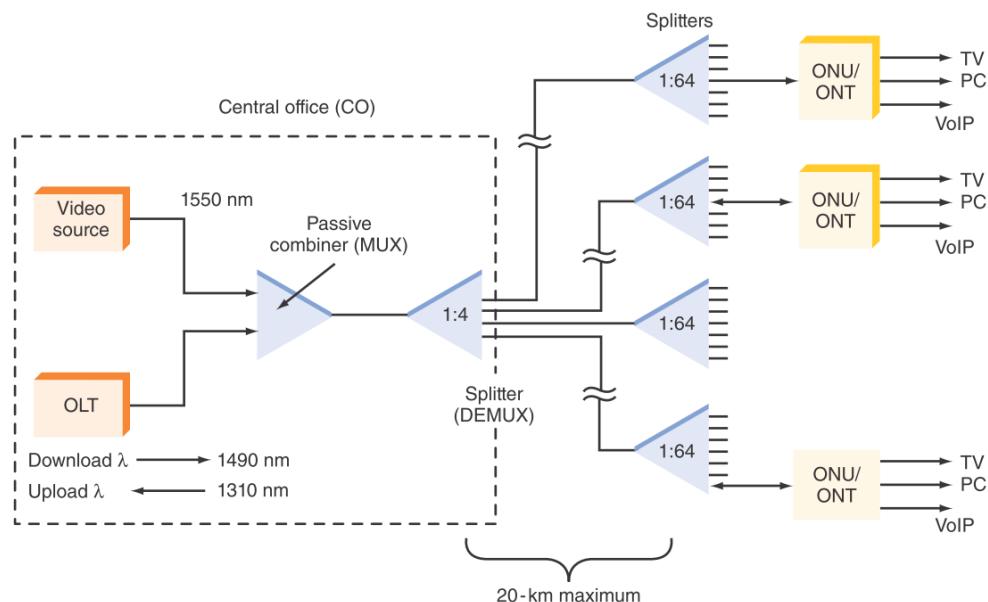
^{۶۰}Passive Optical Network (PON)

^{۶۱}Fiber ToThe Home (FTTH)

^{۶۲}Optical-to-Electrical and electrical-to-Optical (OEO)

فناوری‌های PON

انواع مختلفی از PON و استاندارد وجود دارد. اولین استاندارد، به نام APON، مبتنی بر بسته‌های ATM بود و دارای سرعت‌های $155/52$ و $622/08$ مگابیت بر ثانیه بود. نسخه پیشرفته‌تر به نام BPON دارای سرعت انتقال داده تا $1/25$ گیگابیت در ثانیه است. جدیدترین نسخه یک سوپر مجموعه BPON است که GPON نامیده می‌شود و برای Gigabit PON است. سرعت دانلود تا $2/5$ گیگابیت بر ثانیه و سرعت آپلود تا $1/25$ گیگابیت بر ثانیه را فراهم می‌کند. یکی از ویژگی‌های کلیدی GPON این است که از کپسوله‌سازی استفاده می‌کند، تکنیکی که آن را به پروتکل آگنوستیک تبدیل می‌کند. هر نوع پروتکل داده از جمله TDM (مانند T1 یا SONET) یا اترنت قابل انتقال است.



شکل ۴۴.۱۹: یک شبکه نوری غیرفعال (PON) که به عنوان اتصال اینترنت پرسرعت و برای توزیع تلویزیون در فیبر به سیستم‌های خانگی استفاده می‌شود.

شکل (۴۴.۱۹) بلوك دیاگرام اصلی یک شبکه BPON/GPON را نشان می‌دهد. دفتر مرکزی^{۶۳} (CO) به عنوان ارائه‌دهنده خدمات اینترنت (ISP)، تامین‌کننده تلویزیون یا حامل تلفن بر حسب مورد عمل می‌کند. تجهیزات موجود در دفتر مرکزی حامل (CO) به عنوان پایانه خط نوری^{۶۴} (OLT) نامیده می‌شود. این یک سیگنال در 1490 نانومتر برای انتقال (دانلود) به پایانه‌های راه دور ایجاد می‌کند. این سیگنال تمام داده‌های اینترنت و هر سیگنال صوتی را مانند IP (Voice over IP) حمل می‌کند. اگر تلویزیون مخابره شود، روی یک لیزر 1550 نانومتری مدوله می‌شود. خروجی‌های 1490 و 1550 نانومتر در یک ترکیب‌کننده غیرفعال مخلوط یا اضافه می‌شوند تا یک سیگنال تقسیم طول موج درشت چندگانه (CWDM) ایجاد کنند. سپس این سیگنال اصلی ب یک تقسیم کننده غیرفعال فرستاده می‌شود که سیگنال را به چهار سطح توان مساوی برای انتقال در قسمت اول شبکه

^{۶۳}Central office (CO)

^{۶۴}Optical Line Terminal (OLT)

تقسیم می‌کند. در BPON سرعت داده ۶۲۲ مگابیت بر ثانیه یا $1/25$ گیگابیت در ثانیه است اما با GPON $2/5$ گیگابیت در ثانیه است.

اسپلیترهای (جدا کننده) اضافی در طول مسیر برای تقسیم بیشتر سیگنال‌ها برای توزیع به خانه‌های متعدد استفاده می‌شود. اسپلیترها برای تقسیم توان بر $1 : 2, 4 : 1, 8 : 1, 16 : 1, 32 : 1, 64 : 1$ است. OLT می‌تواند به 64 مقصد تا حدود 20 کیلومتر ارسال کند. حد بالایی 16 دستگاه باشد بسته به محدوده درگیر ممکن است. فقط بهاید داشته باشید که هر بار که سیگنال تقسیم می‌شود، قدرت آن با نسبت تقسیم کاهش می‌یابد. توان خروجی هر پایانه در یک اسپلیتر $1 : 4$ تنها یک چهارم توان ورودی است. اسپلیترها دی‌مولتی پلکسرهای غیرفعال (DEMUX) هستند.

همچنین توجه داشته باشید، چون اسپلیترها دستگاه‌های نوری ساخته شده از شبشه یا سیلیکون هستند، دو جهته هستند. آنها همچنین به عنوان ترکیب کننده در جهت مخالف عمل می‌کنند. در این ظرفیت، آنها به عنوان مالتی پلکس (MUX) عمل می‌کنند.

در انتهای دریافت، هر مشترک یک واحد شبکه نوری^{۶۵} (ONU) یا پایانه شبکه نوری^{۶۶} (ONT) دارد. این جعبه‌ها به کامپیوتر شخصی، تلویزیون و/یا تلفن VoIP شما متصل می‌شوند. یک دستگاه دو طرفه است، به‌این معنی که می‌تواند ارسال و همچنین دریافت کند. در کاربردهای VoIP یا اینترنت، مشترک باید داده‌های صوتی و شماره‌گیری را به OLT ارسال کند. این کار روی یک لیزر 1310 نانومتری جداگانه با استفاده از همان مسیر فیبر نوری انجام می‌شود. اسپلیترها دو طرفه هستند و به عنوان ترکیب کننده یا مالتی پلکس نیز کار می‌کنند. سرعت آپلود (بارگذاری) در BPON 155 مگابیت بر ثانیه و در GPON 1.25 گیگابیت بر ثانیه است.

آخرین نسخه GPON 10 GPON گیگابیتی است که XGPON یا 10 GPON نام دارد. می‌تواند به سرعت 10 گیگابیت در ثانیه در پائین دستی 1577 نانومتر و $2/5$ گیگابیت در ثانیه در بالادستی 1270 نانومتر دست یابد. این طول موج‌های مختلف به‌آن اجزاء می‌دهد تا با سرویس‌های موجود همزیستی کند. نسبت تقسیم $1 : 128$ است. اکثر تجهیزات جدید از XGPON استفاده می‌کنند. قالب‌بندی (فرمت) داده‌ها مانند GPON استاندارد است.

یکی دیگر از استانداردهای پرکاربرد EPON یا Ethernet PON است. در حالی که BPON و GPON به عنوان استاندارد PON آمریکای شمالی پذیرفته شده‌اند، EPON استاندارد PON بالفعل در ژاپن، کره و برخی از کشورهای اروپایی است. EPON بخشی از استاندارد محبوب ارتنت IEEE است که $802.3ah$ تعیین شده است. همچنین می‌شنوید که به‌آن ارتنت در اولین مایل (EFM) گفته می‌شود. اصطلاح اولین مایل به فاصله بین مشترک و هر دفتر مرکزی اشاره دارد. گاهی به‌آن آخرین مایل نیز می‌گویند.

توبولوژی EPON مشابه GPON است، اما نرخ داده‌های پایین دستی و بالادستی در $1/25$ گیگابیت بر ثانیه متقارن هستند. پایین دستی در 1490 نانومتر در حالی که بالادستی در 1310 نانومتر است. بسته‌های ارتنت استاندارد با یک بار داده به 1518 بایت منتقل می‌شوند. یک مزیت واقعی برای EPON این است که به دلیل ارتنت بودن، با هر شبکه ارتنت دیگری کاملاً سازگار است. آخرین نسخه $802.3av$ EPON نامگذاری شده است. می‌تواند به ترتیب در طول موج‌های -1575 - 1580 نانومتر و -1260 - 1280 نانومتر به سرعت 10 گیگابیت بر ثانیه در بالادستی و پایین دستی برسد.

^{۶۵}Optical Networking Unit (ONU)

^{۶۶}Optical Networking Terminal (ONT)

نسخه بالادستی ۱ گیگابیت در ثانیه موجود است.

در حالی که PON‌ها حداقل پهنای باند و نرخ داده را برای اتصالات پهن باند خانگی فراهم می‌کنند، اما گران هستند. شرکت‌های حمل و نقل باید در زیرساخت‌های عظیمی سرمایه گذاری کنند که نیازمند سیم کشی مجدد منطقه مورد استفاده است. کابل‌های فیبر نوری عمده‌تر در زیرزمین قرار می‌گیرند، اما این فرآیند گران است زیرا باید حق عبور از ملک دیگری پرداخته و گودال‌هایی حفر شود. کابل‌ها را می‌توان با هزینه کمتر روی تیرهای موجود حمل کرد، اما اثر آن از نظر زیبایی کمتر دلپذیر است.

در حال افزایش محبوبیت است زیرا تلویزیون و ویدیوی بیشتری از طریق اینترنت ارائه می‌شود. اولین بار با سرویس FiOS خود بود، اما اکنون Google، AT&T و دیگران در حال نصب FTTH و ارائه خدمات ویدئویی مرتبط و همچنین اتصال به اینترنت تا یک گیگابیت بر ثانیه برای هر کاربر هستند.

در حالی که برخی از سرویس‌های PON، مانند سرویس FiOS Verizon، فیبر را مستقیماً به خانه می‌برند، سایر سیستم‌ها به کابل زوج سیم پیچ خورده استاندارد POTS متکی هستند که تقریباً در همه جا وجود دارد. در چنین مواردی، کابل فیبر به ترمینال یا دروازه محله هدایت می‌شود. چنین دروازه‌ای همچنین ممکن است به یک مجتمع آپارتمانی یا چند واحدی مانند مالکیت چند ساختمان خدمت کند. سپس سیگنال‌ها روی کابل تلفن استاندارد زوج سیم پیچ خورده که از قبل در محل قرار دارد، توزیع می‌شود. شکل پیشرفت‌های از خط مشترک دیجیتالی به نام ADSL21 یا VDSL2 با سرعت داده ۲۴ مگابیت بر ثانیه استفاده می‌شود. نسخه پیشرفته‌تر به نام VDSL2 نیز در برخی موارد استفاده می‌شود. از سرعت انتقال داده تا ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه در طول کابل‌های زوج سیم پیچ خورده کوتاه‌تر پشتیبانی می‌کند.

۷.۱۹ شبکه‌های ۴۰/۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه و فراتر از آن

با رشد اینترنت و افزایش تقاضا برای خدمات اینترنتی بیشتر، نیاز به سرعت شبکه بالاتر نیز ضروری شده است. بیشتر تقاضا ناشی از افزایش گسترده ویدیو از طریق اینترنت و همچنین افزایش قابل توجه رشد شبکه بی‌سیم و تقاضاهای همراه آن برای سرعت بالاتر است. شبکه‌های محلی با استانداردها و تجهیزات اترنت گیگابیتی و اترنت ۱۰ گیگابیتی همگام شده‌اند. شبکه‌های فیبر طولانی مدت نیز تلاش کرده‌اند تا با افزایش نرخ تا سیستم‌های ۴۰ گیگابیت بر ثانیه و ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه همگام شوند. با این حال بسیاری می‌گویند که شبکه‌ها هنوز به اندازه کافی سریع نیستند. کار بر روی سیستم‌های ۴۰ گیگابیت بر ثانیه و ۱ ترابیت بر ثانیه در حال انجام است. همانطور که نوشتۀ شده است، سیستم‌های ۴۰ گیگابیت بر ثانیه و ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه در حال ظهور هستند و به استانداردهایی برای برآورده کردن ظرفیت و سرعت تقاضاهای دنیای مدرن تبدیل می‌شوند. اکثر این سیستم‌ها مبتنی بر فیبر هستند.

اترنت ۴۰/۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه

فصل دوازدهم اشکال مختلف اترنت ۴۰ و ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه را که توسط استاندارد IEEE 802.3ba تعریف شده است، خلاصه می‌کند. نسخه‌های کوتاه برد مبتنی بر کابل مسی هستند. نسخه‌های با برد بلندتر بر پایه فیبر هستند که در جدول (۱.۱۹) خلاصه شده است.

قالب اصلی ۴ خط سیگنال‌های ۱۰ گیگابیت در ثانیه برای ۴۰ گیگابیت بر ثانیه و ۱۰ خط با

Table 19-1 Optical Versions of IEEE 802.3ba Ethernet			
Physical Layer (medium)	Range (meters) UP to . . .	40GE	100GE
MMF (OM3)	100 m	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10
MMF (OM4)	125 m	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10
SMF	2 km	40GBASE-FR	
SMF	10 km	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4
SMF	40 km		100GBASE-ER4

جدول ۱.۱۹: نسخه‌های نوری اترنت IEEE 802.3ba

سرعت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه یا ۴ خط با سرعت ۲۵ گیگابیت بر ثانیه برای ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه است. خط همانطور که در اینجا تعریف شده است به یک فیبر منفرد یا یک طول موج نور (λ) روی یک فیبر منفرد اشاره دارد. در حالی که برخی از سیستم‌های ۴۰ گیگابیت بر ثانیه پیاده سازی شده اند، بیشترین علاقه و تمرکز بر روی سیستم‌های ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه است. که در این بخش تاکید شده است.

استاندارد ۱۰۰GBASE-SR10 ۱۰ خط با سرعت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه را برای انتقال و ۱۰ خط دیگر را برای دریافت تعریف می‌کند. خطوط از فیبر OM3 و لیزرهای ۸۵۰ نانومتری VCSEL برای برد تا ۱۰۰ متر یا کابل OM4 استفاده می‌کنند که بردی تا ۱۲۵ متر را به دست می‌آورد. استاندارد ۱۰۰GBASE-LR4 ۱۰۰ برا اساس تقسیم طول موج متراکم (DWDM) است. از چهار خط یا طول موج روی یک زوج فیبر تک مودی استفاده می‌کند، یکی برای ارسال و دیگری برای دریافت. طول موج‌های مورد استفاده ۱۲۹۵، ۱۳۰۰، ۱۳۰۵ و ۱۳۱۰ نانومتر است. نرخ خالص داده در هر طول موج ۲۵ گیگابیت بر ثانیه است. برد موثر تا ۱۰ کیلومتر است.

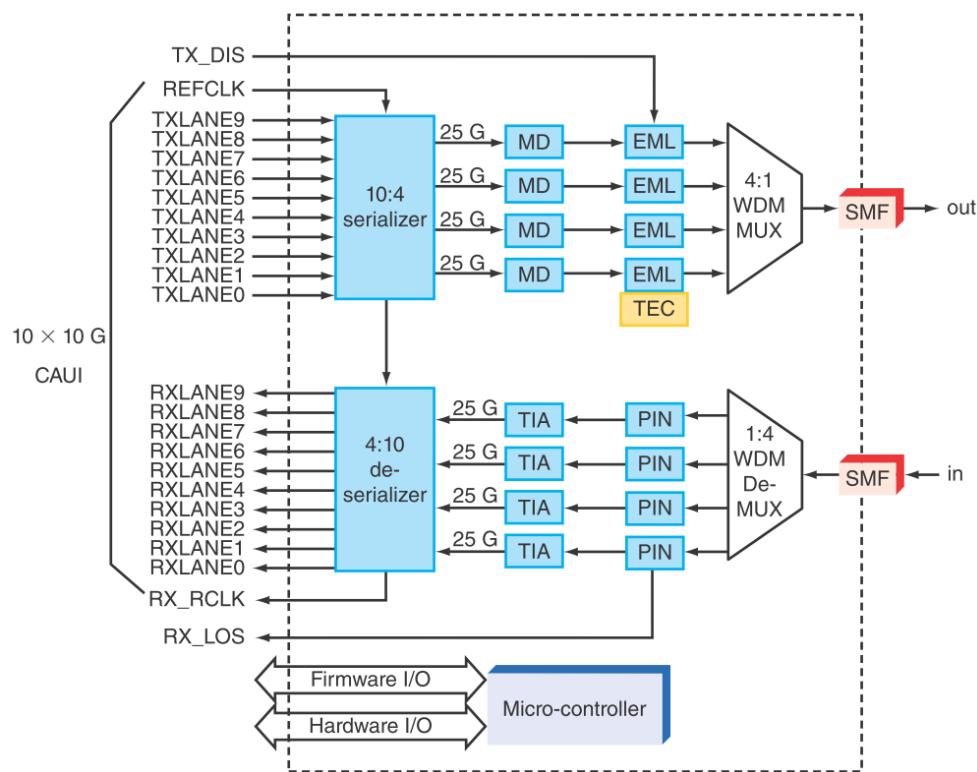
۱۰۰GBASE-ER4 مشابه نسخه LR4 است اما دارای تقویت کننده برای دستیابی به برد ۴۰ کیلومتر است. یک نسخه تک خط (λ) با سرعت ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه در حال توسعه است.

شکل (۴۵.۱۹) اجرای اساسی یک فرستنده گیرنده ۱۰۰GBASE-LR4 را نشان می‌دهد. منبع داده و مقصد، رابط ۱۰۰ گیگابیتی واحد پیوست (CAUI) است. C عدد رومی ۱۰۰ است. این یک رابط 10×10 است که به تجهیزاتی که به هم متصل هستند، مانند سرور، روتور، یا سوئیچ پیوند می‌خورد. بخش بالایی فرستنده است. ۱۰ خط داده با سرعت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه را می‌پذیرد و آنها را به ۴ خط با سرعت ۲۵ گیگابیت بر ثانیه با سریال‌ساز $^4 : 10$ انتقال می‌دهد. سریال‌ساز $^4 : 10$ یک مدار پیچیده است که از رجیسترهاش شیفت و منطق با زمان بندی مناسب ساعت تشکیل شده است. سپس چهار سیگنال ۲۵ گیگابیت بر ثانیه به درایور مدولاتور (MD) و سپس به یک لیزر مدوله شده خارجی 47 (EML) ارسال می‌شود. سپس چهار سیگنال ۲۵ گیگابیت بر ثانیه روی یک فیبر تک مودی 48 (SMF) مالتی‌پلکس می‌شوند.

بخش گیرنده پایین سیگنال DWDM را می‌گیرد و آن را به چهار مسیر ۲۵ گیگابیت در ثانیه

^{۴۷}Externally Modulated Laser (EML)

^{۴۸}Single Mode Fiber (SMF)



شکل ۴۵.۱۹: فرستنده-گیرنده برای 100GBASE-LR4

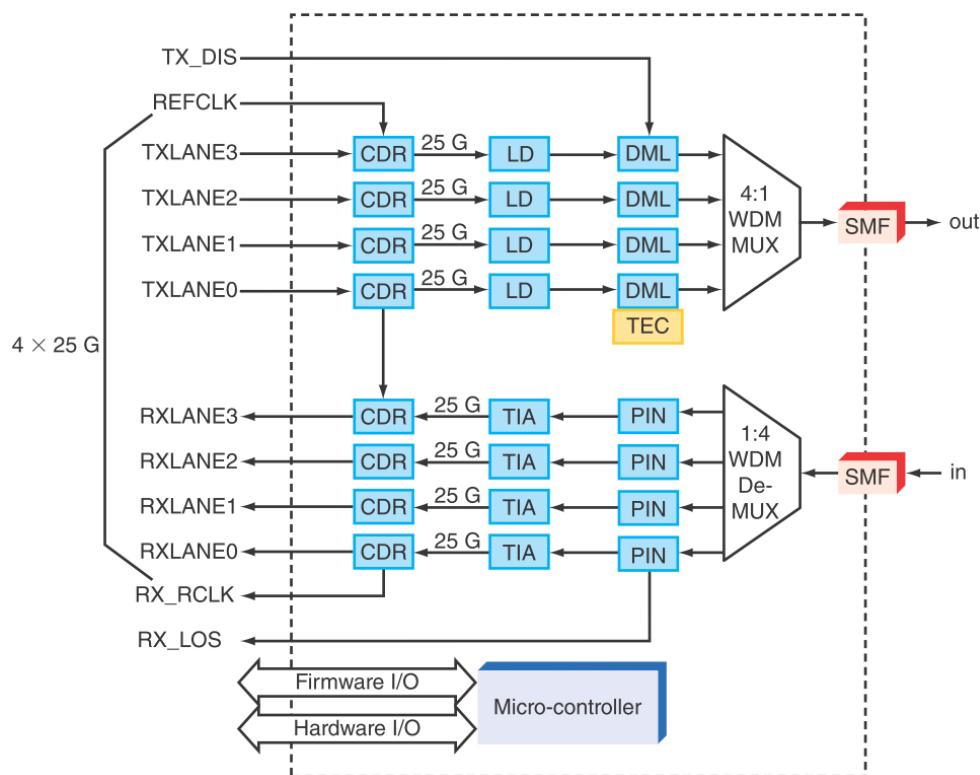
که توسط فوتودیودهای PIN شناسایی می‌شوند، از هم دی‌مولتی‌پلکس می‌کند. سیگنال‌ها در تقویت‌کننده‌های امپدانس ترانس (TIA) تقویت می‌شوند و سپس به یک سریال‌ساز $10 \times 10 \text{ G}$ ارسال می‌شوند که ۱۰ خط ۱۰ گیگابیت بر ثانیه را برای رابط CAUI ایجاد می‌کند.

شکل (۴۶.۱۹) نسخه‌ای از یک فرستنده گیرنده ۱۰۰ گیگابیتی را نشان می‌دهد که از چهار خط با سرعت ۲۵ گیگابیت بر ثانیه برای رفت و آمد به تجهیزات استفاده می‌کند. سیگنال‌های ورودی و ساعت توسط مدار بازیابی ساعت و داده (CDR) بازیابی می‌شوند و سپس به درایور لیزر (LD) ارسال می‌شوند که لیزرهای مدوله شده مستقیم (DML) را تغذیه می‌کند. خروجی‌های DML روی یک فیبر تک مودی مالتی‌پلکس می‌شوند.

در سمت دریافت، چهار سیگنال DWDM با سرعت ۲۵ گیگابیت در ثانیه به چهار مسیر نوری تبدیل می‌شوند که توسط دیودهای پین شناسایی شده و در TIA تقویت می‌شوند. سپس سیگنال‌های ۲۵ گیگابیت بر ثانیه قبل از ارسال به رابط تجهیزات در CDR بازسازی می‌شوند. ترتیب مشابهی برای سیستم ۴۰۰ گیگابیت بر ثانیه با استفاده از ۱۶ خط سیگنال ۲۵ گیگابیت بر ثانیه ($16 \times 25 = 400$) پیشنهاد شده است.

فناوری حمل و نقل نوری

استاندارد OTN روش لایه فیزیکی خاصی را تعریف نمی‌کند. محققان دریافته‌اند که مدولاسیون شدت سوئیچینگ خاموش با روش تشخیص مستقیم (IMDD) در اکثر سیستم‌های نوری بهترین

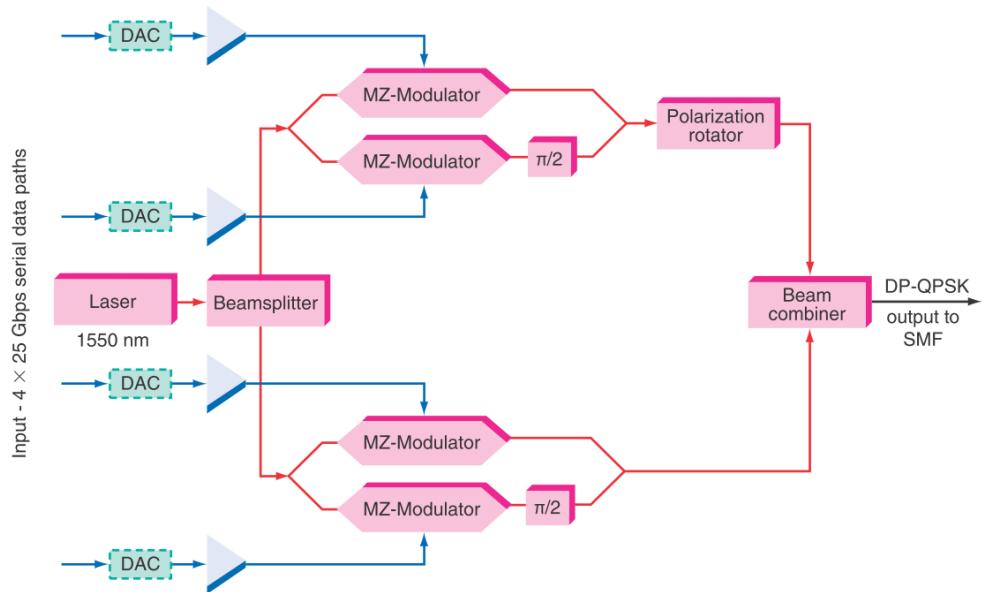


شکل ۴۶.۱۹: فرستنده و گیرنده جایگزین برای ۱۰۰GBASE-LR4

گزینه برای OTN نیست. در عوض یک سیستم همدوس جدید برای انتقال OTN در SMF، یک تک طول موج، توسعه یافته است. نه تنها از دامنه سیگنال نوری بلکه از فاز و قطبش آن نیز استفاده می‌کند. این روش همدوس، کلیدزنی دو قطبی - تغییر فاز تربیعی (DP-QPSK) نامیده می‌شود. از ترکیبی از فناوری‌ها برای انتقال ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه با نرخ ۲۵ گیگاباد استفاده می‌کند. دو مسیر بیت سریال موازی را می‌توان با استفاده از دو قطبش نور مختلف، یکی عمودی و دیگری افقی، روی یک فیبر منفرد در یک طول موج نور منتقل کرد. ۹۰ درجه اختلاف فاز یک مسیر با مسیر دیگر جلوگیری می‌کند و بازیابی نوری را آسان می‌کند. نتیجه سرعت داده ۲ بیت/هرتز است.

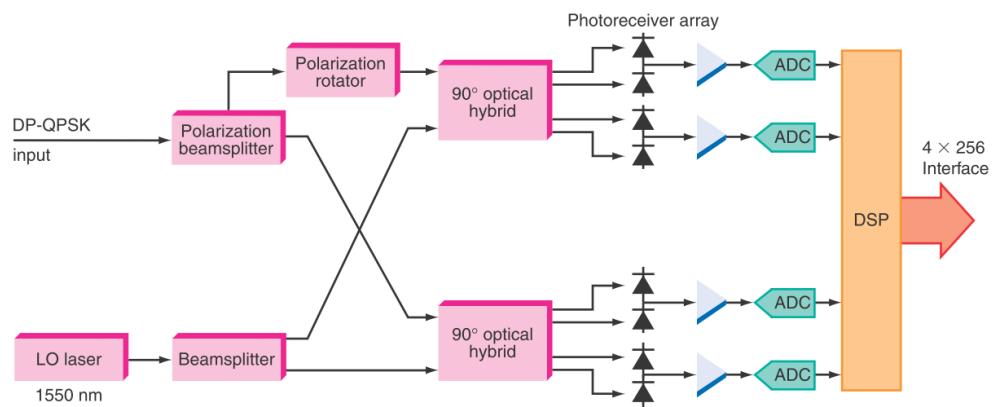
سپس دو جریان قطبی شده با QPSK پردازش می‌شوند تا نتیجه ۲ بیت / هرتز دیگر تولید شود. ترکیب قطبش دوگانه به اضافه ۴ QPSK بیت/هرتز تولید می‌کند. این اجازه می‌دهد تا سیگنال‌های الکتریکی با نرخ ۲۵ گیگابیت بر ثانیه برای تولید سیگنال ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه در SMF استفاده شود.

شکل (۴۷.۱۹) یک فرستنده برای DP-QPSK را نشان می‌دهد. داده‌های ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه به چهار مسیر داده ۲۵ گیگابیت بر ثانیه تقسیم و برای تبدیل زوچهای ۲ بیتی به چهار سطح روى اعمال می‌شوند. این چهار سطح پرتو لیزر تک طول موج را مدوله می‌کنند. پرتو لیزر، معمولاً در ۱۵۵۰ نانومتر، به طور مساوی تقسیم و به همراه خروجی‌های DAC به چهار مدولاتور ماخ زندر (MZ) ارسال می‌شود. توجه داشته باشید که خروجی یکی از مدولاتورهای MZ ۹۰ درجه ($\pi/2$) تاخیر دارد.



شکل ۴۷.۱۹

سپس خروجی‌های مدولاتور MZ برای ایجاد جریان‌های داده درون فازی (I) و مربعی (Q) ترکیب می‌شوند. یک روتاتور پلاریزاسیون جریان بالایی را 90° درجه جابجا می‌کند و جریان بالا و پایین را به صورت تربیعی می‌سازد. یک ترکیب کننده پرتو متعادل یک سیگنال نوری واحد ایجاد می‌کند که به کابل SMF اعمال می‌شود. توجه داشته باشید که تمام فرآیند مدولاسیون به صورت نوری انجام می‌شود. تغییر این روش باعث ایجاد پلاریزاسیون تربیعی پرتو لیزر قبل از اعمال بر روی مدولاتورهای MZ می‌شود.



شکل ۴۸.۱۹

یک گیرنده همدوس در شکل (۴۸.۱۹) نشان داده شده است. سیگنال DP-QPSK از فیبر به یک پرتو شکاف دهنده متعادل اعمال می‌شود. خروجی بالایی به دستگاهی می‌رود که قطبش را 90° درجه

می‌چرخاند. سپس دو سیگنال پلاریزه شده به دو هایبرید نوری 90° درجه اعمال می‌شود. ورودی دیگر هایبریدها یک پرتو لیزر در 1550 نانومتر است که به طور مساوی تقسیم و به عنوان نوسان ساز محلی (LO) برای دمودولاسیون عمل می‌کند.

هایبریدهای نوری 90° درجه معادل نوری دمودلاتورهای تربیعی الکترونیکی هستند. LO لیزر و سیگنال‌های ورودی پلاریزه شده مخلوط و چهار مسیر خروجی جداگانه ایجاد می‌شود. اینها روی دیودهای عکس پین اعمال می‌شوند تا سیگنال‌های داده اصلی 25 گیگابیت بر ثانیه را بازسازی کنند. سپس این چهار سیگنال در ADC‌های سریع دیجیتالی می‌شوند و سیگنال‌های دیجیتالی حاصل در مدارهای DSP پردازش می‌شوند تا داده‌ها را بازیابی کنند و همچنین در صورت نیاز، جبران پاشندگی حالت رنگی و قطبی را انجام دهند.

این روش همدوسر همچنین ممکن است برای تولید نرخ‌های بالاتر مانند 200 گیگابیت بر ثانیه، 400 گیگابیت بر ثانیه یا حتی یک ترابیت در ثانیه با استفاده از QAM به جای QPSK استفاده شود.

ماژول‌های 100 گیگابیت بر ثانیه MSA

ماژول‌های قابل اتصال برای اتصال تجهیزات مانند سرورها، روتراها و سوئیچ‌ها قبلًا در بخش $4-19$ مورد بحث قرار گرفت. این ماژول‌ها استانداردها و سرعت داده‌ها را تا 10 گیگابیت بر ثانیه و 40 گیگابیت بر ثانیه پوشش می‌دادند. اکنون قراردادهای چند منبعی 100 گیگابیت در ثانیه (MSA) در دسترس هستند. اینها عبارتند از CFP، CFP2 و CDFP. ماژول‌های CFP از WDM استفاده می‌کنند و به اشکال مختلفی در دسترس هستند، از جمله 10×10 گیگابیت بر ثانیه برای 100 گیگابیت بر ثانیه، 4×25 گیگابیت بر ثانیه برای 100 گیگابیت بر ثانیه، و 4×4 گیگابیت بر ثانیه برای 40 گیگابیت بر ثانیه. نسخه‌های جدیدتر CFP4 و CFP2 به ترتیب از 25×8 گیگابیت بر ثانیه و 25×4 گیگابیت بر ثانیه برای 100 گیگابیت بر ثانیه استفاده می‌کنند. ماژول CXP از فیبرهای موازی 10×10 گیگابیت بر ثانیه برای 100 گیگابیت بر ثانیه استفاده می‌کند. این ماژول‌ها در درجه اول از استانداردهای اترنت IEEE 802.3ba 100GBASE-LR4/ER4/SR10 پشتیبانی می‌کنند اما می‌توانند OTU4 OTN را نیز مدیریت کنند.

ماژول CDFP MSA برای 400 گیگابیت بر ثانیه طراحی شده است. این در سه قالب اصلی موجود است: 16×25 گیگابیت در ثانیه، 50×8 گیگابیت در ثانیه، یا 100 گیگابیت بر ثانیه.

سوالات:

۱. درست یا غلط؟ نور تابش الکترومغناطیسی است.
۲. طیف نوری از سه قسمت تشکیل شده است. آنها را نام ببرید.
۳. کدام بخش از طیف نوری بیشترین فرکانس را دارد؟ پایین‌ترین فرکانس‌ها؟
۴. امواج نور در مسیر

- الف دایره
- ب خط مستقیم
- ج منحنی
- د تصادفی

حرکت می‌کنند

۵. برای بیان طول موج نور از چه واحدهایی استفاده می‌شود؟

۶. کمترین طول موج و بیشترین طول موج نور مرئی را بیان کنید و رنگ هر کدام را ذکر کنید.

۷. محدوده طول موج نور مادون قرمز چقدر است؟

۸. درست یا غلط؟ سرعت نور در شیشه یا پلاستیک بیشتر از سرعت نور در هوا است.

۹. نام عددی که سرعت حرکت نور را در یک محیط نسبت به هوا نشان می‌دهد چیست؟

۱۰. برای جهش یا تغییر جهت موج نور از چه وسیله‌ای می‌توان استفاده کرد؟

۱۱. اصطلاحی که برای توصیف خمس پرتوهای نور بهدلیل تغییر سرعت در حرکت از یک محیط به محیط دیگر استفاده می‌شود چیست؟

۱۲. هنگامی که زاویه شکست 90° درجه نسبت به حالت عمودی باشد، نحوه حرکت پرتو در رابطه با دو محیط درگیر را شرح دهد.

۱۳. هنگامی که پرتو تابشی با زاویه‌ای بیشتر از زاویه بحرانی به سطح مشترک بین دو محیط برخورد کند، چه اثر خاصی رخ می‌دهد؟

۱۴. چه عاملی زاویه بحرانی را در یک محیط تعیین می‌کند؟

۱۵. پرتوهای فرابنفش در ارتباطات چه ارزشی دارند؟

۱۶. دو محیط انتقال متداول در یک سیستم ارتباط نوری را نام ببرید.

۱۷. نحوه مدولاسیون منبع نور را شرح دهید. کدام نوع مدولاسیون رایج‌ترین است؟

۱۸. توضیح دهید که چگونه سیگنال‌های آنالوگ و دیجیتال ممکن است فرستنده نور را مدوله کنند.

۱۹. دو نوع اصلی از منبع نور مورد استفاده در سیستم‌های ارتباطی نوری کامند؟ کدام ترجیح داده می‌شود و چرا؟

۲۰. چه عواملی انتقال اطلاعات در فضای آزاد در یک پرتو نور را محدود می‌کند؟

۲۱. کابل‌های فیبر نوری چه نوع سیگنال‌هایی را حمل می‌کنند؟

۲۲. کدام اصل نوری کابل فیبر نوری را ممکن می‌سازد؟

۲۳. برای ساخت کابل فیبر نوری از چه دو ماده استفاده می‌شود؟

۲۴. سه نوع اصلی اطلاعاتی که توسط کابل‌های فیبر نوری حمل می‌شود را نام ببرید.

۲۵. کلربرد عمدۀ کابل فیبر نوری چیست؟

۲۶. مزیت اصلی کابل فیبر نوری نسبت به کابل الکتریکی را بیان کنید.

۲۷. درست یا غلط؟ کابل فیبر نوری نسبت به کابل الکتریکی در فواصل طولانی تلفات بیشتری دارد.

۲۸. درست یا غلط؟ کابل فیبر نوری کوچکتر، سبکتر و قوی‌تر از کابل الکتریکی است.

۲۹. دو عیب اصلی کابل فیبر نوری را بیان کنید.

۳۰. نام دستگاهی که پالس‌های نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند چیست؟

۳۱. نام واحدهای بازیابی‌هایی که برای جبران کاهش سیگنال در فواصل طولانی استفاده می‌شود چیست؟

۳۲. کدام ماده ویژگی‌های نوری بهتر و تلفات کمتری دارد؟

• الف پلاستیک

• ب شیشه

• ج آنها برابر هستند.

۳۳. چه چیزی هسته را در کابل فیبر نوری پوشش می‌دهد و از آن محافظت می‌کند؟

۳۴. در کابل نوع PCS از چه موادی برای ساخت هسته و روکش استفاده می‌شود؟

۳۵. ضریب شکست در بالاترین میزان است

• الف هسته

• ب روکش

۳۶. سه نوع اصلی کابل فیبر نوری را فهرست کنید.

۳۷. پدیده کشیده شدن پالس نور توسط کابل فیبر نوری چه نام دارد؟ در واقع چه چیزی باعث آن می‌شود؟

۳۸. کشش پالس نور در کدام دو نوع کابل اتفاق می‌افتد؟ چه نوع کابل فیبر نوری باعث ایجاد درجات قابل توجهی از کشش پالس نمی‌شود؟

۳۹. چه نوع کابلی برای پالس‌های با فرکانس بسیار بالا بهترین است؟

۴۰. کشش پالس توسط پاشندگی مodal باعث می‌شود ظرفیت اطلاعاتی یک کابل به

• الف افزایش یابد

• ب کاهش یابد

۴۱. پاشندگی رنگی را تعریف کنید.

۴۲. جبران پاشندگی الکترونیکی چیست؟

۴۳. محدوده قطر هسته معمولی کابل با ضرب شکست پله‌ای تک مودی چقدر است؟

۴۴. چه نوع پوشش‌هایی روی روکش در کابل فیبر نوری برای محافظت در برابر رطوبت و آسیب اعمال می‌شود؟
۴۵. درست یا غلط؟ کابل‌های فیبر نوری با چندین هسته در دسترس هستند.
۴۶. از چه اصطلاحی برای افت نور در کابل استفاده می‌شود؟
۴۷. کدام سه عامل اصلی باعث از دست دادن نور در کابل فیبر نوری می‌شود؟
۴۸. میزان اتلاف نور در کابل فیبر نوری چگونه بیان و اندازه‌گیری می‌شود؟
۴۹. درست یا غلط؟ کابل‌های فیبر نوری ممکن است بهم متصل شوند.
۵۰. بیان کنید که چگونه کابل‌های فیبر نوری به راحتی به یکدیگر و تجهیزات مرتبط پیوند و متصل می‌شوند.
۵۱. نام دو نوع متداول کانکتور کابل فیبر نوری را نام ببرید و تفاوت اصلی آنها را بیان کنید.
۵۲. سه اندازه رایج و محبوب کابل فیبر نوری را نام ببرید.
۵۳. منظور از پهنانی باند را در مورد کابل فیبر نوری تعریف کنید. چه واحدهایی برای بیان پهنانی باند استفاده می‌شود؟
۵۴. بیشترین پیک(اوج) تلفات در کابل فیبر نوری چیست؟ این تلفات پیک در چه فرکانس‌هایی رخ می‌دهد؟
۵۵. رایج‌ترین دو منبع نور مورد استفاده در فرستنده‌های فیبر نوری کدامند؟
۵۶. درست یا غلط؟ نور مرئی رایج‌ترین نوع نور مورد استفاده در سیستم‌های فیبر نوری است.
۵۷. سه فرکانس نوری رایج مورد استفاده در سیستم‌های کابل فیبر نوری را نام ببرید. چرا از این فرکانس‌ها استفاده می‌شود؟
۵۸. درست یا غلط؟ نور یک LED ۱/۵۵ میکرومتری قابل مشاهده است.
۵۹. الای‌دی‌ها معمولاً از چه مواد نیمه‌هادی ساخته می‌شوند؟
۶۰. برای توصیف فرکانس نوری از چه اصطلاحی استفاده می‌شود؟
۶۱. شرایط هم فاز بودن همه امواج نوری ساطع شده را چه می‌نامید؟
۶۲. با افزودن سطوح بازتابنده به دیود لیزر چه ساختار خاصی ایجاد می‌شود؟ چگونه بر امواج نور تولید شده و ساطع شده تأثیر می‌گذارد؟
۶۳. برای عملکرد عادی، LED و ILD با بایاس

• الف معکوس

• ب مستقیم

هستند

۶۴. کدام یک سریعتر است؟

• الف LED

• ب ILD

۶۵. کدام نور روشن تری تولید می‌کند؟

• الف LED

• ب ILD

۶۶. سه نوع لیزر راچ را نام ببرید. کدام یک برای کاربردهای مسافت طولانی ترجیح داده می‌شود؟

۶۷. مزیت اصلی لیزر قابل تنظیم چیست؟

۶۸. در حین کارکرد عادی، تمام فتودیوودها با بایاس

• الف معکوس

• ب مستقیم

هستند.

۶۹. حساس‌ترین و سریع‌ترین آشکارساز نوری را نام ببرید.

۷۰. دو مدار اصلی گیرنده فیبر نوری را نام ببرید.

۷۱. جدای از دلیل ذکر شده در متن، یک دلیل کلیدی را نام ببرید که چرا رمزگذاری منچستر ممکن است ترجیح داده شود.

۷۲. کدام سیستم شبکه محلی محبوب از کابل فیبر نوری استفاده می‌کند؟

۷۳. برای بیان خروجی فرستنده نوری و حساسیت گیرنده نوری از چه واحد الکتریکی استفاده می‌شود؟

۷۴. سه فرکانس کار لیزر راچ در سیستم‌های فیبر نوری را فهرست کنید. کدام یک برای عملیات از راه دور ترجیح داده می‌شود و چرا؟

۷۵. بیان کنید که چرا لیزر در مدولاسیون لیزر مستقیم هرگز به‌طور کامل خاموش نمی‌شود.

۷۶. نام مدولاتور خارجی مورد استفاده در برخی لیزرها چیست؟ چرا بر مدولاسیون مستقیم ترجیح داده می‌شود؟

۷۷. عملکرد مدار کنترل خودکار قدرت مورد استفاده در اکثر مدارهای تغذیه لیزر را توضیح دهید.

۷۸. نام تقویت کننده ورودی مورد استفاده در مدارهای گیرنده نوری چیست؟

۷۹. بازسازی در شبکه فیبر نوری چیست و چرا به‌آن نیاز است؟

- .۸۰. فرآیند بازسازی را توضیح دهید و نام دیگری برای آن بگذارید.
- .۸۱. اجزای اصلی را در تقویت کننده نوری توضیح دهید.
- .۸۲. محدوده بهره طبیعی یک EDFA چقدر است؟
- .۸۳. مزایای اولیه تقویت کننده نوری را بیان کنید.
- .۸۴. MSA چیست؟ فواید آن چیست؟
- X .۸۵
- در اختصارات MSA های مختلف به چه معناست؟
- .۸۶. نام دستگاهی که برای آن اعمال می شود چیست؟
- .۸۷. یک ROSA را توصیف کنید.
- .۸۸. یک TOSA را توصیف کنید.
- .۸۹. CDR چیست و چگونه کار می کند؟
- .۹۰. CMU چیست و چگونه کار می کند؟
- .۹۱. مخفف برای توصیف مداری که از سریال به موازی یا موازی به سریال تبدیل می شود چیست؟
- .۹۲. پر کاربردترین فرمتهای MSA را فهرست کنید.
- .۹۳. رابط الکتریکی موازی در MSA ۳۰۰ پین چیست؟
- .۹۴. رابط الکتریکی یک مازول XENPAX را شرح دهید. XAUI به چه معناست؟
- .۹۵. رابط الکتریکی مازول XFP چیست؟
- .۹۶. رسیدن به چه معناست؟ دسترسی طولانی را تعریف کنید.
- .۹۷. مالتی پلکس تقسیم طول موج چیست؟
- .۹۸. معمولاً از چند کانال یا طول موج در سیستم های CDWM استفاده می شود؟
- .۹۹. حداقل تعداد کانال های ممکن در سیستم های DWDM چقدر است؟
- .۱۰۰. نام دستگاهی که معمولاً برای مالتی پلکس و دی مولتی پلکس سیگنال های IR در سیستم DWDM استفاده می شود چیست؟
- .۱۰۱. محدوده طول موج باندهای C، L و IR را ارائه دهید.
- .۱۰۲. دستگاهی را که برای مالتی پلکس کردن سیگنال های DWDM استفاده می شود نام ببرید.
- .۱۰۳. شبکه های نوری غیرفعال را به عنوان یکی از موارد زیر دسته بندی کنید: SAN، MAN، WAN، LAN

۱۰۴. PON برای چه مواردی استفاده می‌شود؟
۱۰۵. تجهیزات در دفتر مرکزی حامل و محل مشتری چیست؟
۱۰۶. ترکیب کننده چیست؟ اسپلیتر چیست؟ چگونه هر مورد استفاده قرار می‌گیرند؟
۱۰۷. اگر ورودی نور به اسپلیتر ۱ : ۴۰۰ میکرو وات باشد، توان موجود در هر خروجی چقدر است؟
۱۰۸. استاندارد اولیه PON ایالات متحده چیست؟ سرعت دانلود و آپلودش چقدر است؟
۱۰۹. EPON چیست؟ کجا استفاده می‌شود؟
۱۱۰. نرخ داده EPON را ارائه دهید.
۱۱۱. طول موج‌های نور مورد استفاده در اکثر PON‌ها را نام ببرید و بگویید برای چه استفاده می‌شوند.
۱۱۲. توضیح دهید که چگونه سیگنال‌های داده در PON‌هایی که فیبر تا خانه یا دفتر کار نمی‌کند، توزیع می‌شود.
۱۱۳. FTTH را تعریف کنید.
۱۱۴. اولین/آخرین مایل چیست؟
۱۱۵. کدام ویژگی موج حامل لیزر توسط مدولاتور ماخ زندر مدوله می‌شود؟
۱۱۶. چگونه AM در مدولاتور ماخ زندر به دست می‌آید؟
۱۱۷. یک نوع ماده‌ای را که برای ساخت مدولاتور ماخ زندر استفاده می‌شود نام ببرید.
۱۱۸. دو روش برای دستیابی به نرخ داده ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه در کابل‌های فیبر نوری توضیح دهید.
۱۱۹. نام روش مدولاسیون همدوسی که برای سرعت داده ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه یا بالاتر استفاده می‌شود چیست؟
۱۲۰. دو فرم دوربرد اترنت ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه و فرمتهای آنها را نام ببرید.
۱۲۱. دو روش را نام ببرید که می‌توان سرعت داده را در فیبر دو برابر کرد.
۱۲۲. دو نوع ماژول MSA ۱۰۰ گیگابیتی را نام ببرید.
۱۲۳. نرخ خط OTN 100-Gbps و تعیین آن چقدر است؟
۱۲۴. نرخ داده در هر خط در سیستم WDM برای ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه چقدر است؟
۱۲۵. بعد از ۱۰۰ گیگابیت در ثانیه چه دو نرخ بالاتری انتظار می‌رود؟

مسائل:

۱. سرعت نور در هوا را بر حسب متر بر ثانیه و مایل بر ثانیه بیان کنید.

۲. اگر یک پرتو نور با زاویه $28/4$ درجه نسبت به حالت عمودی به آینه برخورد کند، با چه زاویه‌ای از نسبت به حالت عمودی منعکس می‌شود؟
۳. یک بلوک دیاگرام ساده از یک سیستم ارتباط نوری رسم کنید و هدف و عملکرد هر عنصر را توضیح دهید.
۴. فرآیند انتقال سیگنال‌های صوتی و تصویری توسط پرتو نور را توضیح دهید.
۵. یک کابل 9 دسی‌بل تلفات دارد. چند درصد از توان ورودی آن در خروجی ظاهر می‌شود؟
۶. $1/2$ کیلومتر را بر حسب مایل و فوت بیان کنید.
۷. 6 مایل برابر چند کیلومتر است؟
۸. چهار کابل با میرایی‌های 7 ، 16 ، 29 و 34 دسی‌بل بههم متصل شده‌اند. میرایی کل بر حسب دسی‌بل چقدر است؟
۹. یک کابل فیبر نوری دارای پهنه‌ای باند 160 مگاهرتز در کیلومتر است. پهنه‌ای باند یک قطعه یک مایلی چقدر است؟ قطعه $0/5$ مایلی چقدر است؟
۱۰. بهطور خلاصه توضیح دهید که چگونه نور بر روی اتصال PN یک فوتودیود باعث تغییر رسانایی دیود می‌شود.
۱۱. حاصلضرب نرخ بیت-فاصله یک سیستم $Mbpskm$ 600 است. نرخ سرعت 8 کیلومتر چقدر است؟
۱۲. میانگین حداکثر فاصله بین تکرار کننده‌ها در یک سیستم فیبر نوری چقدر است؟
۱۳. نحوه انتقال سیگنال‌های آنالوگ از طریق کابل فیبر نوری را توضیح دهید.
۱۴. یک سیستم کابل فیبر نوری دارای ضریب پاشندگی $33ns/km$ است. طول سیستم $0/8$ کیلومتر است. بالاترین نرخ داده‌ای که می‌توان در این لینک به‌دست آورد چقدر است؟
۱۵. حداقل حساسیت گیرنده مورد نیاز برای تشخیص مطمئن سیگنال ارسال شده با توان $0/7$ میکرووات از طریق لینکی به‌طول $3/5$ کیلومتر با تضعیف $2/8$ dB/km را محاسبه کنید. دارای دو اتصال، هر کدام با تضعیف $0/3$ دسی‌بل، و چهار کانکتور، هر کدام با میرایی یک دسی‌بل. تلفات در اتصالات به‌دستگاه‌های IPD و APD هر کدام 2 دسی‌بل است. ضریب احتمالی را 5 دسی‌بل فرض کنید. ضریب پاشندگی 18 ns/km است. حداکثر سرعت داده‌ای که این سیستم می‌تواند به‌دست آورد چقدر است؟
۱۶. یک سیستم DWDM دارای 64 کanal SONET OC-48 است. نرخ کل داده مرکب یا انبوه چقدر است؟
۱۷. کابل OM4 دارای EMB 4000 مگاهرتز در کیلومتر است. حداکثر سرعت انتقال داده برای کابل یک کیلومتری چقدر است؟

مسائل چالش برانگیز:

۱. سه برنامه کاربردی جدید بالقوه برای ارتباطات فیبر نوری را نام ببرید که در فهرست شکل (۹.۱۹) نیست اما از مزایای ذکر شده در شکل (۱۰.۱۹) بهره می‌برد.
۲. توضیح دهید که چگونه یک کابل فیبر نوری منفرد می‌تواند ارتباط دو طرفه، هم نیمه و هم کامل دوبلکس را اداره کند.
۳. آیا می‌توان از نور لامپ رشته‌ای برای فرستنده فیبر نوری استفاده کرد؟ مزایا و معایب احتمالی آن را توضیح دهید.
۴. یک سیستم رادیویی بی‌سیم را با یک سیستم ارتباطی فیبر نوری برای ارتباطات داده دیجیتال در فاصله یک کیلومتری مقایسه کنید. نرخ داده مورد نظر را ۷۵ مگابیت بر ثانیه فرض کنید. مزایا و معایب هر کدام را بیان کنید. با در نظر گرفتن همه عوامل، کدام یک بهتر است؟
۵. توضیح دهید که چگونه داده‌های بایت را می‌توان به صورت موازی در یک سیستم DWDM منتقل کرد.

فصل ۲۰

فناوری‌های تلفن همراه

با فروش بیش از یک میلیارد تلفن همراه در سال، تلفن همراه بزرگترین دستگاه الکترونیکی مصرفی است. این روش ارتباط ما را تغییر داده است. سال ۲۰۰۵ اولین سالی بود که تعداد مشترکان تلفن همراه بیشتر از مشترکین تلفن سیمی بود. امروزه برای اکثر مصرف کنندگان، تلفن همراه تنها تلفن آنهاست. علاوه بر این، با افزایش سرعت انتقال داده‌های جدیدتر تلفن همراه دیجیتالی، لوازم جانبی و برنامه‌های کاربردی تلفن همراه بیشتری امکان پذیر است. اینها شامل دوربین‌ها، دسترسی به اینترنت، پیامک، ایمیل، صدا، بازی، ناوبری و ویدئو می‌شود. این فصل یک نمای کلی فنی از استانداردها و عملکرد تلفن همراه ارائه می‌دهد. سایر فناوری‌های بی‌سیم کوتاه برد در فصل بیت و یکم توضیح داده شده‌اند.

اهداف:

بعداز تکمیل این فصل، شما می‌توانید:

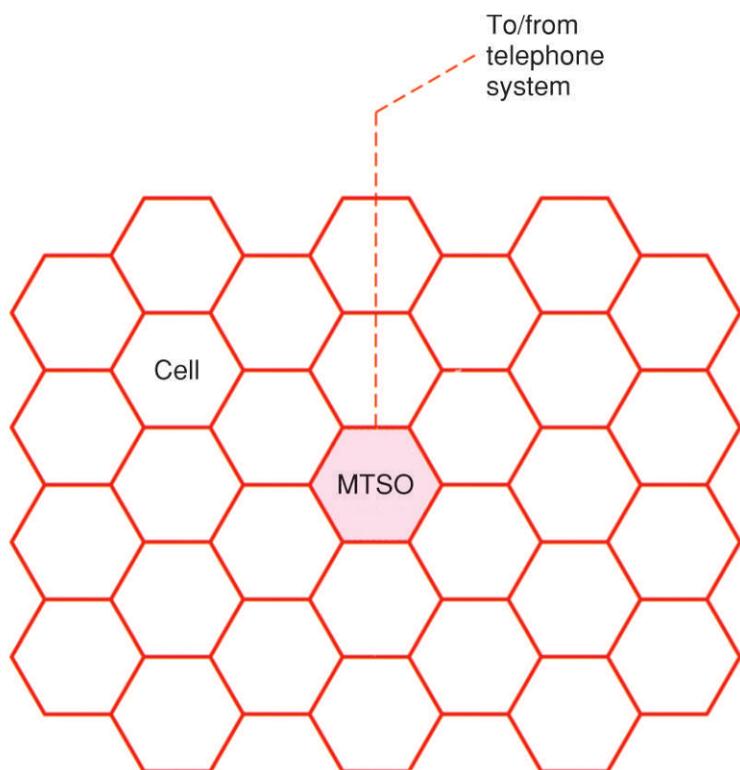
- مفهوم عملیاتی تلفن همراه را شرح دهید.
- دو سیستم تلفن همراه دیجیتالی نسل دوم را نام ببرید و ویژگی‌های هر کدام را شرح دهید.
- اصطلاحات تلفن همراه 2G، 2.5G، 3G، 4G و 5G را تعریف کنید.
- معماری بلوک دیاگرام یک تلفن همراه دیجیتالی مدرن را شرح دهید.
- ویژگی‌ها، مزايا و کاربردهای تلفن‌های همراه 4G را بیان کنید.
- کاربردها و مزايا فناوری‌های مکان‌محور در تلفن‌های همراه را توضیح دهید.
- معماری و عملکرد یک ایستگاه پایه تلفن همراه را شرح دهید.
- سلول‌های کوچک و سیستم‌های آنتن توزیع شده^۱ (DAS) را تعریف کنید.

^۱Distributed Antenna Systems (DAS)

۱.۲۰ سیستم‌های تلفن همراه

یک سیستم رادیویی سلولی خدمات تلفن استاندارد را از طریق رادیو دو طرفه در مکان‌های دور ارائه می‌دهد. رادیوهای تلفن همراه یا تلفن در ابتدا در خودروها یا کامپیون‌ها نصب می‌شدند، اما امروزه اکثر آنها مدل‌های دستی هستند. تلفن‌های همراه به کاربران این امکان را می‌دهند که با سیستم تلفن استاندارد ارتباط برقرار کنند، که اجازه تماس با هر نقطه از جهان را می‌دهد.

بخش شرکت تلفن بل از T&AT سیستم رادیویی سلولی را در دهه ۱۹۷۰ توسعه داد و در اوایل دهه ۱۹۸۰ بهطور کامل آن را اجرا کرد. امروزه خدمات رادیویی تلفن همراه در سراسر جهان در دسترس است. سیستم تلفن همراه اصلی ایالات متحده، که به عنوان سیستم تلفن همراه پیشرفته یا AMPS شناخته می‌شود، مبتنی بر فناوری‌های رادیویی FM آنالوگ بود. به تدریج حذف شده و سیستم‌های تلفن همراه دیجیتالی نسل دوم (2G)، نسل سوم (3G) و نسل چهارم (4G) جایگزین شده است. این بخش یک نمای کلی از این شبکه جهانی عالی ارائه می‌دهد.

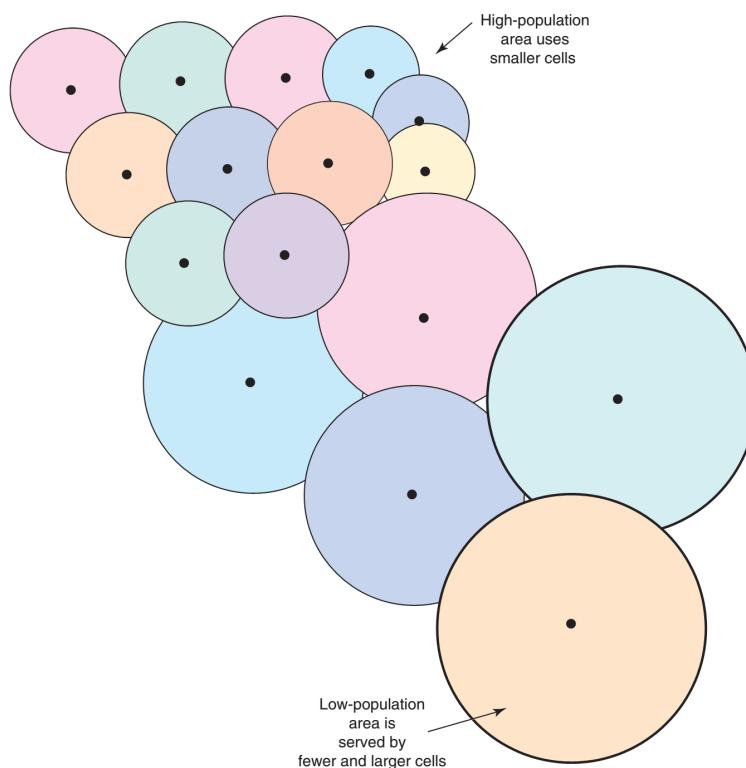


شکل ۱.۲۰: منطقه‌ای که توسط یک سیستم تلفن همراه ارائه می‌شود به مناطق کوچکی به نام سلول تقسیم می‌شود. توجه: سلول‌ها به صورت شش ضلعی ایده‌آل نشان داده شده‌اند، اما در واقعیت دایره‌ای نسبت به سایر اشکال هندسی دارند. این مناطق ممکن است همپوشانی داشته و سلول‌ها اندازه‌های متفاوتی داشته باشند.

مفهوم سلولی

مفهوم اساسی در پس سیستم رادیویی سلولی این است که به جای سرویس دهی به یک منطقه جغرافیایی معین با یک فرستنده و گیرنده، سیستم منطقه خدمات را به بسیاری از مناطق کوچکتر

به نام سلول تقسیم می‌کند، همانطور که در شکل (۱.۲۰) نشان داده شده است. سلول معمولی تنها چندین مایل مربع را پوشش می‌دهد و دارای گیرنده و فرستنده کم مصرف خود است. پوشش یک سلول به تراکم (تعداد) کاربران در یک منطقه معین بستگی دارد، شکل (۲.۲۰). برای یک شهر پر جمعیت، سلول‌های کوچک زیادی برای اطمینان از خدمات استفاده می‌شود. در مناطق روستایی کمتر جمعیت، سلول‌های کمتری استفاده می‌شود. دکلهای آتن سلول کوتاه، ناحیه پوشش سلولی را محدود می‌کنند. برج‌های بلندتر پوشش وسیع‌تری می‌دهند. سایت سلول به گونه‌ای طراحی شده است که به طور قابل اعتماد فقط به افراد و وسائل نقلیه در منطقه سلول کوچک خود خدمات ارائه دهد. هر سلول توسط خطوط تلفن یا یک پیوند (لینک) رله رادیویی مایکروویو به یک مرکز کنترل اصلی

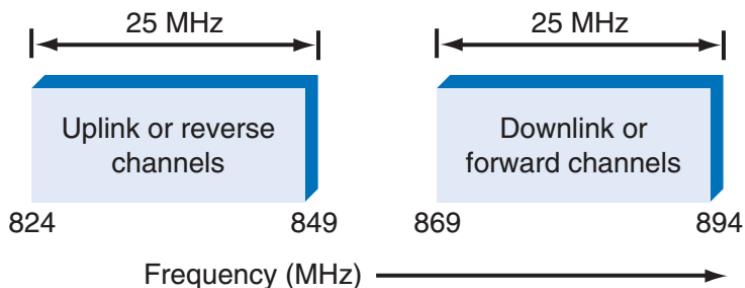


شکل ۲.۲۰: منطقه پوشش سلولی با ارتفاع آتن تعیین می‌شود.

معروف به دفتر سوئیچینگ تلفن همراه^۴ (MTSO) تمام سلول‌ها را کنترل می‌کند و رابط بین هر سلول و دفتر اصلی تلفن را فراهم می‌کند. هنگامی که شخص دارای تلفن همراه از طریق یک سلول عبور می‌کند، توسط فرستنده گیرنده سلولی سرویس می‌شود. تماس تلفنی از طریق MTSO و به سیستم تلفن استاندارد هدایت می‌شود. با حرکت فرد، سیستم به طور خودکار از یک سلول به سلول دیگر تغییر می‌کند. گیرنده در هر ایستگاه سلولی به طور مداوم قدرت سیگنال واحد سیار را نظارت می‌کند. هنگامی که قدرت سیگنال به زیر سطح مورد نظر کاهش می‌یابد، به طور خودکار سلولی را جستجو می‌کند که سیگنال واحد سیار در آن قوی‌تر باشد. کامپیوتر در

^۴Mobile Telephone Switching Office (MTSO)

باعث می‌شود که انتقال از شخص از سلول ضعیفتر به سلول قوی‌تر تغییر کند. بهاین دستدادن^۳ می‌گویند. همه این‌ها در زمان بسیار کوتاهی اتفاق می‌افتد و برای کاربر کاملاً غیرقابل توجه است. نتیجه این است که انتقال و دریافت بهینه به دست می‌آید.



شکل ۳.۲۰: طیف استاندارد تلفن همراه UHF ایالات متحده.

تخصیص فرکانس

سیستم‌های رادیویی سلولی در باندهای UHF و مایکروویو که توسط کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC) تعیین شده است، کار می‌کنند. تخصیص فرکانس‌های اولیه در محدوده ۸۰۰ تا ۹۰۰ مگاهرتز بودند که قبلاً توسط کانال‌های تلویزیونی استفاده نشده UHF ۶۸ تا ۸۳ اشغال شده بود. شکل (۳.۲۰) پرکاربردترین باندها را نشان می‌دهد. فرکانس‌های بین ۸۲۴ و ۸۴۹ مگاهرتز برای ارسال‌های آپلینک^۴ (انتقال به بالا) از تلفن همراه به ایستگاه پایه رزرو شده‌اند. بهاین کانال‌های معکوس نیز می‌گویند. فرکانس‌های بین ۸۶۹ و ۸۹۴ مگاهرتز، باندهای دان‌لینگ^۵ (انتقال به پایین) از ایستگاه پایه به تلفن همراه هستند. هر دوی این بخش‌های طیف ۲۵ مگاهرتز در ابتدا به ۸۳۲ کیلوهرتز تقسیم شدند. در حالی که هنوز از اینها استفاده می‌شود، فناوری‌های تلفن همراه مختلف از پهنهای باند متفاوتی مانند ۳۰ کیلوهرتز، ۲۰۰ کیلوهرتز و ۱/۲۵ مگاهرتز استفاده می‌کنند، بنابراین این طیف به روش‌های مختلف توسط شرکت‌های تلفن همراه مختلف در مکان‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی دیگر از بلوک‌های طیفی که معمولاً استفاده می‌شود در شکل (۴.۲۰)(الف) نشان داده شده است. باز هم، استفاده از این طیف بسته به شرکت مخابراتی تلفن همراه و منطقه جغرافیایی متفاوت است. بلوک طیفی که اخیراً اختصاص یافته است در شکل (۴.۲۰)(ب) نشان داده شده است. این دو بلوک ۶۰ مگاهرتزی به عنوان کانال‌های سیستم‌های ارتباطی شخصی^۶ (PCS) نامیده می‌شوند. در حالی که محدوده در این فرکانس‌های مایکروویو بالاتر تا حدودی کمتر از حد قابل دستیابی در باندهای UHF است، این بلوک فرکانس ظرفیت سیستم بیشتری را فراهم می‌کند، بهاین معنی که مشترکین بیشتری دارند. همچنین آنتن‌ها در این فرکانس‌ها کوچکتر هستند.

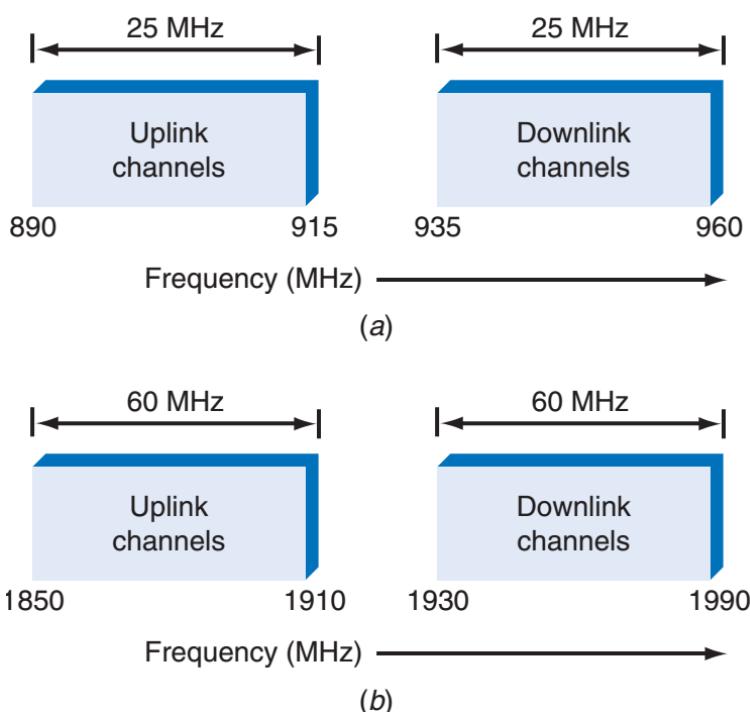
یکی از مسائل مهم در تجارت تلفن همراه، به دست آوردن طیف بیشتر برای مشترکین بیشتر است. مشترکان بیشتر به معنای درآمد بیشتر است. با این حال، طیف کمیاب و بسیار گران است.

^۳Handoff

^۴Uplink

^۵Downlink

^۶Personal Communications Systems (PCS)



شکل ۴.۲۰: طیف اضافی تلفن همراه ایالات متحده (الف) ۸۹۰ تا ۹۶۰ مگاهرتز و (ب) ۱۸۵۰ تا ۱۹۹۰ مگاهرتز، باند ۷۰۰ میلی‌سیستم ارتباطی شخصی نامیده می‌شود.

اکنون طیف در محدوده ۷۰۰ تا ۸۰۰ مگاهرتز در دسترس است. اخیراً فضای موجود در محدوده ۱۷۰۰ تا ۱۷۵۰ مگاهرتز وجود دارد. برخی از طیف‌ها نیز در محدوده ۱۹۰۰ تا ۲۳۰۰ مگاهرتز و ۲۵۰۰ تا ۲۷۰۰ مگاهرتز برای سیستم‌های جدید 4G موجود است. یک باند جدید نزدیک به ۳۶۵۰ مگاهرتز نیز موجود است. همچنین به خاطر داشته باشد که کشورهای مختلف از بلوک‌های طیف متفاوتی استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، در اروپا بیشترین استفاده از باندهای ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز است.

دسترسی چندگانه

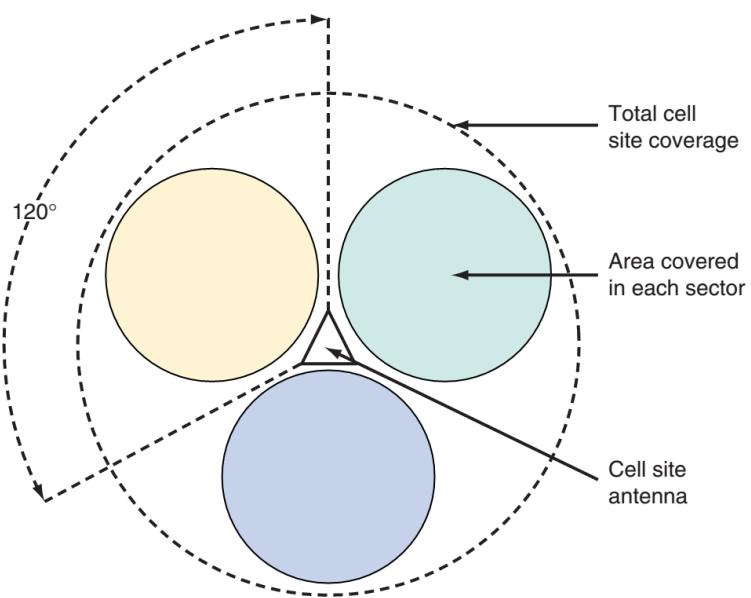
دسترسی چندگانه به نحوه تخصیص مشترکین به طیف فرکانسی اختصاص داده شده اشاره دارد. روش‌های دسترسی روش‌هایی هستند که در آن بسیاری از کاربران طیف محدودی را بهاشتراك می‌گذارند. اینها شبیه به روش‌های مالتی‌پلکس هستند که در فصل‌های قبل در مورد آنها یاد گرفتند. این تکنیک‌ها شامل استفاده مجدد از فرکانس، دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس^۴ (FDMA)، دسترسی چندگانه تقسیم زمانی^۵ (TDMA)، دسترسی چندگانه با تقسیم کد^۶ (CDMA) و دسترسی چندگانه تقسیم فضایی (SDMA) است.

استفاده مجدد از فرکانس : در استفاده مجدد فرکانس، هر تک باندهای فرکانسی توسط چندین ایستگاه پایه و کاربران بهاشتراك گذاشته می‌شود. این امر با اطمینان از عدم تداخل یک مشترک یا

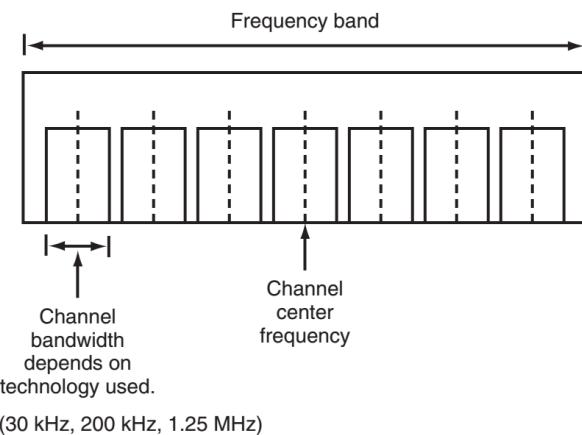
^۴Frequency-Division Multiple Access (FDMA)

^۵Time-Division Multiple Access (TDMA)

^۶Code-Division Multiple Access (CDMA)



شکل ۵.۲۰: الگوی تشعشع آنتن افقی یک سایت سلول مشترک که 120° بخش را نشان می‌دهد و امکان استفاده مجدد از فرکانس را فراهم می‌کند.

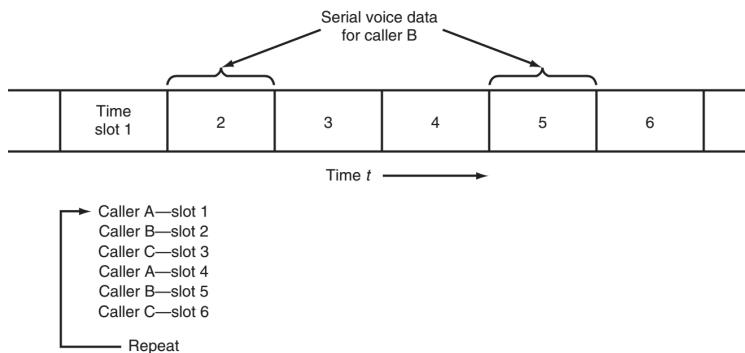


شکل ۶.۰: طیف دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس (FDMA).

ایستگاه پایه با دیگری امکان پذیر است. این امر با کنترل عواملی مانند توان انتقال، فاصله ایستگاه پایه و ارتفاع آنتن و الگوهای تشعشع به دست می‌آید. با آنتن‌های کم توان و ارتفاع کمتر، برد سیگнал تنها به یک مایل یا بیشتر محدود می‌شود. علاوه بر این، بیشتر ایستگاه‌های پایه از آنتن‌های بخش‌بندی شده با الگوهای تشعشعی 120° استفاده می‌کنند که تنها بخشی از منطقه‌ای را که پوشش می‌دهند ارسال و دریافت می‌کنند، شکل (۵.۲۰). در هر شهر معین، فرکانس‌های یکسانی بارها و بارها با جدا نگه داشتن ایستگاه‌های پایه سایت سلولی از یکدیگر استفاده می‌شوند.

دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس: سیستم‌های FDMA مانند مالتیپلکسینگ تقسیم فرکانس

هستند که به بسیاری از کاربران اجازه می‌دهند تا یک بلوک طیف را به سادگی با تقسیم آن به کانال‌های کوچکتر به اشتراک بگذارند، شکل (۶.۲۰). به هر کانال از یک باند یک شماره اختصاص داده شده یا با فرکانس مرکزی کانال مشخص می‌شود. به هر کانال یک مشترک اختصاص داده شده است. عرض کانال معمولی 30 کیلوهرتز ، 200 کیلوهرتز ، $1/25\text{ مگاهرتز}$ و 5 مگاهرتز است. معمولاً دو باند مشابه وجود دارد، یکی برای ارتباط به بالا (uplink) و دیگری برای ارتباط به پائین (downlink).



شکل ۷.۲۰: دسترسی چندگانه تقسیم زمانی (TDMA). تماس گیرندگان مختلف از زمان‌های متفاوتی در یک کانال استفاده می‌کنند.

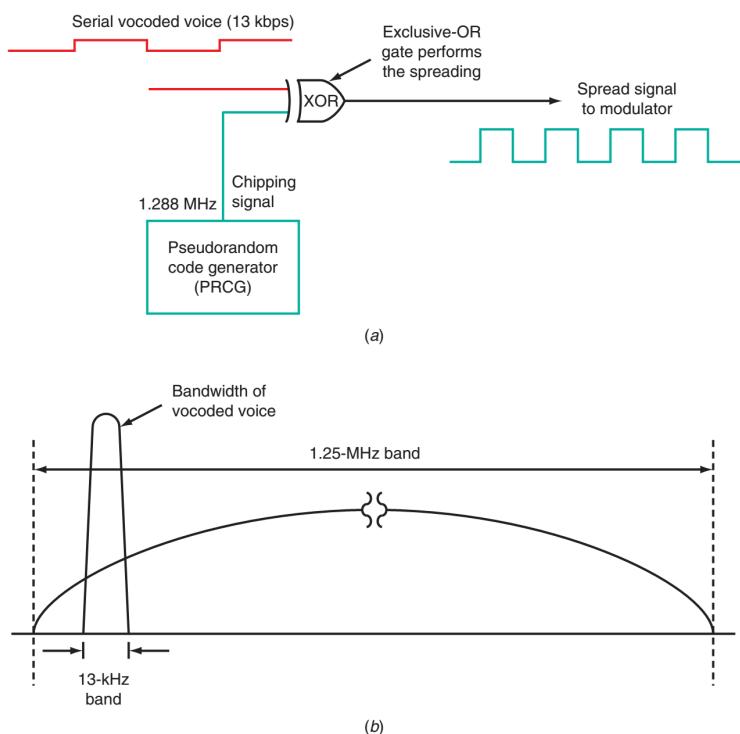
دسترسی چندگانه تقسیم زمان: دسترسی چندگانه تقسیم زمان ممکن به سیگنال‌های دیجیتال است و بر روی یک کانال عمل می‌کند. چندین کاربر از زمان‌های مختلف استفاده می‌کنند. همانطور که شکل (۷.۲۰) نشان می‌دهد، از آنجایی که سیگنال صوتی با سرعت بالایی نمونه‌برداری می‌شود، کلمات داده را می‌توان در شکاف‌های زمانی مختلف قرار داد. از دو سیستم رایج TDMA در حال استفاده، یکی به سه کاربر در هر کانال فرکانس و دیگری به هشت کاربر در هر کانال اجازه می‌دهد.

دسترسی چندگانه تقسیم کد: دسترسی چندگانه تقسیم کد CDMA فقط نام دیگری برای طیف گستردگی است. در صد بالایی از سیستم‌های تلفن همراه از طیف گستردگی توالی مستقیم (DSSS) استفاده می‌کنند. در اینجا سیگنال‌های صوتی دیجیتال در مداری به نام Vocoder کدگذاری می‌شوند تا سیگنال صوتی فشرده شده دیجیتالی سریالی با سرعت $13\text{ کیلوبیت بر ثانیه}$ تولید کنند. سپس با یک سیگنال تراشه ^{۱۰} فرکانس بالاتر ترکیب می‌شود. سیستم از سیگنال تراشه $1/288\text{ مگابیت بر ثانیه}$ برای رمزگذاری صدا استفاده می‌کند و سیگنال را در یک کانال $1/25\text{ مگاهرتز}$ پخش می‌کند، شکل (۸.۲۰). با کدگذاری منحصر به فرد، حداقل 64 مشترک می‌توانند یک کانال $1/25\text{ مگاهرتز}$ را به اشتراک بگذارند. تکنیک مشابهی با سیستم CDMA باند پهن در تلفن‌های همراه نسل سوم استفاده می‌شود. نرخ تراشه $3/84\text{ مگابیت بر ثانیه}$ در یک کانال 5 مگاهرتز برای پذیرش چندین کاربر استفاده می‌شود.

دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس متعدد (OFDMA): دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس متعدد روش دسترسی مورد استفاده با OFDMA است. OFDMA از صدھا و حتی هزاران حامل فرعی در یک کانال پهن باند استفاده می‌کند. این تعداد زیادی از حامل‌های فرعی را می‌توان به گروه‌های کوچکتر تقسیم کرد و هر گروه را می‌توان به یک کاربر اختصاص داد. به این ترتیب

^{۱۰}Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

^{۱۱}Chipping Signal



شکل ۸.۲۰: دسترسی چندگانه تقسیم کد (CDMA). (الف) پخش سیگنال. (ب) پهنای باند حاصل.

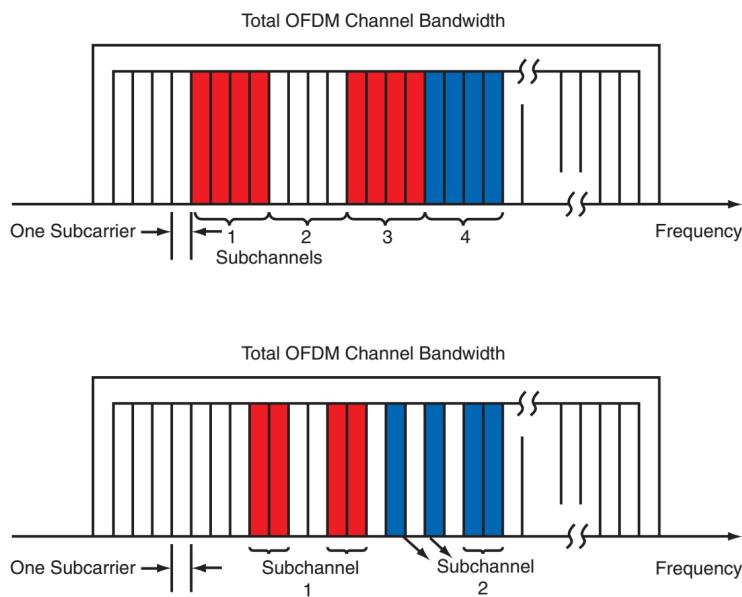
بسیاری از کاربران می‌توانند از کanal پهن باند اختصاص داده شده به سیگنال OFDMA استفاده کنند.

شکل (۹.۲۰) اصول آنرا نشان می‌دهد. گروههایی از حاملهای فرعی برای ایجاد یک کanal فرعی که به یک کاربر اختصاص داده شده است، تشکیل می‌شوند. در برخی از سیستم‌ها، حاملهای فرعی نباید به هم پیوسته باشند، بلکه ممکن است در داخل کل پهنای باند سیگنال OFDMA پخش شوند.

دسترسی چندگانه تقسیم فضائی: این شکل دسترسی در واقع گسترش استفاده مجدد از فرکانس است. از آنتن‌های بسیار جهت‌دار برای شناسایی دقیق کاربران و حذف دیگران در همان فرکانس استفاده می‌کند. در شکل (۱۰.۲۰)، پرتوهای بسیار باریک آنتن در ایستگاه پایه سایت سلولی می‌توانند روی یک مشترک قفل شوند اما در حالی که هر دو مشترک از فرکانس یکسانی استفاده می‌کنند، دیگری را مسدود می‌کنند. فناوری آنتن مدرن با استفاده از آرایه‌های فازی تطبیقی این امکان را فراهم می‌کند. چنین آنتن‌هایی به اپراتورهای تلفن همراه اجازه می‌دهند تا تعداد مشترکین خود را با استفاده مجدد از فرکانس تهاجمی تر افزایش دهند، زیرا تبعیض کمتری با آنتن‌ها حاصل می‌شود. SDMA همچنین به طور گسترده در شبکه‌های محلی بی‌سیم (WLAN) و سایر کاربردهای بی‌سیم پهن باند استفاده می‌شود.

دی‌پلکسینگ (ارتباط دوطرفه)

دی‌پلکسینگ Duplexing به روش‌هایی اطلاق می‌شود که مکالمات دو طرفه رادیویی یا تلفنی انجام



شکل ۹.۲۰: مفهوم OFDMA.

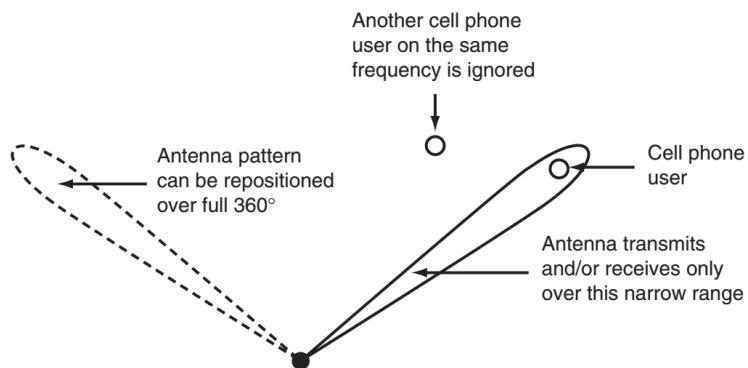
می‌شود. بسیاری از کاربردهای رادیویی دو طرفه هنوز از نیمه دوطرفه استفاده می‌کنند که در آن مکالمه یک طرفه در یک زمان انجام می‌شود. افراد ارتباط گیرنده بهنوبت صحبت می‌کنند و گوش می‌دهند. ارتباطات تلفنی همیشه دوبلکس کامل بوده است، جایی که هر دو طرف می‌توانند همزمان ارسال و دریافت کنند. تمامی سیستم‌های تلفن همراه فول دوبلکس هستند.

اما برای دستیابی به عملیات دوبلکس کامل، باید تمہیدات خاصی در نظر گرفته شود. رایج‌ترین ترتیب دوبلکس گردن تقسیم فرکانس^{۱۲} (FDD) نام دارد. در FDD، کانال‌های فرکانس جداگانه‌ای برای عملکردهای ارسال و دریافت اختصاص داده شده است. کانال‌های ارسال و دریافت به گونه‌ای فاصله دارند که در داخل مدارهای تلفن همراه یا ایستگاه پایه با یکدیگر تداخل نداشته باشند. کانال‌های ارتباط بالا و پائین در شکل (۳.۲۰) و (۴.۲۰) نمونه هستند.

ترتیب دیگر دوبلکس گردن تقسیم زمان^{۱۳} (TDD) است. این کمتر رایج است اما در سیستم‌های کمی استفاده می‌شود. سیستم داده‌های ارسال و دریافت را به شکاف‌های زمانی مختلف، هر دو در یک فرکانس اختصاص می‌دهد. به عنوان مثال، داده‌های ارسالی و دریافتی در شکاف‌های زمانی متواالی متناوب می‌شوند. در حالی که سیگنال‌های ارسالی و دریافتی در واقع در زمان‌های مختلف اتفاق می‌افتد، سرعت سیگنال‌ها به اندازه‌ای است که انسان احساس می‌کند که در همان زمان در حال رخدادن هستند. مزیت اصلی TDD این است که فقط یک کانال مورد نیاز است. با FDD دو کانال مجزا مورد نیاز است. یک سیگنال TDD از نیمی از طیف FDD استفاده می‌کند. با این حال، بسیار بیشتر از TDD استفاده می‌شود.

^{۱۲}Frequency Division Duplexing (FDD)

^{۱۳}Time Division Duplexing (TDD)



شکل ۱۰.۲۰: مفهوم دسترسی چندگانه تقسیم فضایی (SDMA) با استفاده از آنتن‌های بسیار جهتدار

۲.۲۰ مروری بر صنعت سلوی

صنعت تلفن همراه یکی از بزرگترین صنایع در جهان است. این کسب و کار که به عنوان کسب و کار بی‌سیم یا موبایل نیز شناخته می‌شود، سالانه میلیاردها دلار درآمد برای شرکت‌های تلفن، تولید کنندگان تلفن همراه و سایر مشاغل وابسته به همراه دارد. و همانطور که احتمالاً می‌دانید، تلفن همراه به محبوب‌ترین محصول مصرفی جهان تبدیل شده است. سالانه بیش از یک میلیارد تلفن همراه جدید فروخته می‌شود. در کشورهای توسعه یافته، اکثر مصرف کنندگان در حال حاضر یک نوع تلفن همراه دارند. چین بزرگترین کاربر تلفن همراه است. ایالات متحده در رتبه دوم از نظر تعداد کل کاربران قرار دارد. تلفن همراه آنقدر فراگیر است که بر نحوه زندگی و کار و نحوه تجارت ما تأثیر زیادی گذاشته است. این بخش نگاهی کوتاه به نحوه عملکرد صنعت سلوی و برخی از روندها و مسائل مهم مرتبط با آن دارد.

حامل‌های سلوی

اپراتورهای تلفن همراه، که به عنوان اپراتورهای شبکه نیز شناخته می‌شوند، محور اصلی عملکرد تجارت بی‌سیم تلفن همراه هستند. در ایالات متحده، چهار اپراتور عمده وجود دارد: Verizon، T&AT و T-Mobile و Sprint. تعدادی اپراتور کوچکتر نیز وجود دارد، اما چهار مورد ذکر شده بیش از ۹۰ درصد از تجارت را تشکیل می‌دهند. اینها سازمان‌هایی هستند که زیرساخت شبکه سلوی را ایجاد می‌کنند و خدمات تلفن همراه را ارائه می‌دهند. آنها همچنین کسانی هستند که تلفن‌های همراه را به مصرف کننده عرضه می‌کنند. حتی اگر اپراتورها خودشان تلفن‌های همراه را طراحی یا تولید نمی‌کنند، آنها تا حد زیادی بخشی از فرآیند طراحی هستند.

دیگر بازیگران اصلی خود شرکت‌های تلفن همراه هستند. رهبران سامسونگ و اپل هستند. سایر پخش‌کننده‌ها عبارتند از LG، HTC، Nokia/Microsoft، Google/Motorola و پخش‌کننده‌های جدیدتر مانند Lenovo و Huawei. این شرکت‌ها تلفن‌های همراه را مطابق با مشخصات ارائه شده توسط اپراتورها طراحی و می‌سازند.

دلیل اینکه اپراتورها تأثیر زیادی در خود تلفن‌ها دارند، مربوط به دارایی‌های طیف فرکانس آنها است. هر اپراتور به محدوده خاصی از باندهای فرکانسی خود دسترسی دارد، و تلفن‌ها باید به گونه‌ای ساخته شوند که با دارایی‌های آنها مطابقت داشته باشد. این بدان معنی است که در اکثر موارد یک

تلفن همراه خریداری شده از T&AT در شبکه Verizon و غیره کار نمی‌کند. عامل دیگر این است که برخی از اپراتورها از فناوری‌های مختلف نسل دوم و سوم استفاده می‌کنند که از حاملی به حامل دیگر سازگار نیستند.

از دیگر بازیگران این صنعت می‌توان به شرکت‌های نرم افزاری اشاره کرد که سیستم عامل‌های تلفن‌های همراه را ارائه می‌کنند. پیشروها گوگل با سیستم عامل اندروید، اپل با نرم افزار iOS و مایکروسافت هستند. همچنین شرکت‌های زیادی وجود دارند که نرم‌افزارهای اضافی را در قالب برنامه‌های کاربردی (برنامه‌ها) ارائه می‌کنند که به تلفن همراه توانایی بسیار بیشتری از آنچه در ابتدا تصور می‌شد می‌دهد. در واقع می‌توانید به تلفن همراه به عنوان یک میکرو‌کامپیوتر همه‌منظوره با قدرت بالا با رادیو داخلی نگاه کنید. بیشتر برنامه‌های نرم‌افزاری از قابلیت ارتباطات رادیویی استفاده نمی‌کند. شرکت‌های نیمه‌هادی نیز بازیگران اصلی هستند. آنها تراشه‌هایی را برای پیاده سازی تلفن‌های همراه و تجهیزات ایستگاه پایه توسعه داده و ارائه می‌کنند.

نسل‌های تکنولوژی

صنعت سلوالی نه تنها بدليل تقاضای مشتری برای خدمات، بلکه همچنین توسط فناوری موجود هدایت می‌شود. در این راستا، صنعت سلوالی یکی از سریع‌ترین تحولات موجود است. محصولات و خدمات جدید به همان سرعتی که تصور و توسعه می‌باشد ارائه می‌شوند. تغییرات در استانداردهای تکنولوژیکی نیز تغییرات سریعی را به همراه دارد. خود این فناوری به نسل‌ها تقسیم شده و توسط آن تعریف می‌شود.

نسل اول تلفن‌های همراه از فناوری آنالوگ با مدولاسیون فرکانس استفاده می‌کردند. این به سرعت کنار گذاشته شد زیرا مشخص شد که شرکت‌های مخابراتی نمی‌توانند خدمات کافی برای پاسخگویی به تقاضا ارائه دهند. در نتیجه، نسل اول به سرعت با فناوری جدیدتر و نسل دوم تلفن همراه دیجیتال (2G) جایگزین شد.

استانداردهای چندگانه 2G در سراسر جهان توسعه یافته است، اما تنها دو فناوری و استاندارد اصلی تا به امروز باقی مانده اند. اینها شامل GSM و CDMA اصلی است. اگرچه امروزه فناوری 2G در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما به تدریج در حال محو شدن است و بسیاری از اپراتورها تمایل خود را برای پایان دادن به خدمات نسل دوم در آینده نزدیک اعلام کرده‌اند. این به آن‌ها اجازه می‌دهد تا طیف ارزشمند خود را برای ظرفیت بیشتر مشترک و نرخ داده بالاتر استفاده کنند.

یک عامل کلیدی توسعه خدمات داده بود که در طول نسل دوم اتفاق افتاد. تلفن‌های همراه در ابتدا به عنوان تلفن‌های صوتی طراحی شده بودند، اما به سرعت کشف شد که می‌توان از آنها برای اهداف داده استفاده کرد. برای تلفن‌های 2G، سرعت داده آهسته بود، در نتیجه عملکردها را به کاربردهای ساده مانند پیامک و ایمیل محدود می‌کرد. هنگامی که قابلیت‌های داده‌ای بیشتر کشف شد، تقاضا برای سرعت‌های بالاتر و کاربردهای عجیب‌تر توسعه یافت. این امر منجر به تولید نسل سوم تلفن‌های همراه شد.

تلفن‌های همراه نسل سوم (3G) همچنان از تکنیک‌های استاندارد صدای دیجیتال استفاده می‌کنند، اما قابلیت داده با سرعت بالا را نیز توسعه می‌دهند. مدولاسیون و روش‌های دسترسی جدید ایجاد شد و استانداردها تصویب شدند. تلفن‌های نسل سوم به سرعت محبوب شدند و طی یک دوره چند ساله اپراتورها از فناوری جدید استفاده کردند و شبکه‌های خود را توسعه دادند. تلفن‌های همراه جدید برای استفاده از پتانسیل کاربردها توسعه یافته‌اند.

در این مدت، چندین فناوری رقیب 3G ایجاد شد. این فناوری‌های ناسازگار توسط اپراتورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت و تلفن‌های همراه و شبکه‌ها را ناسازگار ساخت. این در نهایت منجر به تمایل به یک استاندارد صنعتی کامل شد که بهنوبه خود منجر به توسعه تلفن‌ها و سیستم‌های نسل چهارم شد.

نسل چهارم (4G) باعث ایجاد یک استاندارد یا خانواده واحد از استانداردها شده است که همه حامل‌ها می‌توانند آن را اتخاذ کنند. این فناوری 4G به عنوان تکامل طولانی مدت (LTE)^{۱۴} (LTE) شناخته می‌شود، و به‌آرامی در یک شکل توسط تمام اپراتورهای ایالات متحده و سراسر جهان پذیرفته می‌شود. در حالی که اکثر اپراتورهای اصلی قبلًا به فناوری LTE4G تبدیل شده‌اند، این فرآیند هنوز در سراسر ایالات متحده در حال اجرا است و پیشرفت در سراسر جهان بسیار متفاوت است.

سیستم‌ها و تلفن‌های 4G به سرعت داده بسیار بالاتر و قابلیت‌های شفقت‌انگیز تلفن همراه، به‌ویژه توانایی دریافت و تولید ویدیو منجر شده‌اند. پیشرفت‌های فناوری نه تنها قابلیت داده‌های پرسرعت لازم برای ویدیو، بلکه صفحه‌های لمسی رنگی بزرگ را نیز به‌ما داده است و تلفن همراه را به محصولی محبوب‌تر از همیشه تبدیل کرده است.

در حالی که اکثر اپراتورها هنوز سیستم‌های LTE4G را در ایالات متحده و سایر کشورها پیاده‌سازی می‌کنند، کار برای تعریف نسل پنجم بعدی در حال انجام است. هدف اصلی 5G در دسترس قرار دادن خدمات تلفن همراه و داده در محدوده وسیع‌تری و ارائه سرعت داده حتی بالاتر است.

روندها و مسائل بحرانی

روند اساسی در صنعت سلوکی، رشد مداوم و توسعه فناوری است. در کشورهای در حال توسعه، اشیاع بازار در حال حاضر به دست آمده است، به این معنی که اکثر افراد در حال حاضر تلفن همراه و خدمات دارند. این امر باعث کاهش نرخ رشد می‌شود، اما همچنان فرستی را برای مصرف کنندگان فراهم می‌کند تا گوشی‌ها و خدمات بهبودیافته را ارتقا دهند. علاوه بر این، رشد قابل توجهی هنوز در سایر نقاط جهان، به‌ویژه کشورهای توسعه نیافرته که خدمات تلفنی معمولاً در دسترس نیستند، وجود دارد. در بسیاری از نقاط جهان، خدمات تلفن همراه تنها خدمات تلفنی موجود است.

روند اصلی دیگر کاهش تعداد مشتریان تلفن سیمی است. بسیاری از مصرف کنندگان قبلًا تلفن‌های سیمی اولیه خود را رها کرده‌اند و فقط از تلفن‌های همراه استفاده می‌کنند. امروزه بیش از ۵۰ درصد از مصرف کنندگان در حال حاضر از تلفن همراه به عنوان خدمات ارتباطی اولیه خود استفاده می‌کنند و به‌نظر می‌رسد که این روند همچنان ادامه دارد.

روند دیگر این است که اپراتورها به ایجاد شبکه‌های خود و بهبود نرخ داده‌ها در تلاش برای دستیابی به مصرف کنندگان بیشتر و جذب تجارت بیشتر ادامه می‌دهند. با همگام شدن با آن، سازندگان تلفن همراه همچنان به ارائه تلفن‌های همراه پیچیده‌تر و توانمندتری که مصرف کنندگان می‌خواهند ادامه می‌دهند.

در مورد مسائل حیاتی، اولین مورد در دسترس بودن طیف فرکانس است. فقط بخش‌های خاصی از طیف فرکانس (تقریباً ۶۰۰ مگاهرتز تا ۴ گیگاهرتز) برای سرویس تلفن همراه مفید است و این طیف فرکانس در حال حاضر به شدت اشغال شده است. توانایی یک اپراتور برای ادامه ارائه ظرفیت خدمات گستره‌ده و همچنین سرعت‌های بالاتر به شدت با مقدار طیف موجود تعیین می‌شود. ظرفیت بالا و سرعت بالا نیاز به پهنای باند وسیع‌تری دارد. با این حال، تنها مقدار مشخصی از طیف در

^{۱۴}Long Term Evolution (LTE)

دسترس است، و بیشتر آن در حال حاضر در مالکیت و اشغال است. امروزه اپراتورهایی که می‌خواهند فعالیت‌های خود را گسترش دهند، باید طیف را از دیگران بخرند یا از طریق آژانس نظارتی، کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC)، در مزایده‌های معمول خود خریداری کنند. طیف میلیاردی دلار هزینه دارد و تنها بزرگترین اپراتورها می‌توانند آن را بپردازنند.

برای حل این مشکل، FCC تلاش کرده است تا طیف را از سایر دارندگان طیف، مانند دولت، ارتش، و پخش کننده‌های تلویزیونی آزاد کند. پخش کننده‌های تلویزیون در طول تغییر به تلویزیون دیجیتال در سال ۲۰۰۹، طیف را کنار گذاشتند. باند ۷۰۰ تا ۸۰۰ مگاهرتز اکنون در دسترس است و در حال حاضر توسط برخی از حامل‌های سلولی استفاده می‌شود. بخش دیگری از طیف در محدوده ۶۰۰ تا ۷۰۰ مگاهرتز در راه است که به بالاترین قیمت پیشنهادی به حراج گذاشته خواهد شد. در نهایت، فرکانس‌های بالاتر باید برای دستیابی به خدمات و نرخ داده بهبودیافته استفاده شوند. استانداردهای ۵G در حال حاضر به دنبال باندهای موج میلی‌متری (۲۸ تا ۷۰ گیگاهرتز) به عنوان یک راه حل بالقوه برای نیاز به افزایش نگهداری طیف هستند.

موضوع دیگر این است که تا چه زمانی باید از فناوری قدیمی‌تر پشتیبانی شود. با قابلیت پرسرعت LTE 4G امروزی، بیشتر تماس‌های صوتی هنوز توسط شبکه‌های مدار سوئیچ ۲G و ۳G شرکت‌های مخابراتی انجام می‌شود. بهزودی اینها به نفع خدمات صوتی پروتکل اینترنت (IP) مانند صدا از طریق (VoLTE) حذف خواهند شد. این هنوز به طور کامل توسط اپراتورها اجرا نشده است. و تعداد کمی از تلفن‌های همراه از آن پشتیبانی می‌کنند. با این حال این روش صوتی آینده است. در این میان، همه تلفن‌های همراه، علی‌رغم این واقعیت که ممکن است دارای LTE 4G باشند، برای ارائه خدمات صوتی باید به قابلیت ۲G و یا ۳G ادامه دهند.

۳.۲۰ سیستم‌های تلفن همراه دیجیتالی ۲G و ۳G

فناوری سلولی اصلی AMPS از ارتباطات آنالوگ FM استفاده می‌کرد. با این حال، امروزه تمام تلفن‌های همراه و سیستم‌های جدید از روش‌های دیجیتالی استفاده می‌کنند. این سیستم‌های تمام دیجیتالی عمدها برای افزایش ظرفیت سیستم‌های تلفن همراه در حال حاضر ایجاد شده‌اند. رشد سریع تعداد مشترکین بسیم اپراتورها را مجبور کرد که به دنبال روش‌های جدید و کارآمدتر برای افزایش تعداد کاربرانی باشند که یک سیستم می‌تواند مدیریت کند. مشکل اصلی این بود که حامل‌ها توسط کمیسیون ارتباطات فدرال به بخش‌های خاصی از طیف فرکانس محدود شده بودند. فضای اضافی برای گسترش در دسترس نبود. تکنیک‌های دیجیتالی راه‌های متعددی را برای مضاعف کردن بسیاری از کاربران در یک فضای طیف ارائه می‌دهند.

استفاده از تکنیک‌های دیجیتالی چندین مزیت اضافی به همراه داشت. سیستم‌های ارتباط دیجیتال ذاتاً قوی‌تر از سیستم‌های آنالوگ هستند، زیرا در محیط‌های پر سر و صدا (نویزی) قابل اعتمادتر هستند. علاوه بر این، مدارهای دیجیتال را می‌توان کوچکتر و با مصرف انرژی کارآمدتر ساخت، بنابراین گوشی‌ها می‌توانند جمع و جورتر باشند و با یک بار شارژ باتری مدت زمان بیشتری کار کنند. علاوه بر این، تلفن‌های همراه دیجیتالی انتقال داده‌ها و همچنین صدا را بسیار تسهیل می‌کنند، به طوری که خدمات داده مانند ایمیل و دسترسی به اینترنت با تلفن همراه امکان پذیر است. روش‌های دیجیتال همچنین قابلیت داده با سرعت بالا را ارائه می‌دهند که امکان استفاده از ویدیو، بازی و کاربردهای رسانه‌های اجتماعی را فراهم می‌کند.

اولین تلفن‌های همراه دیجیتالی به عنوان تلفن‌های نسل دوم (2G) شناخته می‌شوند. امروزه از تلفن‌های همراه و سیستم‌های نسل سوم (3G) و نسل چهارم (4G) استفاده می‌شود. اما تلفن‌های 2G هنوز در ایالات متحده و سراسر جهان در حال استفاده هستند. گوشی‌های 2G در نهایت از بین خواهند رفت. این بخش سیستم‌های 2G را که هنوز در حال استفاده هستند پوشش می‌دهد و سیستم‌های مختلف 3G را که عمدهاً جایگزین فناوری 2G شده‌اند، توضیح می‌دهد. تلفن 4G در یک بخش جداگانه مورد بحث قرار گرفته است.

سیستم‌های تلفن همراه 2G

سه سیستم پایه تلفن همراه دیجیتالی نسل دوم (2G) توسعه و به کار گرفته شد. دو مورد از مالتی‌پلکس تقسیم زمانی استفاده می‌کنند و سومی از طیف گسترده (SS) یا CDMA استفاده می‌کند. سیستم‌های TDM سیستم جهانی ارتباطات سیار^{۱۵} (GSM) و استاندارد IS-136 برای دسترسی چندگانه تقسیم زمانی هستند. سیستم SS دسترسی چندگانه با تقسیم کد است. سیستم IS-136 زود کنار گذاشته شد و با GSM جایگزین شد. هر دو GSM و CDMA هنوز به طور گسترده در سراسر جهان مستقر هستند.

وکودرها: برای استفاده از تکنیک‌های انتقال داده دیجیتال ابتدا باید صدا دیجیتالی شود. مداری که این کار را انجام می‌دهد و کودر^{۱۶} است، نوع خاصی از مبدل آنالوگ به دیجیتال (A/D) و مبدل دیجیتال به آنالوگ (D/A). با فرکانس‌های صوتی تا ۴ کیلوهرتز، حداقل نرخ نمونه‌برداری نایکوئیست^{۱۷} دو برابر بالاترین فرکانس یا ۸ کیلوهرتز است. این بدان معنی است که مبدل A/D در یک کد صوتی باید هر ۱۲۵ میکرو ثانیه از سیگنال صوتی نمونه برداری کند و یک کلمه با یافری متناسب تولید کند. با فرض اینکه یک مقدار ۸ بیتی است، در طول دوره ۱۲۵ میکرو ثانیه، ۸ بیت به صورت سریالی ارسال می‌شود. این بهتر خ داده سریال $125/8 = 15,625\mu s/bit = 64 kbps$ یا $125/8 \times 10^{-9} = 1/15,625$ است. این نحوه‌ای است که سیستم تلفن T1 در فصل دوازدهم توضیح داده شده است.

این سیگنال داده سریال، که نشان دهنده صدا است، اکنون برای مدولاسیون حامل و سیگنال ترکیبی ارسال شده از طریق کانال اختصاص داده شده استفاده می‌شود. به یاد داشته باشید که پهنهای باند مورد نیاز برای انتقال سیگنال دیجیتال در درجه اول بهتر خ داده بستگی دارد. هرچه سرعت داده بیشتر باشد، پهنهای باند مورد نیاز بیشتر است. به عنوان یک قاعده کلی، پهنهای باند تقریباً برابر با نرخ داده است. به عنوان مثال، یک سیگنال ۶۴ کیلوبیت بر ثانیه به پهنهای باند حدود ۶۴ کیلوهرتز نیاز دارد. که نشان دهنده ۱ بیت/هرتز است. روش‌های مدولاسیون مختلف منجر به درجات متفاوتی از نرخ داده در هر پهنهای باند می‌شود. برخی از آنها از نظر طیفی کارآمدتر از بقیه هستند. رتبه بندی ۱ بیت/هرتز اساساً فضای گرانبهای طیف را هدر می‌دهد. اگر قرار است از کانال‌های AMPS ۳۰ کیلوهرتز برای انتقال صدای ۶۴ کیلوبیت بر ثانیه استفاده شود، به طرح مدولاسیون کارآمدتری یا تکنیک دیگری مورد نیاز است.

عملکرد اصلی و کودر فشرده‌سازی داده‌ها است. تکنیک‌های فشرده‌سازی داده‌ها برای پردازش سیگنال صوتی دیجیتالی به گونه‌ای استفاده می‌شود که تعداد بیت‌های مورد نیاز برای نمایش قابل اعتماد صدا را کاهش دهد. این بهنوبه خود اجازه می‌دهد تا سرعت انتقال داده به سطحی کاهش یابد که با پهنهای باند کانال موجود سازگار باشد. در تلفن‌های همراه مدرن از انواع طرح‌های فشرده‌سازی

^{۱۵}Global System for Mobile Communications (GSM)

^{۱۶}Vocoder

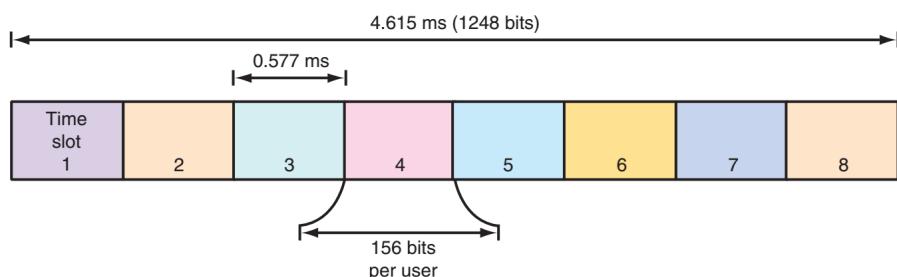
^{۱۷}Nyquist

داده‌های کدگذاری صوتی استفاده می‌شود. یک مبدل A/D توسط یک تراشه پردازش سیگنال دیجیتال (DSP) دنبال می‌شود که فشرده‌سازی را مطابق با برخی از الگوریتم‌ها انجام می‌دهد. سپس صدای‌گذار یک سیگنال صوتی دیجیتال سریالی با سرعت $\frac{7}{4}$ تا ۱۳ کیلوبیت در ثانیه تولید می‌کند. این به سه تا هشت سیگنال صوتی اجازه می‌دهد تا با استفاده از TDM یک کانال را اشغال کند. در گیرنده، داده‌های دیجیتالی دمودوله شده به وکور فرستاده می‌شود، جایی که یک تراشه DSP بیت‌های سریال را می‌گیرد و آنها را به کلمات باینری تبدیل می‌کند که صدا را نشان می‌دهد. سپس یک مبدل D/A صدا را بازسازی می‌کند. همه تلفن‌های 2G و 3G دارای یک کد صوتی هستند.

خوب است بدانید که:

برای تخمین پهنای باند لازم برای انتقال یک نرخ داده مشخص، از قانون سرانگشتی مطابقت یک به یک بین سرعت داده و پهنای باند استفاده کنید، به عنوان مثال، نرخ داده یک مگابیت در ثانیه و پهنای باند یک مگاهرتز.

GSM: پرکاربردترین سیستم دیجیتال 2G است. GSM در ابتدا مخفف «گروه ویژه موبایل» بود، اما به عنوان «سیستم جهانی برای ارتباطات موبایل» شناخته شد. این در اروپا تحت نظارت موسسه استاندارد سازی ارتباطات از راه دور اروپا (ETSI) توسعه یافت تا جایگزین بسیاری از سیستم‌های آنالوگ ناسازگار مورد استفاده در کشورهای مختلف اروپایی شود. GSM برای اجازه رومینگ گستردگی از کشوری به کشور دیگر در سراسر اروپا طراحی شده است. GSM عمدها در باند ۹۰۰ مگاهرتز در اروپا پیاده‌سازی می‌شود، اما در اروپا نیز در محدوده ۱۸۰۰ مگاهرتز (۱/۸ گیگاهرتز) استفاده می‌شود، جایی که از آن به عنوان سیستم سلولی دیجیتال (DCS) یا DCS-1800 یاد می‌شود. GSM همچنین به طور گستردگی در ایالات متحده در هر دو باند سیستم ارتباط شخصی ۸۰۰ و ۱۹۰۰ مگاهرتز اجرا می‌شود.



شکل ۱۱.۲۰: یک قاب TDMA برای هشت اسلات(شکاف) زمانی.

GSM از TDMA استفاده می‌کند. رمزگذار صوتی از یک طرح فشرده‌سازی به نام کدگذاری منظم پالس تحریک-خطی پیش‌بینی (RPE-LPC) یا کدگذاری خطی پیش‌گویی خطی برانگیخته باقی‌مانده (RELP) استفاده می‌کند که یک جریان بیت صوتی ۱۳ کیلوبیت بر ثانیه تولید می‌کند. این اجازه می‌دهد تا هشت تماس تلفنی به طور همزمان در یک کانال ۲۰۰ کیلوهرتز ارسال شود. روش مدولاسیون که به نام کلیدزنی حداقل شیفت گاوی (GMSK) شناخته می‌شود، شبیه کلیدزنی تغییر فرکانس (FSK) است، اما ویژگی‌های طیفی بهبود یافته‌ای دارد که امکان انتقال سرعت‌های

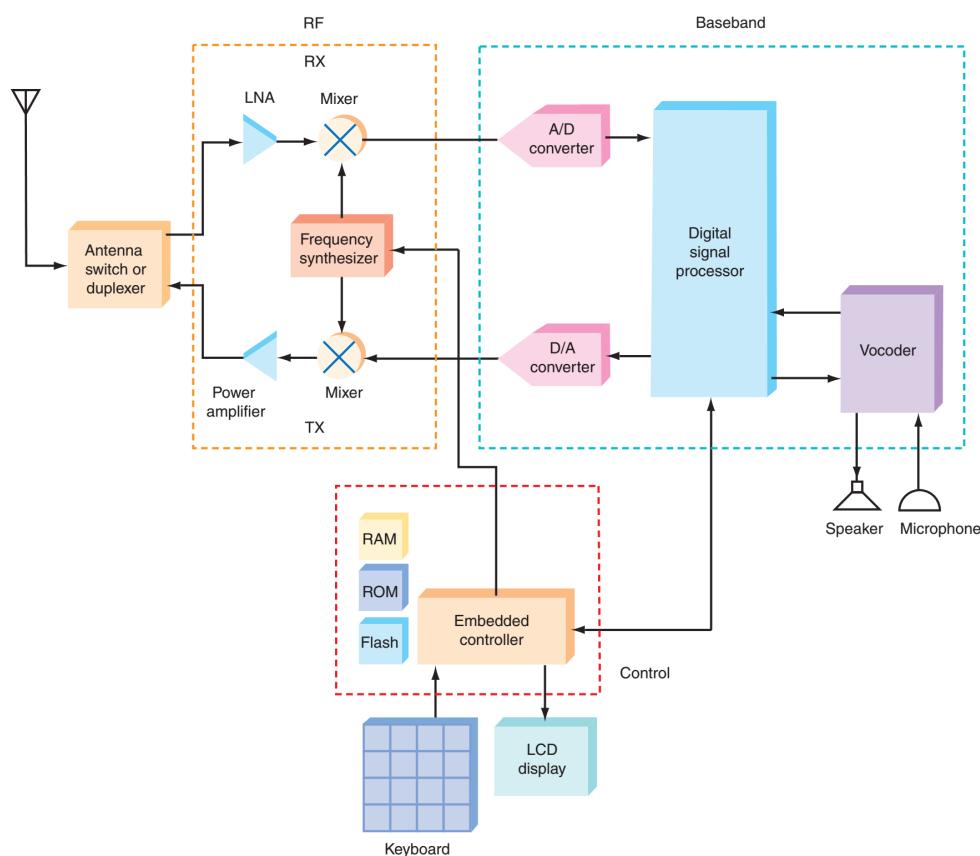
بالاتر را در یک کانال باریکتر فراهم می‌کند. یک پاسخ گاووسی جریان بیت دیجیتال سریال را قبل از مدولاسیون شکل می‌دهد تا پهنهای باند سیگنال را محدود کند. نرخ پایه داده GSM ۲۷۰ کیلوبیت بر ثانیه در کانال ۲۰۰ کیلوهرتز است که ۲۷۰ کیلوبیت بر ثانیه / ۲۰۰ کیلوهرتز ۵۱/۳۵ بیت در هرتز را می‌دهد. تشخیص خطأ و کدگذاری تصحیح قابل توجهی برای بهبود قابلیت اطمینان در حضور نویز، محو شدگی چند مسیره، تداخل و جابجایی داپلر استفاده می‌شود. قاب اصلی TDMA GSM در شکل (۱۱.۲۰) نشان داده شده است. طول هر فریم ۴/۶۱۵ میلی ثانیه و هر شکاف صوتی ۰/۵۷۷ میلی ثانیه است. GSM همچنین از یک طرح فرکانس پرش برای به حداقل رساندن تداخل بین کانالی استفاده می‌کند. نرخ پرش ۲۱۷ پرش در ثانیه یا حدود ۱۲۰۰ بیت در هر جهش است. FDD برای عملیات دوبلکس کامل استفاده می‌شود.

دو مورد کلیدی اضافه شده به GSM عبارتند از سرویس بسته رادیویی عمومی (GPRS) و افزایش نرخ داده برای تکامل EDGE (GSM). اینها خدمات داده مبتنی بر بسته هستند که برای اجزاء دسترسی به اینترنت، ایمیل و سایر اشکال انتقال داده دیجیتال طراحی شده‌اند. این فناوری‌ها بعداً در بخش سیستم‌های تلفن همراه 2.5G توضیح داده می‌شوند.

IS-95 CDMA : این استاندارد تلفن همراه TIA، دسترسی چندگانه تقسیم کد (CDMA) نامیده می‌شود. همچنین به عنوان cdmaOne شناخته می‌شود، از طیف گسترده استفاده می‌کند. این سیستم توسط Qualcomm اختراع شد، شرکتی که تراشه‌های مورد استفاده در تلفن‌های همراه CDMA را تولید می‌کند. این شرکت همچنین دارای اکثر پتنت‌ها در این زمینه است. CDMA از طیف گسترده توالی مستقیم (DSSS) با نرخ تراشه ۱/۲۲۸۸ مگاهرتز استفاده می‌کند که سیگنال را در یک کانال ۱/۲۵ مگاهرتز پخش می‌کند. حدود ۶۴ کاربر می‌توانند به طور همزمان از این باند بدون تداخل یا کاهش خدمات استفاده کنند، اگرچه در عمل معمولاً تنها ۱۰ تا ۴۰ مشترک یک کانال را در یک زمان اشغال می‌کنند. این سیستم CDMA از FDD برای دوبلکس کردن استفاده می‌کند.

همانند سایر سیستم‌های تلفن همراه، CDMA سیگنال صوتی را می‌گیرد و آن را در یک وکودر دیجیتالی می‌کند. خروجی یک سیگنال صوتی سریال ۱۳ کیلوبیت بر ثانیه است که قبل از استفاده برای مدوله کردن سیگنال حامل پردازش می‌شود. صدای دیجیتالی شده به یک گیت انحصاری OR (XOR) وارد و در آن با یک کد شبه تصادفی ۶۴ بیتی با نرخ تراشه ۱/۲۲۸۸ مگابیت بر ثانیه مخلوط می‌شود. سپس این سیگنال برای مدوله کردن حامل با QPSK استفاده می‌شود. حامل ممکن است در باند معمولی ۹۰۰ تا ۸۰۰ مگاهرتز یا در باند PCS-1900 باشد. سیگنال حاصل پهنهای باند عظیمی را اشغال می‌کند که در طیف وسیعی پخش شده است. همچنین ممکن است با حداقل ۶۴ سیگنال CDMA دیگر که از حامل یکسانی استفاده می‌کنند اما کدهای شبه تصادفی متفاوتی دارند، همزیستی داشته باشد. این کدهای ویژه به عنوان کدهای والش^{۱۸} شناخته و به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که با استفاده از تکنیک همبستگی که قبلاً توضیح داده شد، به راحتی در گیرنده شناسایی و بازیابی شوند. بخش کلیدی یک سیستم APC CDMA است. همه تلفن‌های همراه دارای APC هستند، اما برای CDMA از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای اینکه گیرنده‌ها سیگنال CDMA را بازیابی کنند، تمام سطوح سیگنال ورودی باید در یک سطح قدرت باشند. این تضمین می‌کند که گیرنده سیگنال با قدرت بالاتر را با سیگنال کم توان در طول فرآیند آشکارسازی عدم همبستگی اشتباہ نگیرد. ایستگاه‌های پایه سطح توان سیگنال‌های دور ضعیف را افزایش و سطح توان سیگنال‌های نزدیک به محل سلول را کاهش می‌دهند.

^{۱۸}Walsh codes



شکل ۱۲.۲۰: بلوک دیاگرام برای تلفن همراه دیجیتالی 2G

معماری تلفن همراه دیجیتال

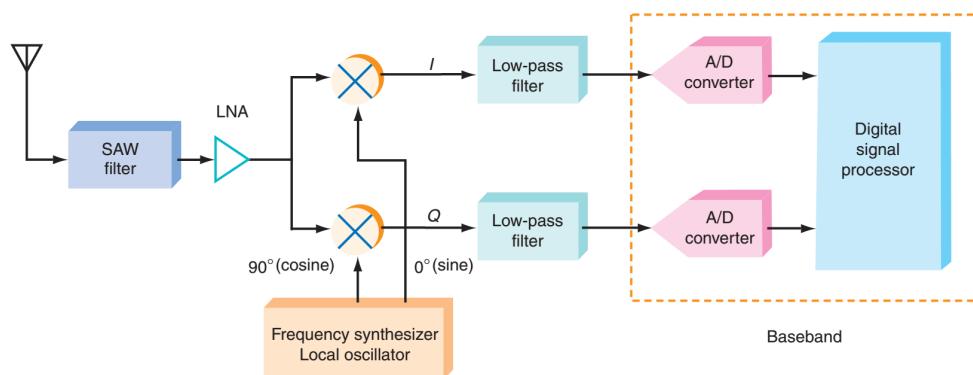
شکل (۱۲.۲۰) بلوک دیاگرام یک تلفن همراه 2G است. بخش RF شامل مدارهای فرستنده و گیرنده از جمله مخلوط کننده‌ها، نوسان‌سازهای محلی یا سینتی‌سایزرها و فرکانس برای انتخاب کانال، تقویت کننده کم نویز گیرنده (LNA) و تقویت کننده قدرت فرستنده (PA) است. بخش باند پایه شامل وکودر با مبدل‌های A/D و D/A به همراه یک تراشه DSP است که بسیاری از عملکردهای پردازشی را که معمولاً توسط مدارهای آنالوگ در سیستم‌های قدیمی انجام می‌شود، انجام می‌دهد. به عنوان مثال، امروزه بیشتر فیلترهای باند پایه و فرکانس متوسط مانند مدولاسیون، دمودولاسیون و مخلوط کننده‌گی به صورت دیجیتالی انجام می‌شود.

خوب است بدانید که:

تلفن‌های همراه مجهز به تراشه پردازشگر سیگنال دیجیتال (DSP) می‌توانند گفتار را فشرده کنند تا بسیاری از تماس‌های دیجیتال را در همان مقدار طیف رادیویی که قبلاً برای تماس‌های آنالوگ مورد نیاز بود، قرار دهند.

یک کنترلر تعییه شده تمام کنترل دیجیتال و سیگنالینگ، انتقال، و عملیات اتصال و شناسایی را که برای مشترک شفاف انجام می‌شود، انجام می‌دهد. همچنین از اجرای نمایشگر و صفحه کلید و تمام عملکردهای کاربر مانند ذخیره شماره، شماره گیری خودکار و شناسه تماس گیرنده مراقبت می‌کند. بهدلیل پیچیدگی باند پایه و عملکردهای کنترلی، این کنترلر تعییه شده معمولاً یک ریزپردازنده ۳۲ بیتی بسیار سریع (بیش از 10^6 مگاهرتز) با ROM و حافظه فلش قابل توجهی است. یک تراشه DSP جداگانه وظایف پردازش سیگنال را انجام می‌دهد.

علاوه بر استفاده از تکنیک‌های دیجیتال در تلفن‌های 2G و جدیدتر، طراحان سخت کار کرده‌اند تا اجزای پرهزینه‌ای مانند فیلترها را حذف کنند و مدارهایی ایجاد کنند که باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و در نتیجه عمر باتری طولانی‌تر شود. این امر به معنای اینکه جالبی به خصوص در بخش گیرنده منجر شده است. امروزه، معماری‌های غالب، طرح‌های با تبدیل مستقیم و IF بسیار کم هستند.



شکل ۱۳.۲۰: گیرنده تبدیل مستقیم.

تبدیل مستقیم: طراحی تبدیل مستقیم یا صفر-IF فرکانس LO را روی فرکانس سیگنال ورودی تنظیم می‌کند به‌طوری که انتقال مستقیماً به سیگنال باند پایه انجام می‌شود، شکل (۱۳.۲۰). از آنجایی که تبدیل مستقیم فقط با سیگنال‌های AM حذف شده با باند دو طرفه (DSP) کار می‌کند، تغییراتی برای تطبیق QPSK، FSK و سایر اشکال مدولاسیون دیجیتال ایجاد شده است. به‌طور خاص، سیگنال ورودی به طور همزمان به دو میکسر اعمال می‌شود. یک میکسر سیگنال LO را مستقیماً (سینوس) و دیگری سیگنال ۹۰ درجه (کسینوس) را دریافت می‌کند. این منجر به تبدیل پایین باند پایه و همچنین تولید سیگنال‌های هم فاز (I) و تریبعی (Q) می‌شود که اطلاعات فرکانس و فاز را در سیگنال لازم برای دمودولاسیون حفظ می‌کند.

تبدیل مستقیم محبوب است زیرا نیاز به فیلتر IF SAW انتخابی گران قیمت و بزرگ از نظر فیزیکی را برطرف می‌کند. همچنین مشکل فرکانس تصویری را که در طرح‌های سوبرهتروداین رایج است، بهویژه در طیف سلولی چند باند شلوغ، از بین می‌برد. با تبدیل مستقیم، فیلتر باند پایه را می‌توان با استفاده از فیلترهای RC پائین گذر ساده و/یا فیلترهای DSP انجام داد. سیگنال‌های I و Q دیجیتالی می‌شوند و یک تراشه DSP فیلتر، دمودولاسیون و رمزگشایی صوتی اضافی را انجام می‌دهد. طرح‌های آی سی مدرن اساساً مشکلات نشتی LO و dc offset را که معمولاً با طرح‌های تبدیل مستقیم مرتبط هستند، حذف کرده‌اند.

IF کم: جایگزین محبوب دیگر معماری low-IF است. هنگامی که یک IF در نزدیکی فرکانس‌های باند پایه استفاده می‌شود، فیلتر کردن ساده و بسیار مؤثر است. استفاده از IF نزدیک به ۱۰۰ کیلوهرتز امکان استفاده از فیلترهای RC ساده را فراهم و فیلترهای SAW بزرگتر و گرانتر را حذف می‌کند. طراحی IF کم دیگر به طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

سیستم‌های تلفن همراه ۲.۵ G

نام ۲.۵G بهنسلی از تلفن‌های همراه بین نسل دوم تلفن‌های دیجیتال اصلی (2G) و تلفن‌های نسل سوم (3G) جدیدتر اشاره دارد. تلفن‌های ۲.۵G علاوه بر خدمات صوتی معمولی، قابلیت انتقال داده را به تلفن‌های 2G نیز می‌آورند. تلفن ۲.۵G به مشترکین اجازه می‌دهد ایمیل و پیام‌های متنی مبادله کنند و از طریق تلفن همراه به اینترنت دسترسی داشته باشند. به دلیل اندازه صفحه نمایش کوچک و صفحه کلید کوچک یا بسیار محدود، قابلیت انتقال داده محدود است اما در دسترس کسانی است که به آن نیاز دارند.

در حال حاضر سه فناوری در سیستم‌های ۲.۵G استفاده می‌شود: CDMA2000 و EDGE، GPRS و IS-95A/B. اگرچه سیستم‌های GPRS و EDGE پیاده‌سازی شده‌اند، اما عموماً به عنوان راه حل‌های موقتی برای نیاز به قابلیت انتقال داده در تلفن‌های همراه در نظر گرفته می‌شوند. قابلیت داده‌های بسته با سرعت بالا با تلفن‌های 3G در دسترس است. فناوری CDMA2000 توسعه و بهبود استاندارد است.

GPRS: یکی از فناوری‌های محبوب ۲.۵G، سرویس رادیویی بسته‌های عمومی (GPRS) است. این سیستم برای کار با گوشی‌های GSM طراحی شده است. از یک یا چند مورد از هشت اسلات زمان TDMA در یک سیستم تلفن GSM برای انتقال داده‌ها به جای صدای دیجیتالی استفاده می‌کند. بسته به اینکه چه تعداد از هشت اسلات زمانی استفاده می‌شود، سرعت داده می‌تواند از حدود ۲۰ کیلوبیت بر ثانیه تا حداقل ۱۶۰ کیلوبیت در ثانیه متفاوت باشد. نرخ معمولی حدود ۴۰ کیلوبیت در ثانیه است که برای سرویس پست الکترونیکی و پیام کوتاه^{۱۹} (SMS) بیش از اندازه کافی است اما برای دسترسی به اینترنت ضعیف است.

هر فریم GSM دارای هشت شکاف زمانی برای داده است، شکل (۱۱.۲۰). نرخ کلی بیت ۲۷۰ کیلوبیت بر ثانیه است. در عملیات صوتی، هر شکاف حاوی سیگنال صوتی فشرده یا کدگذاری شده است. در GPRS انواع دیگری از داده‌ها قابل انتقال هستند. نرخ داده‌ای که می‌توان به دست آوردن تابعی از نوع کدگذاری مورد استفاده (FEC) و تعداد شکاف‌های زمانی است که به داده‌ها اختصاص داده شده است. استاندارد GPRS که توسط موسسه استانداردهای ارتباطات از راه دور اروپا (ETSI) ایجاد شده است، اکنون توسط پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP) نگهداری می‌شود. چهار سطح از کدگذاری داده را تعریف می‌کند که به CS-1 تا CS-4 اشاره می‌شود. قوی‌ترین طرح کدگذاری CS-1 خطاهای کمتری ایجاد می‌کند، اما حداقل سرعت داده در هر شکاف ۸ کیلوبیت در ثانیه است. قوی‌ترین روش کدگذاری CS-4 است، اما سرعت داده تا ۲۰ کیلوبیت بر ثانیه را تولید می‌کند. برای دستیابی به حداقل سرعت داده، می‌توانید از هر هشت اسلات برای سرعت $8 \times 20 \text{ kbps} = 160 \text{ kbps}$ استفاده کنید. با این حال، این هرگز انجام نمی‌شود. در عوض، GPRS دارای ۱۲ کلاس است که سطوح مختلف سرعت داده را ارائه می‌دهد. انتخاب کلاس مورد نظر توسط سیگنال حامل تلفن همراه انجام می‌شود که تعیین می‌کند چقدر از ظرفیت شبکه به صدا و داده اختصاص داده می‌شود. کلاس ۱۲ نرخ داده‌های ارتباط به بالا و ارتباط به پائین حداقل ۸۰ kbps را ارائه می‌دهد. اپراتور

^{۱۹}Short Message Service (SMS)

معمولًاً کلاس را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که با ترکیب خود از کاربران صدا و داده مطابقت داشته باشد و اغلب کاربر داده را بر اساس هر کیلوبیت بر ثانیه شارژ می‌کند. همچنین به خاطر داشته باشید که روش GPRS شامل یک الگوریتم تنظیم خودکار نرخ است که کلاس و نرخ داده را با استحکام کanal بی‌سیم تنظیم می‌کند. در مسافت‌های کوتاه‌تر با نویز و تداخل کمتر، سیستم می‌تواند به حداقل سرعت داده دست یابد. در مسافت‌های طولانی‌تر با نویز اضافه، سیستم خود را با نرخ داده کمتر تنظیم می‌کند تا از انتقال دقیق داده‌ها اطمینان حاصل کند.

تقریباً تمام تلفن‌های مدرن GSM با GPRS عرضه می‌شوند، اما کاربر باید برای خدمات (پیام‌رسانی فوری، ایمیل و غیره) مرتبط با این قابلیت ثبت‌نام کند.

EDGE : فناوری 2.5G سریعتر، نرخ داده را برای تکامل GSM (EDGE) افزایش داده است. این مبتنی بر سیستم GPRS است اما از مدولاسیون 8-PSK به جای GMSK برای دستیابی به نرخ داده‌های بالاتر تا ۳۸۴ کیلوبیت بر ثانیه استفاده می‌کند.

EDGE گاهی اوقات به عنوان GPRS بهبود یافته (EGPRS) نامیده می‌شود. معمولًاً به عنوان ارتقاء نرم‌افزاری بهایستگاه‌های پایه اجرا می‌شود، اما به تقویت کننده توان خطی نیز نیاز دارد. تغییرات سخت افزاری و نرم افزاری در یک گوشی GPRS مورد نیاز است. EDGE از مفهوم کلاس GPRS استفاده می‌کند که به موجب آن نرخ داده تابعی از رمزگذاری و تعداد شکاف‌های زمانی استفاده شده است. با استفاده از مدولاسیون 8PSK- $\frac{3}{4}$ ، ۳ بیت در هر تغییر نماد کدگذاری می‌شود و در نتیجه نرخ ناخالص داده را سه برابر می‌کند. حداقل نرخ تئوری داده $\frac{473}{6}$ کیلوبیت در ثانیه با هر هشت اسلات استفاده شده است. یک پیاده‌سازی معمولی‌تر، استفاده از چهار اسلات برای سرعت داده $\frac{236}{8}$ کیلوبیت بر ثانیه است. مجدداً، یک الگوریتم نرخ داده به طور خودکار از نرخ عقب نشینی می‌کند زیرا شرایط کanal به دلیل نویز یا افزایش فاصله کاهش می‌یابد. نرخ‌های معمول روزانه معمولًاً بیش از ۱۰۰ کیلوبیت در ثانیه اما کمتر از ۲۰۰ کیلوبیت در ثانیه است.

یکی از تغییرات کلیدی مورد نیاز هنگام پیاده‌سازی EDGE، نیاز به تقویت کننده‌های توان خطی هم در ایستگاه پایه و هم در گوشی است. GMSK همانطور که در GSM و GPRS استفاده می‌شود یک نوع FM با یک سیگنال حامل ثابت (دامنه) است که فرکانس آن با مدولاسیون تغییر می‌کند. FM اجازه می‌دهد تا از تقویت کننده‌های کلاس C، D، E و F کارآمدتر استفاده شود. این تقویت کننده‌ها دامنه سیگنال را قطع یا تغییر می‌دهند اما با FM که با مدولاسیون تداخلی ندارد. هنگامی که ۸PSK- $\frac{3}{4}$ استفاده می‌شود، با تغییر سیگنال از یک فاز به فاز دیگر، پاکت تغییر می‌کند. بنابراین، برای حفظ محتوای اطلاعات، دامنه سیگنال باید از طریق تقویت حفظ شود. باید از تقویت کننده توان خطی کلاس AB استفاده شود. برخی از ایستگاه‌های پایه قبل از چنین تقویت کننده‌هایی استفاده می‌کنند و بنابراین ممکن است آنها را به جای حداقل بهره‌وری، به سادگی بر روی حداقل عملکرد خطی تنظیم کنند.

در گوشی‌ها، تقویت کننده‌های توان کارآمد کلاس C یا E/F در فرستنده باید با تقویت کننده خطی کلاس AB جایگزین شوند. این یک تغییر قابل توجه در یک گوشی است زیرا راندمان کمتر باعث تولید گرمای بیشتر و کاهش عمر باتری می‌شود.

سیستم‌های تلفن همراه ۳G

تلفن‌های همراه نسل سوم (3G) تلفن‌های بسته داده واقعی هستند. آنها دارای صدای دیجیتالی پیشرفته و قابلیت انتقال داده با سرعت بالا هستند. تلفن‌های نسل سوم در ابتدا با عبارت Inter-IMT-2000 national Mobile Telecommunication 2000 ۲۰۰۰ به ۲۰۰۰ تووصیف می‌شدند.

مگاهترز اشاره دارد، مرکز تقریبی محدوده فرکانس تعریف شده برای 3G (۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ مگاهرتز). هدف اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU) تعریف استانداردی در سراسر جهان برای تلفن‌های همراه آینده بود که تمامی سیستم‌های دیگر بتوانند بر اساس آن تکامل یابند و در نتیجه رومینگ کامل جهانی را فراهم کنند. یک تلفن IMT-2000 می‌تواند به سرعت داده تا ۲۰۴۸ کیلوبیت در ثانیه در موقعیت ثابت، ۳۸۴ کیلوبیت بر ثانیه در محیط عابر پیاده با حرکت آهسته و ۱۴۴ کیلوبیت در ثانیه در محیط موبایل سریع دست یابد. با چنین قابلیتی با سرعت بالا، یک تلفن 3G می‌تواند کارهای بیشتری از انتقال صدای دیجیتال با کیفیت بالا انجام دهد.

برخی از برنامه‌های بالقوه 3G شامل ایمیل سریع و دسترسی به اینترنت است. با صفحه‌نمایش‌های رنگی بزرگ‌تر و صفحه‌کلیدهای کامل، تلفن‌های همراه می‌توانند بیشتر به عنوان پایانه‌های کامپیوتربی کوچک عمل کنند. سرعت بالا همچنین امکان انتقال ویدئو را فراهم می‌کند. مشترکین می‌توانند یک فیلم را در تلفن‌های 3G خود تماشا کنند، اگرچه صفحه نمایش کوچک تماشا را محدود می‌کند. در اکثر مدل‌ها، یک حسگر تصویر و لنز داخلی به تلفن‌های همراه اجازه می‌دهد به تلفن‌های تصویری و دوربین‌های دیجیتال تبدیل شوند.

UMTS ۳G

ITU فناوری خاصی را برای پیاده سازی 3G مشخص نکرده است. با این حال، یک نسخه جهانی به نام CDMA باند پهن (WCDMA) را توصیه کرد. این سیستم با نام سرویس جهانی مخابرات سیار^{۲۰} (UMTS) نیز شناخته می‌شود. در حالی که استاندارد هنوز در ITU مستقر است، توسط پژوهش مشارکت نسل سوم (3GPP) توسعه، نگهداری و ترویج می‌شود.

WCDMA : WCDMA یک فناوری طیف گسترده توالی مستقیم است. در محبوب‌ترین شکل‌بندی، برای استفاده از نرخ تراشه ۳/۸۴ مگاهرتز در باندهای گسترده ۵ مگاهرتز طراحی شده است. ارتباط دوطرفه است که نیاز به تطبیق کanal‌های ۵ مگاهرتز دارد. مدولاسیون QPSK است. می‌تواند به سرعت داده بسته تا ۲ مگابیت بر ثانیه دست یابد.

یک مشکل کلیدی در پیاده سازی 3G نیاز به بخش عظیمی از طیف است. طیف جدید کمیاب و گران است. در اروپا، باندهای تزویجی در محدوده ۱۹۰۰ تا ۲۲۰۰ مگاهرتز در دسترس هستند. در ایالات متحده، محدوده ۸۰۶ تا ۸۹۰ مگاهرتز را می‌توان برای 3G در برخی مناطق استفاده کرد. مقداری طیف در محدوده ۱۷۱۰ تا ۱۸۸۵ مگاهرتز نیز برای برخی از حامل‌ها در دسترس است. همچنین برخی از بخش‌های باند ۲۵۰۰ تا ۲۶۹۰ مگاهرتز در دسترس هستند. طیف دقیق 3G بسته به اینکه در کدام قسمت از جهان هستید، بسیار متفاوت است، و طراحی تلفن همراهی که به طور کامل در سراسر جهان قابل اجرا باشد را بسیار دشوار می‌کند.

TD – SCDMA : استاندارد 3G همچنین یک نسخه TDD معروف به TD-SCDMA را برای دسترسی چندگانه تقسیم همزمان کد تقسیم زمانی تعریف می‌کند. این برای استفاده از یک کanal ۱/۶ مگاهرتز با نرخ تراشه ۱/۲۸ مگاهرتز طراحی شده است. شکاف‌های زمانی مختلف در جریان داده‌های مولتی‌پلکس زمانی به فعالیت لینک بالا و پایین اختصاص داده شود. ممکن است تعداد کanal‌های لینک بالا و لینک پائین به صورت پویا تخصیص داده شود تا یک سیگنال حامل بتواند سیستم را با بار ترافیکی در هر زمان معین تنظیم کند. مزایای اولیه TD-SCDMA این است که طیف کمتری مورد نیاز است. فقط یک کanal ۱/۶ مگاهرتز مورد نیاز است. علاوه بر این، از آنجایی که دوبلکس TDD است، مانند WCDMA یا GSM یا هر سیستم FDD دیگری نیازی به طیف زوجی

^{۲۰} Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS)

نیست. نقطه ضعف این است که سیستم به دلیل نیاز شدید به زمان بندی دقیق و همگام سازی مورد نیاز برای عملکرد صحیح، پیچیده‌تر است. تا کنون، تنها کشوری که TD-SCDMA را به عنوان استاندارد پذیرفته است، چین است.

HSPA : دسترسی به بسته‌های پرسرعت^{۲۱} (HSPA) پیشرفته در سیستم‌های WCDMA برای سریع‌تر کردن آنهاست. یک نسخه دسترسی به بسته ارتباط به پائین با سرعت بالا (HSDPA)^{۲۲} و یک نسخه دسترسی به لینک بالا^{۲۳} (HSUPA) با سرعت بالا وجود دارد. آنها را می‌توان به طور جداگانه یا با هم استفاده کرد. آنها با هم به عنوان HSPA شناخته می‌شوند. زمانی که استاندارد WCDMA 3G برای اولین بار به تصویب رسید، فرض بر این بود که این استاندارد بسیار سریع‌تر از آنچه که وجود داشت استفاده می‌شود. در طول سال‌های گذشته، فناوری بی‌سیم تغییر کرده است و باعث شده است که مشخصات اصلی تا حدودی عقب‌تر باشد. حداکثر سرعت داده ۲ مگابیت بر ثانیه برای هر سرویسی به اندازه کافی سریع فرض شده است. اما امروزه تقاضا برای سرعت داده‌های سریع‌تر، به‌ویژه به‌دلیل تقاضای رو به رشد برای سرویس ویدئوی موبایل، در حال رشد است. به‌دلیل نیاز به سیستم‌های سریع‌تر، یک سیستم جدید سازگار با WCDMA توسعه یافته است که به عنوان دسترسی به بسته‌های پرسرعت (HSPA) شناخته می‌شود، نرخ داده بسته را از ایستگاه پایه به گوشی چندین برابر حداکثر نرخ ۲ مگابیت بر ثانیه WCDMA ارائه می‌دهد.

HSDPA از یک طرح کدگذاری و مدولاسیون تطبیقی با QPSK و 16-QAM استفاده می‌کند. داده‌ها در فریم‌های ۲ میلی ثانیه‌ای منتقل می‌شوند. ۱۲ دسته از HSDPA وجود دارد که طرح‌های کدگذاری و مدولاسیون متفاوتی را ارائه می‌کنند. حداقل رده ۵۰ کیلوبیت بر ثانیه با استفاده از QPSK است. رده ۶ با استفاده از 16-QAM سرعت $\frac{3}{4}$ مگابیت در ثانیه را می‌دهد. حداکثر سرعت داده ۴ مگابیت بر ثانیه با استفاده از 16-QAM در دسته ۱۰ است. نرخ واقعی به‌دست آمده تابعی از کیفیت پیوند است. نویز بالا و برد طولانی نرخ پایین‌تری می‌دهد. نرخ به‌طور خودکار با شرایط کانال سازگار می‌شود.

در حالی که اکثر نیازهای داده توسط یک قابلیت ارتباط پائین با سرعت بالا تأمین می‌شود، در برخی از کاربردها ممکن است به یک ارتباط بالا سریع نیاز باشد. این توسط یک استاندارد همراه شناخته شده به عنوان دسترسی به بسته آپلینک با سرعت بالا^{۲۴} (HSUPA) تطبیق داده می‌شود. پیاده‌سازی نرخ سریع گوشی به‌ایستگاه پایه دشوارتر است، بنابراین نرخ‌های آپلینک به‌طور طبیعی کنترل هستند. HSUPA حداکثر سرعت داده $\frac{5}{76}$ مگابیت بر ثانیه را ارائه می‌دهد. مجدداً، نرخ با شرایط کانال سازگار می‌شود.

یک نسخه پیشرفته به نام HSPA+ هم اکنون از برخی اپراتورها در دسترس است. این امکان استفاده از 64QAM را فراهم می‌کند و به بسیاری از سیستم‌ها اجازه می‌دهد تا نرخ‌های ۲۸، ۲۱، ۲۱ یا ۴۲ مگابیت بر ثانیه را ارائه دهند. اگرچه معمول نیست، نسخه‌های پیشرفته‌تری وجود دارند که از حامل‌های متعدد و MIMO برای ارائه سرعت‌های بالاتر استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، دو یا چهار کانال ۵ مگاهرتز را می‌توان برای دو یا چهار برابر کردن سرعت داده به ۸۴ یا ۱۶۸ مگابیت بر ثانیه ترکیب کرد. افزودن 2×2 یا 4×4 MIMO می‌تواند حداکثر نرخ را در ۳۳۶ تا ۶۷۲ مگابیت بر ثانیه

^{۲۱} High Speed Packet Access (HSPA)

^{۲۲} High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)

^{۲۳} High Speed Uplink Access (HSUPA)

^{۲۴} High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)

ارائه دهد. امروزه اکثر سیستم‌های HSPA هنوز فعال هستند، اما در حال استفاده با سیستم‌های سریع‌تر 4G جایگزین شده‌اند.

CDMA ۲۰۰۰

این استاندارد توسط کوالکام توسعه یافته است. این یک توسعه استاندارد IS-95 است که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد که با نام cdmaOne نیز شناخته می‌شود. اولین نسخه‌های این سیستم رادیویی به درستی به عنوان فناوری 2.5G تعیین شده بودند، اما نسخه‌های بهبود یافته بعدی به دلیل سرعت بالای داده‌ای که می‌تواند به دست آورد، به‌وضوح آن را به فناوری 3G تبدیل کرد. است.

روش اصلی انتقال داده CDMA2000 به‌طور کلی 13RTT (فناوری انتقال رادیویی) نامیده می‌شود. از همان کانال‌های ۱/۲۵ مگاهرتز استفاده می‌کند اما قالب‌های مدولاسیون و کدگذاری را نیز تغییر می‌دهد تا در واقع ظرفیت صدا را نسبت به IS-95 دو برابر کند. قابلیت داده مبتنی بر بسته است و سرعت داده تا ۱۴۴ کیلوبیت بر ثانیه را می‌دهد که قابل مقایسه با EDGE است. نسخه‌ای با نام 33RTT از سه کانال ۱/۲۵ مگاهرتز برای کل پهنه‌ای باند ۳/۷۵ مگاهرتز استفاده می‌کند. با استفاده از نرخ تراشه بالاتر، حداقل نرخ تاریخ تقریباً سه برابر سرعت 13RTT ۱۳۲ کیلوبیت بر ثانیه امکان پذیر است.

نسخه جدیدتر Evolution-Data Optimized 13EV-DO یا ۱/۳ مگابیت در ثانیه و سرعت بالا به ۱/۸ مگابیت در ثانیه نزدیک می‌شود. دارد که به ۳/۱ مگابیت در ثانیه و سرعت بالا به ۱/۸ مگابیت در ثانیه نزدیک می‌شود. نسخه دیگری که به نام 13EV-DV برای Evolution-Data/Voice شناخته می‌شود، حداقل نرخ بسته ۳/۰۷ مگابیت بر ثانیه دارد. سرعت ارتباط به بالا برابر با 13EV-DO است. بسیاری از اپراتورها هنوز CDMA2000 را پیاده‌سازی می‌کنند، اما تلفن‌های قدیمی‌تر از آن برای داده‌های صوتی و با سرعت کم مانند پیامک و ایمیل استفاده می‌کنند. سیستم‌های جدیدتر 4G جایگزین آن شده است.

۴.۲۰ تکامل بلند مدت و سیستم‌های سلولی ۴G

تکامل بلند مدت (LTE)^{۲۵} یک فناوری تلفن همراه بی‌سیم است که در سراسر جهان به عنوان سرویس اولیه ارتباطات تلفن همراه در حال استفاده است. چندین روش رادیویی سلولی 2G و 3G با ایجاد شبکه‌های LTE جدید خود به تدریج در حال حذف شدن هستند. سال‌ها طول می‌کشد تا این گسترش کامل شود و فناوری‌های رادیویی قدیمی مانند GSM و CDMA برای مدتی با LTE همزیستی خواهند کرد. در همین حال، مرحله بعدی استانداردهای LTE که توسط پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP) ارائه شده و آماده استقرار است، LTE-Advanced نامیده می‌شود، ارتقای قابل توجهی به استاندارد LTE است که سرعت بیشتر و قابلیت اطمینان بیشتری را ارائه می‌دهد. حتی اگر LTE-A هنوز در حال توسعه است، در حال حاضر در برخی از مناطق در خدمت است. این بخش مروری بر اصول LTE، نگاهی به ویژگی‌ها و مزایای LTE-A، و نگاهی اجمالی به سیستم‌های 5G است.

LTE بسوی راهی

LTE استانداردی است که توسط پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP) توسعه یافته است. این سازمان بین‌المللی است که استانداردهای پرکاربرد WCDMA/HSPA/UMTS 3G را توسعه داده است.

^{۲۵} Long Term Evolution (LTE)

LTE سالهای است که در حال توسعه بوده و مراحل مختلف آن به صورت متوالی در طول سالها منتشر شده است. استاندارد LTE با نام 8 Release در سال ۲۰۱۰ تکمیل شد. نسخه ۹ به روز رسانی آن بود. نسخه ۱۰ LTE-Advanced را تعریف می‌کند و اکنون در دسترس است.

در طول سال‌ها، چندین فناوری تلفن همراه توسعه یافته است. نسل اول فناوری آنالوگ (FM) بود که دیگر در دسترس نیست. نسل دوم (2G) فناوری دیجیتال را با مزایای خود به صنعت آورد. چندین استاندارد 2G ناسازگار توسعه داده شد. تنها دو مورد، GSM و IS-95A CDMA، زنده مانده اند.

استانداردهای نسل سوم (3G) بعدی ایجاد شد. دوباره استانداردهای متعددی ایجاد شد. مهمترین آنها WCDMA توسط CDMA2000 و 3GPP Qualcomm بودند. هر دو باقی مانده‌اند و هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. استانداردهای 3G به طور مداوم به آنچه به عنوان 3.5G شناخته می‌شود به روز می‌شوند. WCDMA به HSPA ارتقاء یافت و CDMA2000 با انتشارات A و B 13RTT EV-DO گسترش یافت. در واقع، در بسیاری از نقاط جهان، اپراتورها هنوز در حال اضافه کردن 3G یا ارتقاء سیستم‌های 3G خود هستند. در ایالات متحده، AT&T و T-Mobile از CDMA2000/EV-DO Sprint و Verizon از GSM/WCDMA/HSPA استفاده می‌کنند، در حالی که اینها از DO استفاده می‌کنند. اسپرینت شبکه‌ای مبتنی بر وایمکس، فناوری مشابه LTE، پیاده‌سازی کرد، اما در حال حذف تدریجی آن است. همه این اپراتورها اکنون LTE را راهه می‌دهند.

LTE به عنوان ارتقاء استانداردهای 3G به وجود آمد. مزایای عمدۀ آن توسعه صنعت تلفن همراه به‌رسمیت شناخته شد و تقریباً توسعه تمام اپراتورهای تلفن همراه به نام نسل بعدی پذیرفته شد. همه اپراتورهای تلفن همراه اکنون در مسیر پیاده‌سازی LTE هستند. در حالی که هنوز 3GPP 4G را به نام فناوری 3.9G تعریف می‌کند، همه شبکه‌های LTE فعلی با 4G به بازار عرضه می‌شوند. 4G واقعی که توسط 3GPP تعیین شده است LTE-Advanced است.

در حال حاضر LTE در بسیاری از شرکت‌های تلفن همراه ایالات متحده و سایر شرکت‌ها در سراسر جهان فعال و فعال است. شبکه‌ها به طور کامل ساخته نشده‌اند و اکثر سیستم‌های قدیمی 2G و 3G هنوز به صورت موازی کار می‌کنند. از آنجایی که پوشش LTE جهانی نیست، اکثر تلفن‌های همراه هنوز از سیستم‌های 2G و 3G برای صدا در مناطقی استفاده می‌کنند که LTE هنوز به طور کامل مستقر نشده است. استقرار LTE-A یک عرضه در آینده است.

چرا LTE قابلیت‌های جدید شگفت‌انگیزی را برای تجارت سلوکی به ارمغان می‌آورد. اول، ظرفیت اپراتور را افزایش می‌دهد، به این معنی که می‌توان مشترکان بیشتری را برای یک انتساب طیف مشخص اضافه کرد. دوم، سرعت بالای داده‌ای را فراهم می‌کند که برای برنامه‌های کاربردی جدید در حال رشد، عمدتاً بارگیری ویدیو در تلفن‌های هوشمند و سایر دسترسی‌های اینترنتی، مورد نیاز است. و سوم، اتصال سلوکی را قابل اطمینان‌تر می‌کند. همه این نیازها برای حفظ رشد و موقیت در تجارت بی‌سیم مهم هستند.

LTE فناوری‌های

احتمالاً پیچیده‌ترین سیستم بی‌سیم است که تا به حال توسعه یافته است. این شامل ویژگی‌هایی است که حتی یک دهه پیش نمی‌توانستند از نظر اقتصادی پیاده‌سازی شوند. امروزه، با آی‌سی‌های بزرگ مقیاس، LTE را می‌توان به راحتی نه تنها در یک ایستگاه پایه بلکه در یک گوشی باتری دار جای داد. پیچیدگی تابعی از روش‌های پیشرفتی بی‌سیم مورد استفاده و همچنین گزینه‌ها و ویژگی‌های زیادی است که می‌توان پیاده‌سازی کرد. این بخش عمدتاً لایه فیزیکی LTE شامل مدولاسیون،

دسترسی، دوطرفه و استفاده از MIMO را بررسی می‌کند.

فرکانس : LTE در برخی از باندهای سلولی موجود و همچنین باندهای جدیدتر عمل می‌کند. باندهای خاصی برای LTE تعیین شده است. این موارد در جدول (۱.۲۰) نشان داده شده است. حامل‌های مختلف بسته به کشور عملیات و ماهیت دارایی طیف آنها از باندهای متفاوتی استفاده می‌کنند. اکثر تلفن‌های LTE از دو باند از این باند استفاده می‌کنند و از اپراتور به اپراتور یکسان نیستند. به عنوان مثال، ۵ iPhone برای Verizon از باندهای متفاوتی نسبت به ۵ iPhone از T&AT استفاده می‌کند. بیشتر باندها برای تقسیم فرکانس دوبلکس (FDD) تنظیم شده‌اند که از دو باند مجزا برای اتصال بالا و پایین استفاده می‌کند. در جدول (۱.۲۰) توجه داشته باشید که از باندهای ۳۳ تا ۴۴ برای دوبلکس کردن تقسیم زمانی (TDD) استفاده می‌شود و بنابراین فرکانس‌های یکسانی برای پیوند بالا و پایین استفاده می‌شود.

پهنهای باند : LTE یک فناوری بی‌سیم پهن‌باند است که از کanal‌های گسترده برای دستیابی به نرخ داده‌های بالا و پذیرش تعداد زیادی از کاربران استفاده می‌کند. این استاندارد به گونه‌ای تنظیم شده است که پهنهای باند $1/4, 3, 5, 10, 15$ و 20 مگاهرتز را مجاز کند. اپراتور پهنهای باند را بسته به میزان نگهداری طیف و همچنین نوع خدماتی که قرار است ارائه شود انتخاب می‌کند. عرض‌های 5 و 10 مگاهرتز رایج‌ترین هستند. برخی از پهنهای باند را نمی‌توان در باندهای مختلف استفاده کرد.

مودولاسیون : از طرح مدولاسیون متعامد تقسیم فرکانس متعامد (OFDM) استفاده می‌کند. بازده طیفی ضروری را برای دستیابی به نرخ داده‌های بالا فراهم می‌کند، اما همچنین به کاربران متعدد اجازه می‌دهد تا یک کانال مشترک را به اشتراک بگذارند. تکنیک OFDM یک کانال معین را به بسیاری از زیر‌حامل‌های باریکتر تقسیم می‌کند. فاصله به گونه‌ای است که حامل‌های فرعی متعامد هستند - یعنی با وجود عدم وجود نوارهای محافظ بین آنها، آنها با یکدیگر تداخل نخواهند کرد. این با داشتن فاصله حامل فرعی برابر با متقابل زمان نماد به وجود می‌آید. همه زیر‌حامل‌ها دارای تعداد کاملی از سیکل‌های موج سینوسی هستند که با دمودولاسیون مجموع آنها صفر خواهد بود.

در LTE فاصله کانال 15 کیلوهرتز است. بنابراین دوره نماد $1/15$ کیلوهرتز $66/7$ میکرو ثانیه است. داده‌های سریالی پرسرعتی که قرار است منتقل شوند به چندین جریان کنترل تقسیم می‌شوند و هر کدام برای مدوله کردن یکی از حامل‌های فرعی استفاده می‌شود. به عنوان مثال، در یک کانال 5 مگاهرتز، تا 33 حامل فرعی می‌توان استفاده کرد اما تعداد واقعی کمتر از 30 است. یک کانال 20 مگاهرتز ممکن است از 1024 حامل فرعی استفاده کند. بسته به نیاز سرعت، مدولاسیون روی هر کدام می‌تواند QPSK، QPSK، ۱۶QAM یا ۶۴QAM باشد.

شکل (۱۴.۲۰) نشان می‌دهد که چگونه OFDM از فرکانس و زمان برای پخش داده‌ها استفاده می‌کند و نه تنها سرعت بالایی بلکه قابلیت اطمینان سیگنال بیشتری را نیز فراهم می‌کند. برای هر حامل فرعی، داده‌ها به صورت نمادهای متوالی ارسال می‌شوند که در آن هر نماد نشان دهنده چندین بیت است (به عنوان مثال QPSK، ۲ بیت؛ ۱۶QAM، ۴ بیت؛ و ۶۴QAM، ۶ بیت). نرخ پایه داده از طریق یک کانال فرعی 15 کیلوهرتز، 15 است. کیلوبایت بر ثانیه با مدولاسیون سطح بالاتر، نرخ داده بالاتر امکان پذیر است.

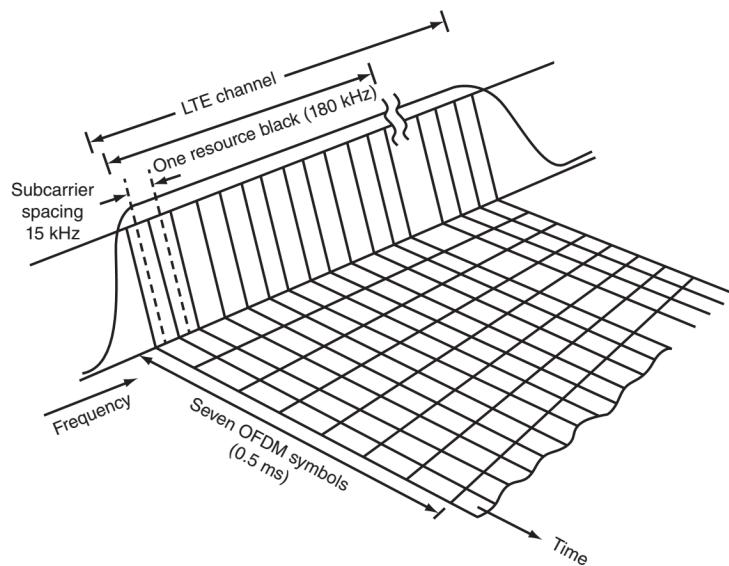
داده‌ایی که قرار است منتقل شوند به یک یا چند بلوک منبع تخصیص داده می‌شوند. بلوک منبع (RB) بخشی از طیف OFDM است که 12 حامل فرعی برای مجموع 180 کیلوهرتز عرض دارد. هفت بخش زمانی برای هر حامل فرعی برای مدت زمان $5/5$ میلی ثانیه وجود دارد. سپس داده‌ها در بسته‌ها یا فریم‌ها منتقل می‌شوند و یک فریم استاندارد حاوی بیست اسلات زمانی $5/5$ میلی ثانیه

Table 20-1**LTE Bands**

LTE Band Number	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
1	1920–1980	2110–2170
2	1850–1910	1930–1990
3	1710–1785	1805–1880
4	1710–1755	2110–2155
5	824–849	869–894
6	830–840	875–885
7	2500–2570	2620–2690
8	880–915	925–960
9	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9
10	1710–1770	2110–2170
11	1427.9–1452.9	1475.9–1500.9
12	698–716	728–746
13	777–787	746–756
14	788–798	758–768
15	1900–1920	2600–2620
16	2010–2025	2585–2600
17	704–716	734–746
18	815–830	860–875
19	830–845	875–890
20	832–862	791–821
21	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9
22	3410–3500	3510–3600
23	2000–2020	2180–2200
24	1625.9–1660.9	1525–1559

ادامه جدول ۱-۲۰

25	1850–1915	1930–1995
26	859–894	814–849
27	852–869	807–824
28	758–803	703–748
33	1900–1920	1900–1920
34	2010–2025	2010–2025
35	1850–1910	1850–1910
36	1930–1990	1930–1990
37	1910–1930	1910–1930
38	2570–2620	2570–2620
39	1880–1920	1880–1920
40	2300–2400	2300–2400
41	2496–2690	2496–2690
42	3400–3600	3400–3600
43	3600–3800	3600–3800
44	703–803	703–803



شکل ۱۴.۲۰: داده‌ها با تقسیم آن به مسیرهای موازی کنتر که چندین زیرحامد را در کانال اختصاص داده شده مدوله می‌کند، منتقل می‌شود. داده‌ها در بخش‌های یک نماد در هر بخش بر روی هر حامل فرعی منتقل می‌شود.

است. یک بلوک منبع حداقل بلوک اصلی یک انتقال است و اکثر انتقال‌ها به تعداد زیادی RB نیاز دارند.

این واقعیت را در نظر داشته باشید که تنها راه عملی برای پیاده‌سازی OFDM انجام آن در نرم افزار است. فرآیند اصلی با تبدیل فوریه سریع^{۲۶} (FFT) انجام می‌شود. فرستنده از FFT معکوس، در حالی که گیرنده از FFT استفاده می‌کند. الگوریتم‌ها در یک پردازنده سیگنال دیجیتالی^{۲۷} (DSP)، یک FPGA یا یک ASIC طراحی شده برای این فرآیند پیاده‌سازی می‌شوند. تکنیک‌های معمول در هم‌سازی^{۲۸} و اضافه کردن کدهای تصحیح خطای جلو نیز اجرا می‌شوند.

انتخاب OFDM برای LTE در درجه اول به دلیل حساسیت کمتر آن به اثرات چند مسیره است. در فرکانس‌های مایکروویو بالاتر، سیگنال‌های ارسالی می‌توانند چندین مسیر را به سمت گیرنده طی کنند. مسیر مستقیم بهترین و ارجح است، اما سیگنال‌ها ممکن است توسط چندین شی منعکس شوند و سیگنال‌های جدیدی ایجاد کنند که کمی دیرتر به گیرنده می‌رسند. بسته به تعداد سیگنال‌های مرتبط، قدرت، محدوده و سایر عوامل، سیگنال‌های گیرنده ممکن است به روشی مخرب اضافه شوند و باعث محو شدن یا افت سیگنال شوند.

اثرات چند مسیره زمانی اتفاق می‌افتد که سیگنال‌ها در تمام مدت زمان یک دوره نماد (علامت، سمبول) به گیرنده می‌رسند. به یاد داشته باشید، یک نماد یک حالت مدولاسیون است که یا یک دامنه، یک فاز یا ترکیب دامنه-فاز است که نشان دهنده دو یا چند بیت است. اگر اثرات چند مسیره به گونه

^{۲۶}Fast Fourier Transform (FFT)

^{۲۷}Digital Signal Processor (DSP)

^{۲۸}Scrambling

ای باشد که سیگنال‌ها در چندین دوره نماد به‌گیرنده می‌رسند، نتیجه تداخل بین نمادی (ISI)^{۲۹} نامیده می‌شود. نتیجه خطاهای بیتی است. با تشخیص خطا و تصحیح کدها می‌توان بر این مشکل غلبه کرد، اما این کدها به‌پیچیدگی سیستم می‌افزایند. یک اکولایزر در گیرنده که تمام سیگنال‌های دریافتی را جمع‌آوری می‌کند و آنها را به تأخیر می‌اندازد تا همه آنها اضافه کنند نیز می‌تواند این مشکل را اصلاح کند، اما فقط فرآیند را پیچیده‌تر می‌کند.

پخش و گسترش سیگنال‌ها به‌شکل حامل‌های فرعی متعدد در پهنهای باند وسیع این اثرات را کاهش می‌دهد. این امر به‌ویژه در صورتی صادق است که نرخ نماد هر حامل فرعی طولانی‌تر باشد، همانطور که در OFDM است. اگر اثرات چند مسیری در کمتر از یک دوره نماد رخ دهد، دیگر نیازی به اکولایزر نیست. اثر دیگر تغییر فرکانس حامل‌های فرعی در گیرنده است که در اثر تغییر زمان یا فرکانس ایجاد می‌شود، مانند آنچه که توسط اثر داپلر در یک وسیله نقلیه در حال حرکت ایجاد می‌شود. این تغییر در فرکانس منجر به از دست دادن تعامل و متعاقباً خطاهای بیتی می‌شود. این مشکل در LTE با افزودن یک پیشوند چرخه‌ای (CP)^{۳۰} (به هر دنباله بیت ارسالی کاهش می‌یابد).

CP بخشی از یک نماد OFDM است که در طول فرآیند DSP ایجاد شده است که کپی شده و به جلوی نماد اضافه می‌شود. اگر پاشندگی زمانی کوتاه‌تر از پیشوند چرخه‌ای باشد، این بیت افزونگی به‌گیرنده اجازه می‌دهد نماد را بازیابی کند. این اجازه می‌دهد تا OFDM بدون اکولایزر پیچیده که می‌تواند این مشکل را نیز اصلاح کند، پیاده‌سازی شود.

در حالی که لینک پایین LTE از OFDM استفاده می‌کند، لینک بالا از طرح مدولاسیون متفاوتی استفاده می‌کند که به‌نام مالتی پلکسینگ تقسیم فرکانس حامل (SC-FDMA) شناخته می‌شود. سیگنال‌های OFDM دارای نسبت اوج به توان متوسط (PAPR)^{۳۱} بالایی هستند که به تقویت کننده توان خطی با راندمان کلی کم نیاز دارند. این برای گوشی‌هایی که با باتری کار می‌کنند کیفیت پایینی دارد. PAPR دارای SC-FDMA کمتری است و برای اجرای قابل حمل مناسب‌تر است. فرآیند SC-FDMA پیچیده است و بحث مفصلی در مورد آن در اینجا گنجانده نشده است.

مایمو (MIMO): یکی از ویژگی‌های کلیدی LTE ترکیب چند ورودی چند خروجی^{۳۲} (MIMO) است، روشنی برای استفاده از دو یا چند آنتن و مدارهای دریافت و ارسال مرتبط برای دستیابی به سرعت‌های بالاتر در یک کانال مشخص. یک آرایش رایج 2×2 MIMO است که عدد اول تعداد آنتن‌های ارسال را نشان می‌دهد و عدد دوم تعداد آنتن‌های دریافتی است. LTE استاندارد می‌تواند تا یک آرایش 4×4 را در خود جای دهد.

تکنیک MIMO داده‌های سریالی را که قرار است منتقل شوند به جریان‌های داده جداگانه تقسیم می‌کند که سپس به طور همزمان از طریق همان کانال منتقل می‌شوند. از آنجایی که همه مسیرهای سیگنال متفاوت هستند، با پردازش ویژه می‌توان آنها را در گیرنده شناسایی و جدا کرد. نتیجه افزایش نرخ کلی داده توسط یک عامل مرتبط با تعداد آنتن‌ها است. این تکنیک همچنین مشکل چند مسیری را کاهش می‌دهد و به‌دلیل تنوع دریافت به قابلیت اطمینان سیگنال می‌افزاید.

نسخه خاصی از MIMO معروف به MIMO چند کاربره در برخی از سیستم‌های سلولی و همچنین در برخی از سیستم‌های Wi-Fi در حال پیاده‌سازی است. این به‌چندین کاربر اجازه می‌دهد تا یک

^{۲۹} InterSymbol Interference (ISI)

^{۳۰} Cyclical Prefix (CP)

^{۳۱} Peak-to-Average-Power Ratio (PAPR)

^{۳۲} Multiple Input Multiple Output (MIMO)

کانال مشترک را به اشتراک بگذارند. MU-MIMO به بسیاری از آنتن‌ها متکی است که دسترسی چندگانه تقسیم فضایی (SDMA) و همچنین کدگذاری کانال منحصر به فرد را برای جدا نگه داشتن سیگنال‌ها اجرا می‌کنند. پهنانی باند کانال بر حسب نیاز بین کاربران تقسیم می‌شود.

مشکل در اجرای MIMO به دلیل اندازه کوچک گوشی و فضای محدود آن برای آنتن‌ها ایجاد می‌شود. در حال حاضر اکثر گوشی‌های هوشمند دارای پنج آنتن هستند، از جمله آنتن‌هایی که برای همه باندهای مختلف سلولی به علاوه Wi-Fi، NFC و شاید GPS بلوتوث، وجود ندارد. این احتمال بستگی دارد که بیشتر تلفن‌ها بیش از دو آنتن MIMO LTE داشته باشند، و گنجاندن آنها به این حفظ شود. البته استفاده از آنتن‌های ایستگاه پایه راحت‌تر است. به نظر می‌رسد یک چیدمان LTE معمولی 2×4 باشد تا پوشش بهینه را با فضای موجود فراهم کند.

نرخ داده: همانطور که مشاهده کردید، نرخ داده مورد استفاده یا به دست آمده با LTE به چندین ویژگی بستگی دارد. این بستگی به پهنانی باند کانال، نوع مدولاسیون، شکل بندی MIMO و البته کیفیت مسیر بی‌سیم دارد. در بدترین حالت، سرعت داده می‌تواند تنها چند مگابیت در ثانیه باشد، اما در شرایط خوب، نرخ داده می‌تواند به بیش از ۳۰۰ مگابیت در ثانیه افزایش یابد. به طور متوسط، بیشتر نرخ‌های عملی پیوند پائین LTE در محدوده ۵ تا ۱۵ مگابیت بر ثانیه است. این سریعتر از برخی از خدمات دسترسی ثابت به اینترنت با استفاده از کابل یا DSL است.

دسترسی: دسترسی به استفاده از یک کانال برای پذیرش بیش از یک کاربر اشاره دارد. این به طور موثر یک روش مالتی پلکس است. روش‌های استاندارد شامل دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس (FDMA)، دسترسی چندگانه تقسیم زمانی (TDMA) و دسترسی چندگانه تقسیم کد (CDMA) می‌باشد. OFDMA از برخی از حامل‌های فرعی موجود و شکاف‌های زمانی در آن زیرحاميل‌ها برای هر کاربر استفاده می‌کند. تعداد زیر حامل‌ها و شکاف‌های زمانی مورد استفاده به عوامل متعددی بستگی دارد. در هر صورت، معمولاً می‌توان تا صدها کاربر را در هر پهنانی باند کانال جای داد.

TD-LTE

بیشتر LTE از نوع FDD خواهد بود، حداقل در ایالات متحده، اروپا و بخش‌هایی از آسیا. گروه‌های طیف زوجی برای انتقال‌های لینک بالا و پایین جداگانه مورد نیاز هستند. TD-LTE تنها به یک بخش طیف نیاز دارد. TD-LTE به دلیل در دسترس بودن طیف محدودتر به طور گسترده در چین و هند اجرا می‌شود. این باعث حفظ طیف شده و کاربران بیشتری را در هر مگاهرتز فراهم می‌کند. استانداردهای LTE شامل تعریفی برای TD-LTE است. انتظار می‌رود که برخی از اپراتورهای ایالات متحده، از جمله Sprint، از TD-LTE استفاده کنند.

LTE پیشرفته

LTE-A بر اساس معماری OFDM/MIMO ساخته شده است تا نرخ داده را بیشتر افزایش دهد. این در نسخه‌های ۱۱ و ۳GPP ۱۰ تعریف شده است. پنج ویژگی اصلی وجود دارد: تجمع حامل، افزایش MIMO، انتقال هماهنگ چند نقطه‌ای، پشتیبانی از هت نت (سلول‌های کوچک) و رله‌ها. سلول‌های کوچک در بخش بعدی پوشش داده شده است.

تجمیع حامل به استفاده از دو یا چند کانال ۲۰ مگاهرتز اشاره دارد که در یک کانال برای افزایش سرعت داده ترکیب شده‌اند. حداقل پنج کانال ۲۰ مگاهرتزی را می‌توان ترکیب کرد. این کانال‌ها می‌توانند به هم پیوسته یا غیرمرتب باشند که توسط تخصیص طیف حامل تعریف می‌شود. با حداقل تخصیص MIMO، 64QAM و پهنانی باند ۱۰۰ MIMO، می‌توان به حداقل سرعت انتقال داده یک

گیگابیت بر ثانیه دست یافت.

شکل‌بندی‌های MIMO را 4×4 تعریف می‌کند. با LTE-A که 8×8 با پشتیبانی از دو آنتن ارسال در گوشی افزایش یافته است. اکثر گوشی‌های LTE از دو آنتن دریافت و یک آنتن ارسال استفاده می‌کنند. این افزودنی‌های MIMO در صورت تصویب، افزایش سرعت داده را در آینده فراهم می‌کنند.

پشتیبانی HetNet به پشتیبانی از سلوول‌های کوچک در یک شبکه ناهمنگ کلی بزرگتر اشاره دارد. HetNet ترکیبی از ایستگاه‌های پایه سلوول مacro استاندارد به اضافه سلوول‌های میکرو، متروسل‌ها، پیکوسل‌ها، فمتوسل‌ها و حتی نقاط داغ Wi-Fi است. این شبکه برای بهبود قابلیت اطمینان اتصال و افزایش نرخ داده، پوشش بیشتری را در یک منطقه خاص ارائه می‌کند. سلوول‌های کوچک در بخش بعدی پوشش داده شده است.

انتقال چند نقطه‌ای هماهنگ به عنوان MIMO تعاوی نیز شناخته می‌شود. این مجموعه‌ای از تکنیک‌ها با استفاده از اشکال مختلف MIMO و شکل دهی پرتو برای بهبود عملکرد در لبه‌های سلوول است. از برنامه‌ریزی هماهنگ و فرستنده‌ها و آنتن‌هایی استفاده می‌کند که در کنار هم قرار نگرفته‌اند تا تنوع فضایی بیشتری را فراهم کند که می‌تواند قابلیت اطمینان پیوند و نرخ داده را بهبود بخشد. رله‌ها استفاده از ایستگاه‌های تکرارکننده برای کمک به پوشش در مناطق انتخاب شده، به ویژه در محیط‌های سرپوشیده که بیشتر تماس‌ها آغاز می‌شوند، است. LTE-A نوع ایستگاه پایه دیگری به نام ایستگاه رله را تعریف می‌کند. این یک ایستگاه پایه کامل نیست بلکه یک نوع سلوول کوچک است که در زیرساخت HetNet قرار می‌گیرد و راهی برای افزایش نرخ داده و بهبود قابلیت اطمینان یک پیوند بی‌سیم ارائه می‌دهد.

برخی از استقرار LTE-A در اوخر سال ۲۰۱۳ با افزایش پذیرش در سال ۲۰۱۴ و پس از آن رخداد، حداقل در حال حاضر. با این حال، چندین مشکل جدی در طراحی و استقرار ایجاد می‌کند. شبکه LTE-A و یک گوشی LTE-A روی یک شبکه استاندارد LTE کار می‌کند.

LTE-A چالش‌ها

LTE بسیاری از مشکلات را در ارائه خدمات بی‌سیم پرسرعت حل می‌کند. روش بهتری وجود ندارد، حداقل در حال حاضر. با این حال، چندین مشکل جدی در طراحی و استقرار ایجاد می‌کند. بزرگترین مشکلی که باید بر آن غلبه کرد، لزوم استفاده از نوارهای متعددی است که اغلب از یکدیگر فاصله زیادی دارند. در نتیجه، این امر به آنتن‌های متعدد، تقویت کننده‌های قدرت متعدد، فیلترهای متعدد، مدارهای سوئیچینگ و گاهی اوقات راه حل‌های پیچیده تطبیق امپدانس در ایستگاه‌های پایه و همچنین خود تلفن‌ها نیاز دارد. هر اپراتور تلفن همراه برای طیف خود تلفن‌های همراه را مشخص می‌کند.

علاوه بر این، تقویت کننده‌های توان (PA) باید بسیار خطی باشند، اگر بخواهیم مقدار بردار خطای (EVM) در محدوده مشخصات روش‌های مدولاسیون چندسطحی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. تقویت کننده‌های خطی ناکارآمد هستند و به همین دلیل بزرگترین مصرف کننده برق در تلفن به جز صفحه نمایش لمسی هستند. نیاز به پوشش باندهای متعدد، استفاده از چندین PA را ضروری می‌کند. در نتیجه عمر باتری در تلفن‌های LTE معمولاً کوتاه‌تر است. نیاز به گنجاندن MIMO همچنین به معنای آنتن‌ها و پاس‌های اضافی است.

راه حل این مشکلات در تقویت کننده‌های توان با کارایی بیشتر و تعداد کمتری از آنها نهفته است. همچنین، آنتن‌های پهنه‌ای باند بیشتر مشکل چند باندی را حل می‌کنند. آنتن‌های قابل تنظیم

نیز توسط چندین شرکت طراحی می‌شوند تا چندین باند را با یک ساختار واحد پوشش دهند. چالش دیگر تست است. تست سیستم‌های LTE با MIMO یک فرآیند پیچیده است. خوبی‌خانه تعدادی از شرکت‌های تجهیزات تست سیستم‌هایی را برای این منظور ایجاد کرده‌اند. یکی از بزرگترین چالش‌ها، آزمایش پیکربندی‌های سطح بالاتر MIMO ۸×۸ LTE-A است. MIMO ۸×۸ LTE-A را مجاز می‌کند.

صوت روی LTE

LTE یک شبکه داده IP مبتنی بر بسته است. در ابتدا LTE شامل یک سرویس صوتی نبود. با این حال، صدای LTE اکنون در حال پیاده‌سازی است. امروزه، اگر از تلفن هوشمند LTE استفاده می‌کنید، ممکن است همچنان از شبکه 2G یا 3G موجود برای آنچه که سرویس صوتی سوئیچ مدار نامیده می‌شود استفاده کنید. در نهایت صدا از طریق VoLTE (VoLTE) به طور کامل در ایستگاه‌های پایه و در گوشی‌ها پیاده سازی خواهد شد. فقط VoIP از طریق LTE است و به سادگی به عنوان کاربرد داده در شبکه IP عمل می‌کند.

اگرچه یک پروتکل VoLTE تعریف شده است، پیاده‌سازی آن نیازمند تصمیمات مهندسی عمده و تغییرات شبکه است. بیشتر این موارد مربوط به حفظ اتصالات صوتی برای تلفن‌های قدیمی غیر LTE برای مدت طولانی است. تغییراتی که به کاربران تلفن LTE اجازه می‌دهد در صورتی که از منطقه‌ای بدون LTE خارج شوند، خدمات صوتی دریافت کنند، بسیار مشکل هستند. هنگامی که VoLTE در دسترس است، مشترک می‌تواند با استفاده از سیستم LTE تماسی را آغاز کند اما از منطقه تحت پوشش LTE خارج شود. سیستم‌ها باید بتوانند آن تماس را به یک شبکه صوتی سنتی تحويل دهند. سازوکار این امر نرم افزار شبکه‌ای به نام بازگشت سوئیچ مدار (CSFB) است. اکنون در اکثر شبکه‌ها در دسترس است. مشکل دیگر ورود VoLTE به گوشی‌ها است. VoLTE به یک تراشه جدگانه در گوشی نیاز دارد و امروزه تعداد کمی از آنها چنین قابلیتی را دارند.

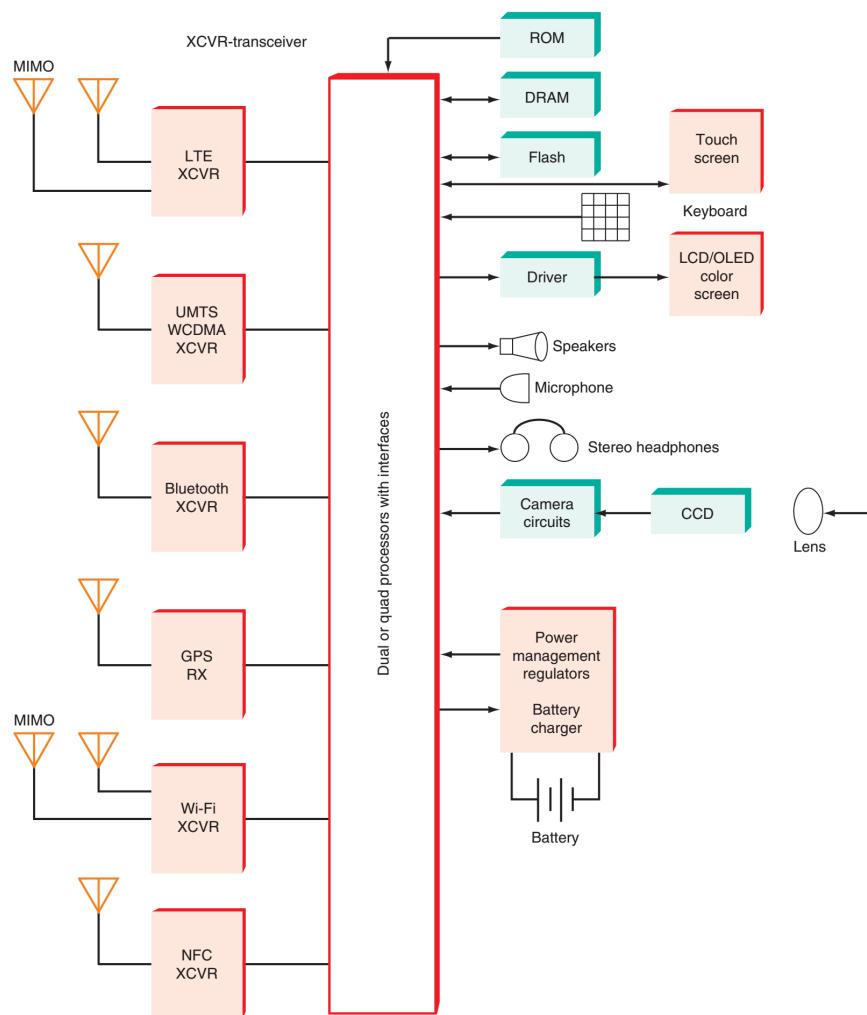
پیاده‌سازی VoIP به وکور نیاز دارد، مداری که اساساً یک مبدل A-to-D برای دیجیتالی کردن سیگنال صوتی و یک مبدل D-to-A برای تبدیل صدای دیجیتال به صدای آنالوگ برای کاربر است. یک وکور همچنین دارای فشرده سازی صدا است، تکنیکی که به طور موثر تعداد بیت‌های مورد استفاده برای نمایش صدا را به حداقل می‌رساند. این اجازه می‌دهد تا صدا سریعتر اما با سرعت داده کمتر منتقل شود بنابراین پهنای باند زیادی را اشغال نمی‌کند.

LTE از چیزی استفاده می‌کند که به آن کد صوتی چند نرخی تطبیقی^{۳۳} (AMR) می‌گویند. این همچنین در سیستم‌های GSM و سایر استانداردهای 3GPP استفاده می‌شود. دارای قابلیت بیت ریت متغیر از ۱/۸ کیلوبیت بر ثانیه تا ۱۲/۲ کیلوبیت بر ثانیه است. سیپس صدای دیجیتالی در بسته‌های AMR و سیپس بسته‌های IP مونتاژ می‌شود، که سیپس به ترتیب انتقال برنامه‌ریزی می‌شوند. یک تماس به برخی از حامل‌های فرعی OFDMA و برخی از شکاف‌های زمانی در جریان بیت‌های هر فرعی اختصاص داده می‌شود.

تجزیه و تحلیل گوشی‌های هوشمند

پیچیده‌ترین تلفن همراه موجود امروزی تلفن هوشمند نامیده می‌شود. LTE و طیف گسترده‌ای از فناوری‌های بی‌سیم دیگر را در خود جای داده است. این احتمال وجود دارد که شما از قبل گوشی هوشمند داشته باشید. در اینجا تجزیه و تحلیل مختصراً از آنچه در داخل یک تلفن هوشمند معمولی مدرن وجود دارد آورده شده است. همانطور که در شکل (۱۵.۲۰) نشان داده شده است، به‌بلوک

^{۳۳} Adaptive Multi-Rate (AMR)



شکل ۱۵.۲۰: بلوك دياگرام يك تلفن هوشمند عمومي 4G LTE

دیاگرام یک تلفن هوشمند معمولی مراجعه کنید. اکثر تلفن‌های همراه امروزه دیگر فقط رادیوهای دو طرفه برای برقراری تماس تلفنی نیستند. در عوض، در هسته تلفن هوشمند یک میکروکامپیوتر دو پردازنده یا چهار پردازنده قرار دارد که همه عملکردهای مختلف را اجرا می‌کند. تلفن هوشمند امروزی در واقع یک ریز کامپیوتر همه منظوره است که اتفاقاً دارای تلفن همراه با سایر قابلیت‌های ارتباطی است. قدرت محاسباتی موجود توسعه طیف گسترده‌ای از نرمافزارهای کاربردی (برنامه‌ها) را امکان‌پذیر کرده است. این برنامه‌ها به تلفن هوشمند توانایی بسیار فراتر از عملکرد اصلی آن می‌دهند.

صفحه نمایش‌های لمسی رنگی : ویژگی بارز هر تلفن هوشمند امروزی صفحه نمایش رنگی بزرگ آن است. این نمایشگرهای باوضوح بالا با فناوری‌های مختلفی مانند LCD یا OLED ساخته می‌شوند. همه آنها امروزه صفحه نمایش لمسی هستند، به این معنی که همه کنترل‌ها مانند دکمه‌ها، صفحه کلید و سایر ابزارهای عملیاتی با فشار دادن یا کشیدن صفحه نمایشگر عمل می‌کنند.

دوربین‌ها : اکثر تلفن‌های همراه و اکثر تلفن‌های هوشمند دارای دوربین دیجیتالی هستند. این دوربین‌ها از حسگر نور CMOS یا CCD و یک لنز برای گرفتن صحنہ و ذخیره آن در حافظه فلاش استفاده می‌کنند. این دوربین‌ها دارای رزولوشن ۵ تا ۴۰ مگاپیکسل هستند، بنابراین رقیب دوربین‌های مستقل هستند. بسیاری از دوربین‌ها با فلاش LED همراه هستند. در حالی که این دوربین‌ها در درجه اول برای عکس‌های ثابت هستند، اکثر آنها قادر به ضبط ویدیوی بلادرنگ هستند. بسیاری از تلفن‌های هوشمند یک دوربین دوم در جلو برای برقراری تماس‌های تلفنی و گرفتن عکس‌های سلفی نیز دارند.

مودم‌های رادیویی : تقریباً همه تلفن‌های هوشمند امروزی دارای فناوری 4G LTE هستند. گوشی‌های جدیدتر از آرایش MIMO دو آنتنی استفاده می‌کنند. این تلفن معمولاً 2G و 3G برای تماس‌های صوتی و همچنین قابلیت برگشت برای تماس در منطقه‌ای بدون سرویس LTE است.



شکل ۱۶.۲۰: ساعت هوشمند Samsung با یک گوشی هوشمند با فناوری بی‌سیم بلوتوث ارتباط برقرار می‌کند.

بلوتوث : بلوتوث یک فناوری رادیویی با برد کوتاه است که در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت. با این حال، عملکرد اصلی آن در اکثر تلفن‌های همراه، پیاده‌سازی هدست و میکروفون بی‌سیم است. رادیو بلوتوث همچنین می‌تواند با فناوری iBeacon استفاده شود که به تلفن‌های همراه اجازه می‌دهد برچسب‌های اطلاعات نزدیک و دستگاه‌های مکان بلوتوث را بخوانند. همچنین احتمالاً می‌تواند با سیستم‌های پرداخت بدون نقد که جایگزین کارت‌های اعتباری می‌شوند، استفاده شود. بلوتوث همچنین به عنوان یک وسیله اتصال برای ساعت‌های هوشمند، لوازم جانبی قابل پوشیدن برای بسیاری از تلفن‌های هوشمند استفاده می‌شود. ساعت هوشمند هشدار تماس، شکل (۱۶.۲۰)، متن یا ایمیل، زمان و اطلاعات دیگر را بدون بیرون آوردن گوشی هوشمند از جیب یا کیف شما ارائه می‌دهد.

Wi-Fi : Wi-Fi یک فناوری شبکه محلی بی‌سیم (WLAN) است که به طور گسترده در سراسر

جهان برای پیاده‌سازی اتصالات اینترنتی استفاده می‌شود. تقریباً همه تلفن‌های هوشمند دارای یک فرستنده وای فای هستند و بسیاری از آنها دارای دو آنتن برای MIMO Wi-Fi هستند. قابلیت به تلفن‌های هوشمند اجازه می‌دهد به هر نقطه دسترسی یا نقطه داغ، از جمله روترهای بی‌سیم که امروزه بخشی از بسیاری از اتصالات اینترنت پهن باند خانگی هستند، متصل شوند. Wi-Fi در فصل دوازدهم پوشش داده شده است.

GPS : یکی دیگر از رادیوهای موجود در اکثر تلفن‌های هوشمند یک گیرنده GPS است. این به تلفن هوشمند قابلیت ناوبری می‌دهد. تلفن هوشمند معمولاً با نرم افزار نقشه‌برداری همراه است که نمایش‌های بصری واضحی از نقشه‌های متصل به ماهاواره‌های ناوبری GPS را ارائه می‌دهد.

NFC : ارتباطات میدان نزدیک است، یکی دیگر از فناوری‌های رادیویی کوتاه برد که در برخی از تلفن‌های هوشمند تعیینه شده است. در سیستم‌های پرداختی که پول نقد و کارت‌های اعتباری را حذف می‌کنند استفاده می‌شود. NFC در همه تلفن‌های همراه وجود ندارد.

ویژگی‌های عملکرد : علاوه بر این که می‌توانید با هر فرد دیگری تماس تلفنی برقرار کنید تلفن در هر نقطه از جهان، همه تلفن‌های هوشمند به اینترنت دسترسی دارند. نرم افزار سیستم عامل شامل یک مرورگر است که به شما اجازه می‌دهد تا همانطور که از کامپیوتر رومیزی یا لپ تاپ می‌خواهید به اینترنت دسترسی داشته باشید. تنها نقطه ضعف آن صفحه نمایش کوچک است.

یکی دیگر از ویژگی‌های رایج، ایمیل است. از آنجایی که می‌توانید به اینترنت دسترسی داشته باشید، می‌توانید به راحتی به حساب ایمیل معمولی خود از هر مکانی دسترسی داشته باشید. ارسال پیامک یکی دیگر از ویژگی‌های رایج است که بیشتر از ایمیل استفاده می‌شود.

پخش موسیقی بخشی از همه تلفن‌های هوشمند است. تقریباً همه تلفن‌های هوشمند این قابلیت را دارند که آهنگ‌ها و موزیک ویدیوها را به صورت فشرده برای پخش روی بلندگوهای داخلی یا از طریق هدفون ذخیره کنند.

یکی از محبوب‌ترین ویژگی‌های تلفن‌های هوشمند مدرن، قابلیت پخش فیلم است. به لطف فناوری فشرده‌سازی دیجیتالی، ارائه ویدئو بسیار رایج است. از طریق اتصال به اینترنت، می‌توانید ویدیوها را از چندین منبع مانند Google، YouTube، Hulu، Netlfix، سایر منابع ویدیویی برای فیلم‌ها و سایر موضوعات کوتاه تماشا کنید.

یکی دیگر از کاربردهایی که به لطف ویدیو و نمایشگر با وضوح بالا امکان پذیر است، بازی‌ها است. امروزه به معنای واقعی کلمه هزاران بازی برای تلفن‌های هوشمند موجود است و اینها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همه این ویژگی‌ها به دلیل قدرت پردازش داخلی امکان پذیر است. اکثر تلفن‌های هوشمند دارای پردازنده‌ای هستند که شامل دو هسته است که هر هسته یک میکروکنترلر کامل ۳۲ بیتی است. برخی از تلفن‌ها همچنین دارای پردازنده‌های چهار هسته‌ای بزرگتر هستند و بسیاری از آنها دارای قدرت پردازش ۶۴ بیتی و همچنین قدرت پردازش ۳۲ بیتی هستند. این پردازنده‌های متعدد DSP مورد نیاز اکثر گوشی‌های امروزی را پیاده‌سازی می‌کنند. همه تلفن‌های همراه رادیوهای نرم‌افزاری تعریف شده هستند و عملاً تمام مدولاسیون، دمودولاسیون، رمزگذاری، رمزگشایی، فشرده‌سازی صدا و ویدئو و سایر عملکردها توسط پردازنده‌ها انجام می‌شود. پردازنده‌ها همچنین سیستم عامل و هر نرم افزار کاربردی که بعداً اضافه می‌شود را اجرا می‌کنند. پردازنده‌ها معمولاً با DRAM استاندارد و حافظه فلاش همراه هستند. انواع رابطه‌ای سریالی و موازی ویژه برای اتصال به نمایشگر، دوربین‌ها و سایر تجهیزات جانسی ارائه شده است.

باتری و شارژر : بخش کلیدی هر تلفن همراه منبع تغذیه باتری و سخت افزار مدیریت انرژی آن است. باتری لیتیوم یون مجموعه‌ای کامل از تنظیم کننده‌های ولتاژ متعدد و مبدل‌های DC-DC را کار می‌کند که تمام ولتاژ‌های کاری مختلف را به آی‌سی‌ها، رابط‌ها و دستگاه‌های جانبی تامین می‌کند. سیستم مدیریت انرژی همچنین مدارهای غیر ضروری مانند نمایشگر را در موقعی که از آنها استفاده نمی‌شود، خاموش می‌کند.

علاوه بر این، همه گوشی‌ها دارای شارژر باتری هستند. شارژر باتری از یک منبع برق AC خارجی کار می‌کند. برخی از تلفن‌های جدیدتر شامل شارژر باتری بی‌سیم هستند. این سیستم از القای مغناطیسی برای اتصال تلفن همراه به شارژر خود استفاده می‌کند. هم شارژر و هم تلفن همراه دارای سیم پیچ‌های داخلی هستند که به صورت سیم پیچ روی ترانسفورماتور عمل می‌کنند. عمل ترانسفورماتور با نزدیک کردن سیم پیچ‌ها بهم، برق متناوب را از شارژر به مدار شارژر داخل تلفن همراه با القای مغناطیسی منتقل می‌کند، به طوری که نیازی به اتصال سیم نیست.

5G چیست؟

یک دهه یا بیشتر طول می‌کشد تا LTE و به خصوص LTE-A در پوشش سلوی تسلط یابد. علاوه بر این، نسخه‌های جدید LTE از 3GPP هنوز در راه است. علاوه بر این، برخی از مقررات نسخه‌های LTE فعلی هنوز اجرا نشده است. یک مثال شبکه‌های خودسازماندهی (SON) است، ویژگی که برنامه‌ریزی، پیکربندی، بهینه‌سازی و مدیریت شبکه‌ها را آسان‌تر می‌کند. با SON، همه ایستگاه‌های پایه با در نظر گرفتن ایستگاه‌های جدید نزدیک و سایر شرایط، خود پیکربندی می‌شوند. حرکت سلوی‌های کوچک که در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد، قطعاً مبتنی بر LTE است و استقرار گستردگی با SON هنوز در راه است.

در این بین، تحقیقات در مورد نسل پنجم (5G)^{۴۴} بی‌سیم سلوی ادامه دارد. این امکان وجود دارد که 5G به سادگی در همان مسیر 4G و LTE باقی بماند، یعنی 5G از فرکانس‌های بالاتر و پهنای باند وسیع‌تری برای دستیابی به نرخ‌های داده بالاتر استفاده کند. با وجود فناوری نیمه‌هادی که هنوز در اندازه‌های کوچکتر IC قابل اجرا است، عملیات تا صدها گیگاهرتز امکان پذیر است. در حال حاضر، سیستم‌های موج میلی‌متری پیشرفته (۳۰ تا ۳۰۰ گیگاهرتز) با مجموعه‌های تراشه‌های پیشرفته در شبکه‌های شخصی کوتاه برد (PAN)^{۴۵} (برای انتقال ویدیویی خانگی (۶۰ گیگاهرتز)، رادار خودرو (۷۷ گیگاهرتز) و سلوی/اگرم پشتیبانی نقطه‌ای (۸۰ گیگاهرتز) کار می‌کنند. برخی فکر می‌کنند که بخش‌های طیف ۲۸ و ۳۸ گیگاهرتز فرسته‌های خوبی را برای تلفن همراه ارائه می‌دهند. به دلیل فرکانس‌های بالاتر، برد کوتاه‌تر است، به این معنی که تعداد سلوی‌های بیشتر اما کوچک‌تر است. با این حال، با استفاده از MIMO سطح بالاتر، آرایه‌های آتن با بهره بالاتر و شکل دهی پرتو، پوشش قابل اعتماد خواهد بود و پهنای باند موجود اجازه می‌دهد تا سرعت دانلود داده تا ۱۰ گیگابیت بر ثانیه برسد. به طور خلاصه، 5G با احتمال زیاد سلوی‌های کوچک زیادی خواهد بود که در یک یا چند باند موج میلی‌متری با استفاده از آتن‌های هوشمند، قابل هدایت و با بهره بالا کار می‌کنند.

^{۴۴}Fifth generation (5G)

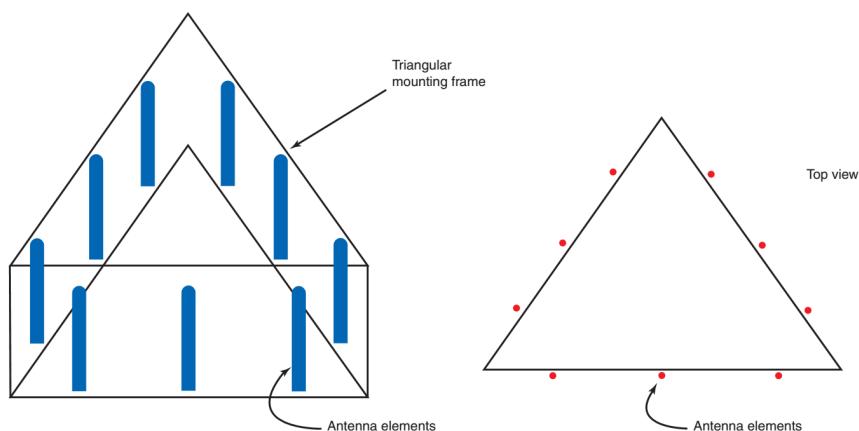
^{۴۵}Short range Personal area Network (PAN)

۵.۲۰ ایستگاه‌های پایه و سلول‌های کوچک

ایستگاه‌های پایه که به آن سایت‌های سلولی یا سلول‌های کلان نیز می‌گویند، قلب شبکه سلولی را تشکیل می‌دهند. آنها تمام اتصالات رادیویی و عملکردهای عملیاتی و کنترلی را اجرا می‌کنند و از طریق تجهیزات پشتیبانی به شبکه تلفن شرکت مخابراتی و همچنین اینترنت متصل می‌شوند. یک روند کلیدی امروزه ترکیب سلول‌های کوچک برای تکمیل ایستگاه‌های پایه موجود برای بهبود پوشش و سرعت داده است.

ایستگاه‌های پایه

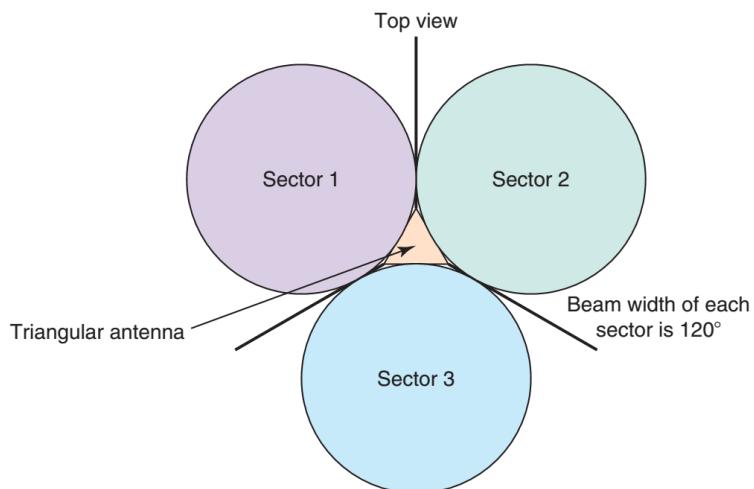
پیچیده‌ترین و گران‌ترین بخش هر سیستم تلفن همراه، شبکه ایستگاه‌های پایه است که اپراتورها باید داشته باشند تا همه آن کار کند. در طول سال‌ها، اپراتورها ایستگاه‌های پایه بسیاری را اضافه کرده‌اند تا بتوانند تعداد مشترکین در حال افزایش را مدیریت کنند. علاوه بر این، هر ایستگاه پایه به‌دلیل تعداد فزاینده و تنوع استانداردهای رادیویی که باید انجام دهد، گسترش یافته و پیچیده‌تر شده است. ایستگاه‌های پایه باید به پشتیبانی از فناوری‌های 2G، پیشرفتهای 2.5G و اکنون سیستم‌های 3G ادامه دهند. پشتیبانی از استانداردهای متعدد منجر به تولید تجهیزات بسیار بیشتر شده است. تلاش‌هایی توسط سازندگان ایستگاه‌های پایه برای یکپارچه‌سازی تجهیزات با استفاده از تکنیک‌های رادیویی تعریف شده توسط نرمافزار و DSP انجام شده است. این روش‌ها به گیرنده‌های ایستگاه پایه اجازه می‌دهند تا استانداردهای متعدد موجود را تطبیق دهند و بتوانند با برنامه‌ریزی مجدد به جای جایگزینی تجهیزات، با استانداردهای جدید کار کنند.



شکل ۱۷.۲۰: آنتن سایت سلول مثلثی معمولی.

ایستگاه‌های پایه از گیرنده‌ها و فرستنده‌های متعددی تشکیل شده‌اند، به طوری که بسیاری از تماس‌ها را می‌توان در کانال‌های مختلف به طور همزمان مدیریت کرد. فرستنده‌های موجود در محل سلول بسیار قوی‌تر از فرستنده‌های موجود در گوشی هستند. سطوح توان تا ۴۰ وات معمولی است. این سطوح توان با تقویت کننده‌های توان باند پهن بسیار خطی کلاس A یا کلاس AB به دست می‌آید. از آنجایی که سیستم‌های CDMA و LTE به تقویت خطی نیاز دارند، ایستگاه‌های پایه از پیش

اعوجاج دیجیتالی (DPD) و ردیابی پاکت (ET) برای بهبود کارایی استفاده می‌کنند. خطی بودن برتر بسیار مهم است، بهویژه در سیستم‌های CDMA و LTE که طیف وسیعی را پوشش می‌دهند. غیرخطی‌ها سیگнал‌های کاذب و مدولاسیونی ناخواسته تولید می‌کنند که می‌تواند سیستم را غیرقابل اجرا کند.



شکل ۱۸.۲۰: تابش افقی و الگوی دریافت یک آنتن سایت سلوی معمولی.

واضح ترین ویژگی ایستگاه پایه، آنتن دهی آن بر روی برج است. آنتن‌های مورد استفاده ایستگاه‌های پایه باید به فرستنده‌ها و گیرنده‌های زیادی از طریق جداکننده‌ها، ترکیب کننده‌ها و تقسیم‌کننده‌ها خدمت کنند. همانطور که الگوهای سلوی نشان می‌دهند، آنتن‌های ایستگاه پایه بیشتر جهت‌دار شده‌اند. این "بخش بندی" سایت سلوی به افزایش ظرفیت مشترک با حداقل هزینه کمک کرده است. اکثر ایستگاه‌های پایه از یک آرایه آنتن مثلثی استفاده می‌کنند که شبیه آنچه در شکل (۱۷.۲۰) نشان داده شده است. در هر طرف قاب مثلثی آرایه‌ای از سه آنتن عمودی وجود دارد که یک آرایه پهن یا خطی را تشکیل می‌دهد که ممکن است از بازنگردی نیز استفاده کند. هر یک از این سه آرایه بهره‌ای در حدود ۸ دسی‌بل و یک الگوی آنتن با عرض پرتو ۱۲۰ درجه تولید می‌کنند. این پوشش سلوی را به سه بخش مساوی تقسیم می‌کند، شکل (۱۸.۲۰). این قابلیت جهت ایزوله سازی عالی از سه بخش را فراهم می‌کند، که بهنوبه خود امکان استفاده از فرکانس‌های کانال مشابه را در هر یک از سه بخش ۱۲۰ درجه فراهم می‌کند. برخی سایتها از دو آنتن مکمل نیز استفاده کرده که تنوع فضایی را فراهم می‌کنند و دریافت سیگнал‌های ضعیف از گوشی را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. اپراتورها شروع به استفاده از آنتن‌های پیچیده‌تر تشکیل دهنده پرتو «هوشمند» با عنصر، آرایه‌ها و بخش‌های بیشتر برای بهبود بیشتر ظرفیت کرده‌اند.

یک روند کلیدی بسته بندی تمام مدارهای ارسال و دریافت RF، از جمله تقویت کننده‌های قدرت، در یک محفظه کوچک است که در آنتن‌های بالای برج نصب شده است. بهاین سرهای رادیویی از راه دور (RRH) می‌گویند. آنها خطوط انتقال طولانی، پرهزینه و پر تلفات را حذف کرده و در نتیجه

^{۳۶}Envelope Tracking (ET)

^{۳۷}Remote Radio Heads (RRH)

راندمان برق ایستگاه پایه را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. تجهیزات ایستگاه پایه از طریق یک رابط فیبر دیجیتالی به نام رابط مشترک رادیویی عمومی (CPRI) به RRH متصل می‌شوند.

سلول‌های کوچک و منطقی HetNet

سلول کوچک یک ایستگاه پایه سلولی مینیاتوری با توان و برد محدود است. عملکرد آن تکمیل ایستگاه‌های پایه ماکرو بزرگ‌تر است که اکنون رایج‌ترین شکل سایت سلولی است. این اجزه می‌دهد تا ظرفیت مشترک بیشتر و همچنین سرعت داده بالاتر را برای همه افراد مرتبط فراهم کند. سلول‌های کوچک روند رو به رشدی هستند که انتظار می‌رود بیشترین تأثیر خود را در آینده داشته باشند.

در حال حاضر، ترافیک تلفن همراه توسط شبکه عظیمی از سایت‌های سلولی به نام ایستگاه‌های پایه^{۲۸} (BS) ماکرو اداره می‌شود. این BS‌های ماکرو با قدرت بالا، برج‌های بلند با آرایه‌های آتن متعدد، برد بلند و منابع تغذیه پشتیبان، بیشتر ایالات متحده را به جز برشی مناطق بسیار روستایی و دارای چالش جغرافیایی پوشش می‌دهند. نزدیک به ۳۰۰۰۰۰ چنین ایستگاه پایه در ایالات متحده وجود دارد. پیدا کردن و ایمن سازی مکان‌های مناسب برای چنین BS روز به روز دشوارتر می‌شود. راه حل، سلول کوچک است.

علاوه بر این، موقفيت گوشی‌های هوشمند و تقاضای رو به رشد مشترکین برای خدمات بیشتر و سریع‌تر، بر اپراتورهای تلفن همراه فشار وارد می‌کند تا توسعه و ارتقای استقرار BS خود را افزایش دهند. پاسخ اپراتورها ارتقای سیستم‌های خود با فناوری LTE 4G بوده است که سرعت دانلود بسیار سریع‌تری را ارائه می‌دهد که بهدلیل افزایش عمدۀ در مصرف ویدیو مورد نیاز است. LTE هنوز با پوشش کاملی که برای چندین سال دیگر انتظار نمی‌رود نصب می‌شود. یک راه حل واضح سلول کوچک LTE است.

در حالی که پذیرش LTE ظرفیت و سرعت را افزایش می‌دهد، محدودیت‌ها در حال رسیدن هستند. LTE OFDM به همراه روش‌های مدولاسیون پیشرفته و MIMO بازده طیفی (bit/Hz/Hz) سیستم سلولی را به حد شانون رسانده است. LTE Advanced با ارائه پهنای باند بیشتر از طریق تجمعی اپراتورها، سرعت را بهبود می‌بخشد. حد نهایی، طیفی است که در اختیار حامل است. باز هم سلول‌های کوچک و استفاده مجدد از فرکانس می‌تواند یک راه حل موقت تا زمانی که طیف بیشتری آزاد شود ارائه دهد.

یکی دیگر از مسائل مهم عملکرد داخلی تلفن‌های همراه است. نشان داده شده است که بیش از ۸۰ درصد یا تمام تماس‌های تلفن همراه در داخل خانه، منازل، ادارات، مراکز خرید، هتل‌ها و مکان‌های دیگر انجام می‌شود. عملکرد داخلی به طور قابل توجهی ضعیفتر از عملکرد در فضای باز است زیرا سیگنال‌های رادیویی به طور جدی توسط دیوارها، سقف‌ها، کف‌ها، مبلمان و سایر موانع ضعیف، اعوجاج و هدایت می‌شوند. موقعیت‌های داخلی برد رادیو را محدود می‌کند و علاوه بر آن سرعت داده را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. LTE برای غلبه بر این مشکل مفید است، اما راه حل واقعی سلول کوچک است.

همانطور که به نظر می‌رسد، نقاط دسترسی عمومی و خصوصی وای فای و نقاط دسترسی، تعریف اولیه سلول کوچک هستند. آنها می‌توانند به یک تلفن هوشمند، تبلت یا لپ تاپ کاربر متصل شوند و دسترسی به ویدیو و سایر اطلاعات و رسانه‌های مورد نیاز کاربر را فراهم کنند. اگر نقطه اتصال Wi-Fi در نزدیکی شما باشد، لازم نیست از شبکه تلفن همراه برای بارگیری ویدیو یا دسترسی به سایر برنامه‌های کلان داده استفاده کنید. اکثر سلول‌های کوچک سلولی دارای یک نقطه دسترسی Wi-Fi

^{۲۸}BaseStation (BS)

هستند.

گروههایی از سلول‌های کوچک فیزیکی را می‌توان در هر مکانی، در داخل یا خارج از خانه نصب کرد. آنها می‌توانند روی میز بنشینند یا روی دیوار، سقف، تیر چراغ یا تیر چراغ برق نصب شوند. سلول‌های کوچک شکاف‌های پوشش را پر می‌کنند و در جایی که پوشش ماکروسیمی ضعیف است خدمات ارائه می‌دهند. در جمعیت پر تراکم، شهرهایی با ساختمان‌های بلند نمونه هستند.

تخمین زده می‌شود که در اکثر شبکه‌ها از ۵ تا ۲۵ سلول کوچک در هر سلول ماکرو وجود داشته باشد. شبکه‌های سلول‌های کوچک روی شبکه ماکرو قرار می‌گیرند، یا همانطور که برخی می‌گویند، نه تنها در سرعت داده، بلکه ظرفیت مشترک را نیز افزایش می‌دهند. عملکرد کلی مشتری با اتصالات قابل اطمینان‌تر و سرعت دانلود به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.

بخش دیگری از روند سلول‌های کوچک، سیستم‌های آنتن توزیعی^{۳۹} (DAS) است. DAS از کابل فیبر نوری از یک BS ماکرو تا مجموعه‌ای از آنتن‌ها که در یک منطقه وسیع پخش شده‌اند برای گسترش دسترسی و بهبود قابلیت اطمینان اتصال استفاده می‌کند. در ساختمان‌های بزرگ، فرودگاه‌ها، مراکز همایش، مجتمع‌های ورزشی و سایر اماکن عمومی بزرگ استفاده می‌شود. مجموعه‌ای از BS ماکرو، سلول‌های کوچک، نقاط اتصال Wi-Fi و DAS اکنون به عنوان شبکه ناهمگن^{۴۰} یا شناخته می‌شود.

همه سلول‌های کوچک با استفاده از طیف مجازدار موجود که به شبکه‌های حامل اختصاص داده شده است. طیف محدود با روش استفاده مجدد فرکانس و تنوع فضایی مشترک است. استفاده مجدد فرکانس به استفاده از یک باند توسط چندین سایت سلولی اشاره دارد. تنوع فضایی به این معنی است که این مکان‌ها از یکدیگر فاصله دارند تا مناطق تحت پوشش با هم همپوشانی نداشته باشند و سطوح توان کنترل شود تا تداخل سلول‌های مجاور و آنها ای که در فرکانس یکسان هستند حذف یا به حداقل بررسد.

تعريف سلول‌های کوچک

چندین اندازه و نسخه مختلف از سلول‌های کوچک وجود دارد. آنها از نظر تعداد کاربرانی که می‌توانند مدیریت کنند، قدرت و برد آنها متفاوت است. تقریباً در همه موارد، همه آنها شامل فناوری‌های ضروری 3G اپراتور، Wi-Fi و LTE هستند. آنها یک منبع تغذیه و یک اتصال پشتیبان به شبکه سلولی دارند. جدول (۲.۲۰) اسامی کلی و قابلیت‌های هر طبقه بندی اصلی را نشان می‌دهد.

کوچکترین سلول فمتول فاست. فمتول یک جعبه BS است که توسط مصرف کننده یا دفاتر کوچک برای بهبود خدمات سلولی محلی استفاده می‌شود. فمتولها سال‌هast که وجود دارد و میلیون‌ها دستگاه توسط اکثر اپراتورهای بزرگ‌تر نصب شده‌اند. پشتیبانی از طریق اتصال اینترنت پرسرعت مشتری از طریق یک تلویزیون کابلی یا ارائه دهنده مخابرات DSL است. همچنین فمتولهای سازمانی وجود دارند که کاربران بیشتری را مدیریت می‌کنند و افزایش قابل توجهی در دسترسی به فضای داخلی ارائه می‌دهند.

سلول‌های کوچک به تدریج بزرگ‌تر مانند پیکوسل، میکروسیمی و متروسل وجود دارند که هر کدام ظرفیت، قدرت و برد بیشتری دارند. تقریباً همه از 3G، LTE قدیمی پشتیبانی می‌کنند و Wi-Fi را نیز شامل می‌شوند. بسیاری از سلول‌های کوچک آینده نیز دارای LTE-Advanced، نسخه سریع‌تر این فناوری 4G خواهند بود. برای جزئیات به جدول (۲.۲۰) مراجعه کنید.

^{۳۹}Distributed Antenna Systems (DAS)

^{۴۰}Heterogeneous Network

Table 20-2	A Summary of the Main Categories of Licensed Small Cells with their Defining Characteristics			
	Femto	Pico	Micro/Metro	Macro
Indoor/outdoor	Indoor	Indoor or outdoor	Outdoor	Outdoor
Number of users	4–16	32–100	200	200–1000+
Max output power	20–100 mW	250 mW	2–10 W	40–100 W
Max cell radius	10–50 m	200 m	2 km	10–40 km
Bandwidth	10 MHz	20 MHz	20, 40 MHz	60–75 MHz
Technology	3G/4G/Wi-Fi	3G/4G/Wi-Fi	3G/4G/Wi-Fi	3G/4G
MIMO	2 × 2	2 × 2	4 × 4	4 × 4
Backhaul	DSL, cable, fiber	Microwave, mm	Fiber, microwave	Fiber, microwave

جدول ۲۰.۲: خلاصه‌ای از دسته‌های اصلی سلول‌های کوچک دارای مجوز با ویژگی‌های تعیین کننده آنها.

داخل سلول کوچک

یک سلول کوچک هنوز یک ایستگاه پایه سلولی است اما تنها به چند تراشه و مدار کلیدی خلاصه می‌شود. به لطف پردازنده‌های چند هسته‌ای فوق سریع، اکثر عملیات‌های باند پایه 3G و LTE به راحتی توسط یک آی‌سی انجام می‌شوند. سپس این آی‌سی باند پایه به مدار RF که فرستنده رادیویی را تشکیل می‌دهد متصل می‌شود. بلوک دیاگرام کلی در شکل (۱۹.۲۰) نشان داده شده است.

فرستنده RF به نام آنالوگ front-end از گیرنده (RX) و فرستنده (TX) تشکیل شده است. گیرنده سیگنال خود را از آنتن دریافت و آن را در یک تقویت کننده کم نویز (LNA) تقویت کرده و سیگنال را به میکسرهای I/Q می‌فرستد و یک دمودولاتور تشکیل می‌دهد که سیگنال را بازیابی می‌کند. سیگنال‌ها به مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال (ADC) ارسال می‌شوند که ورودی را به پردازنده دیجیتالی جلویی ایجاد می‌کند.

بین بخش جلویی RF و پردازنده باند پایه مدار اضافی وجود دارد که کاهش، تبدیل دیجیتالی به بالا^{۴۱} (DUC) و تبدیل دیجیتالی به پائین^{۴۲} (DDC) را انجام می‌دهد. سایر پردازش‌های دیجیتالی شامل کاهش ضربی تاج CFR^{۴۳}، پیش اعوجاج دیجیتالی DPD^{۴۴} (DPD) و ریدیابی پوش^{۴۵} (ET) است. DPD و ET برای خطی‌سازی تقویت کننده‌های توان RF برای بهبود راندمان استفاده می‌شوند. همه این مدارها ممکن است در یک FPGA یا ASIC جداگانه باشند یا ممکن است در تراشه باند پایه یا مدار RF جلویی قرار گیرند.

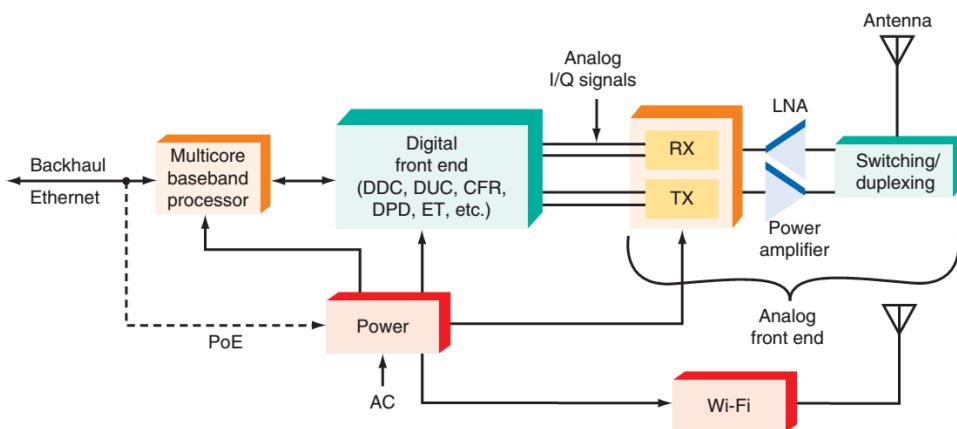
^{۴۱}Digital UpConversion (DUC)

^{۴۲}Digital DownConversion (DDC)

^{۴۳}Crest Factor Reduction (CFR)

^{۴۴}Digital PreDistortion (DPD)

^{۴۵}Envelope Tracking (ET)



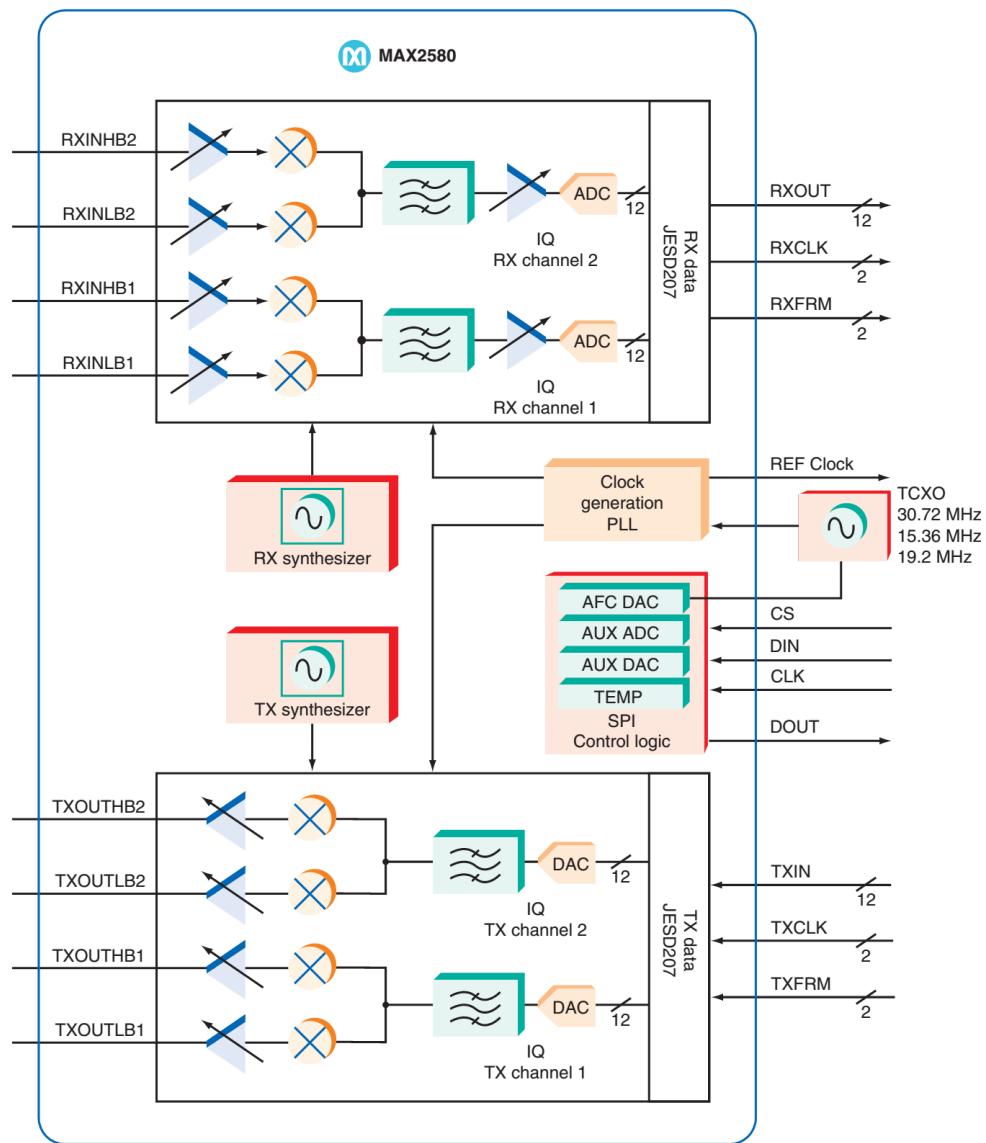
شکل ۱۹.۲۰: این بلوک دیاگرام کلی یک سلول کوچک نشان می‌دهد که اساساً یک پردازنده دیجیتالی باند پایه چند هسته‌ای است که به قسمت جلویی RF آنالوگ متشكل از فرستنده و گیرنده متصل است. پشتیبانی معمولاً از طریق اترنت انجام می‌شود.

پردازنده باند پایه سیگنال‌های دیجیتالی Q/I را برای فرستنده ایجاد می‌کند. اینها به مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ (DAC) در قسمت جلویی آنالوگ می‌روند که سیگنال‌های معادل آنالوگ را تولید می‌کنند. اینها به میکسرهای Q/I ارسال می‌شوند که یک مدولاتور را تشکیل می‌دهند. سپس خروجی مدولاتور به یک یا چند تقویت کننده قدرت (PA) و سپس به آنتن ارسال می‌شود.

پردازنده باند پایه دارای چندین CPU استاندارد و پردازنده سیگنال دیجیتالی (DSP) است و تمام مدولاسیون و دمودولاسیون و سایر فرآیندهای مرتبط با استانداردهای مختلف سلولی را انجام می‌دهد. O/I به پشتیبانی معمولاً توسط اترنت انجام می‌شود. برق از طریق اتصال برق از طریق اترنت (PoE) در صورت وجود یا توسط منبع دیگری می‌آید.

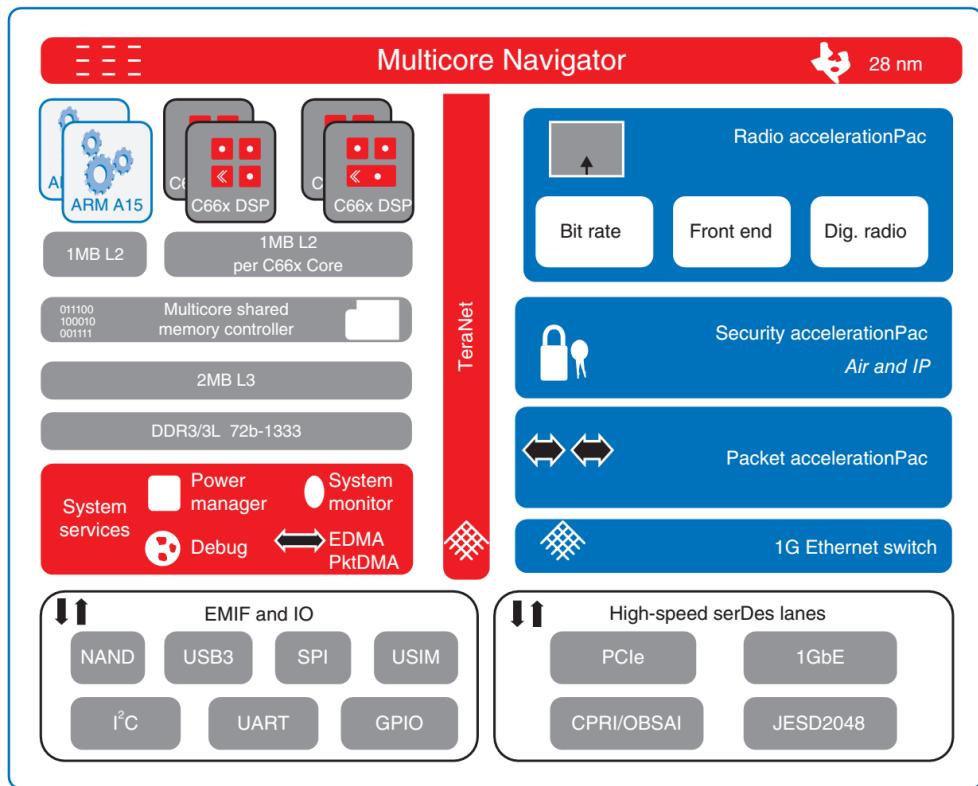
شکل (۲۰.۲۰) نمونه‌ای از قسمت جلویی آنالوگ تک تراشه را نشان می‌دهد. این MAX2580 توسط Maxim Integrated است. این شامل مدولاتور و دمودولاتور Q/I و همچنین سینتی‌سایزرها فرکانس N کسری آنها برای انتخاب کanal است. مدارهای چندگانه از 2×2 MIMO پشتیبانی می‌کنند. سینتی‌سایزرها تمام باندهای LTE ۱ تا ۴۱ را پوشش می‌دهند و پهنای باند را از $1/4$ مگاهرتز تا ۲۰ مگاهرتز انتخاب می‌کنند. DACها و ADCها روی تراشه قرار دارند. رابطهای دیجیتالی پردازنده باند پایه JESD207 هستند. بخش گیرنده حاوی LNAها است، اما در صورت لزوم می‌توان LNAهای خارجی اضافی اضافه کرد. تقویت‌کننده‌های خروجی فرستنده 0 dBm را ارائه می‌دهند. در صورت نیاز به توان بیشتر، تقویت‌کننده‌های توان خارجی را می‌توان اضافه کرد. Maxim طیف گسترده‌ای از مدارهای RF دیگر از جمله فرستنده گیرنده فمتول 3G MAX2550-MAX2553 را برای سیستم‌های CDMA می‌سازد.

کار باند پایه در یک ایستگاه پایه یا سلول کوچک توسط یک تراشه منفرد شامل چندین پردازنده، حافظه، مدارهای منطقی و مدارهای رابط پیاده‌سازی می‌شود. نمونه‌ای از Texas Instruments KeyStone است که این پردازنده‌ها حاوی ترکیبی از پردازنده‌های ARM A15 RISC و همچنین TCI6630K2L واحد معقولی TIs C66x DSP نشان داده شکل (۲۱.۲۰) است.



شکل ۲۰.۲۰: فرستنده و گیرنده RF Maxim Integrated MAX2580 دارای دو رادیو کامل برای اجرای MIMO 2×2 است.

شده است. این شامل دو هسته ARM و چهار DSP C66x است. همچنین دارای چندین شتاب دهنده منطقی برای سرعت بخشیدن به عملیات، به حداقل رساندن تعداد هسته‌ها و کاهش مصرف انرژی است. این تراشه همچنین شامل مدارهای دیجیتال جلویی مانند DUC/DDC/DPD/CFR است. چندین رابط شامل PCIe، JESD240B، SPI و USB و سوئیچ اترنت گیگابیتی است.



شکل ۲۱.۲۰: Texas Instruments TCi6630K2L یک پردازنده باند پایه کوچک سلولی با دو پردازنده ARM و چهار DSP C66x، به علاوه شتاب دهنده‌ها، اجزای دیجیتال جلویی و چندین رابط از جمله سوئیچ اترنت گیگابیتی است.

در نهایت، اکثر سلول‌های کوچک به طور کلی دارای Wi-Fi و GPS هستند. برق از Power over Ethernet (PoE) به علاوه ترکیبی از مبدل‌ها و تنظیم‌کننده‌های DC-DC تامین می‌شود. بیشتر انرژی توسط تقویت‌کننده‌های برق RF و SoC پردازنده باند پایه مصرف می‌شود.

زمان‌بندی و همگام‌سازی

یکی از نیازهای کلیدی تمام ایستگاه‌های پایه LTE، ماکرو یا سلول کوچک، زمان‌بندی و همگام‌سازی همه رادیوهای شبکه است. زمان‌بندی و همگام‌سازی برای دستیابی به مشخصات پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP)، سازمانی که استانداردهای LTE را ایجاد می‌کند، ضروری است. زمان‌بندی و همگام‌سازی‌ها با ارائه یک سیگنال ساعت فرمت شده به مدارهای رادیویی ایستگاه پایه انجام می‌شود. سپس از این سیگنال‌ها برای ایجاد اجزای فاز و فرکانس مدولاسیون LTE استفاده می‌شود. زمان‌بندی و هماهنگ‌سازی نیز برای هماهنگی مناسب انتقال و پشتیبانی ضروری است.

چندین روش زمان‌بندی و همگام‌سازی از جمله اترنت همزمان (SyncE) یا G.8262 توسط ITU و پروتکل زمان دقیق IEEE 1588-2008 (PTP) توسعه یافته‌اند. به نظر می‌رسد روش دوم ترجیح داده می‌شود، اما هر دو مورد استفاده قرار می‌گیرند. PTP را می‌توان با یک ساعت استاد بزرگ در قالب یک مهر زمان از طریق شبکه بسته تحويل داد. یک جایگزین، پروتکل زمان شبکه (NTP) است که برای همگام‌سازی ساعت با مقداری مرجع زمانی روی یک شبکه داده با تأخیر متغیر طراحی شده است.

الزامات زمان‌بندی برای پیاده‌سازی LTE در شبکه شدید است. دقت ساعت معمولی مورد نیاز ۱۶ قسمت در میلیارد (ppb) در شبکه حمل و نقل و ppb^{50} در رابط هوایی است. برای نسخه‌های TDD و پیشرفته LTE، نیازهای فاز نیز حیاتی هستند. علاوه بر این، روش پشتیبانی با انواع مختلف سلول‌های کوچک متفاوت خواهد بود. بسیاری از مایکروویو استفاده می‌کنند، برخی دیگر از فیبر استفاده می‌کنند و در خانه‌های femtos DSL یا تلویزیون کالبی بکه‌اول را فراهم می‌کنند. برای بهینه سازی عملکرد به طرح‌های زمان‌بندی متفاوتی نیاز است.

سلول‌های کوچک پیشرفته LTE همچنین دارای الزامات زمان‌بندی و همگام‌سازی دقیق برای پیاده‌سازی ویژگی‌های کلیدی هماهنگی تداخل بین سلولی پیشرفته (eICIC) و ارسال/دریافت چند نقطه هماهنگ (Comp) هستند که هر دو نوعی فناوری مدیریت تداخل مورد نیاز برای خودسازماندهی شبکه‌ها^{۴۶} (SON) هستند.

Wi-Fi

مفهوم تخلیه وای فای ساده است. این استفاده رسمی از نقاط دسترسی و نقاط دسترسی برای حمل داده‌های پرسرعت است که شبکه سلولی را از این بار رها می‌کند. از آنجایی که همه گوشی‌های هوشمند دارای وای فای هستند، می‌توان سیستمی ایجاد کرد که به طور خودکار وای فای را برای دانلود سریع انتخاب می‌کند، اگر یک نقطه داغ در نزدیکی باشد. در حالی که یک مشترک می‌تواند داوطلبانه با Wi-Fi به داده‌ها دسترسی پیدا کند، ممکن است از یک هات اسپات (نقطه داغ) قابل استفاده آگاه نباشد. با تخلیه سیستم سلولی، آن شبکه می‌تواند کاربران بیشتری را با نیازهای داده‌ای پرسرعت که نمی‌توان با Wi-Fi برطرف کرد، رسیدگی کند. امروزه، کاربران می‌توانند به طور خودکار شبکه را با جستجوی فعالانه یک هات اسپات موجود برای جلوگیری از هزینه استفاده از شبکه تلفن همراه، تخلیه کنند. در غیر این صورت، یک رویکرد حامل محور خودکار می‌تواند پیاده‌سازی شود تا زمانی که کاربر به دانلودی با حجم بالا دسترسی پیدا می‌کند، بارگذاری یکپارچه کار کند.

در حالی که راه حل نهایی این است که یک لایه زیرین سلولی کوچک برای افزایش ظرفیت و پوشش ایجاد کنید، Wi-Fi راه حلی فوری برای تقاضا برای دانلودهای سریعتر ارائه می‌دهد. از آنجایی که ترافیک پرسرعت مانند ویدیو سریعتر از آن چیزی است که اپراتورها می‌توانند یک سیستم سلول کوچک کامل را پیاده‌سازی کنند، رشد می‌کند، Wi-Fi راهی سریع و ارزان برای مقابله با این مشکل ارائه می‌دهد.

برای انجام این کار باید چند اتفاق بیفتند. اول، اپراتورهای تلفن همراه باید با ارائه دهنده‌گان Wi-Fi موجود در مناطق تحت پوشش خود شریک شوند. به طور متناسب، اپراتورهای تلفن همراه باید شبکه‌های Wi-Fi خود را بسازند. سیاری از آنها قبلًا شبکه‌های Wi-Fi خود را برای اطمینان از پوشش مطلوب ساخته‌اند. نصب شبکه‌های Wi-Fi به طور قابل توجهی کمتر از ایستگاه‌های پایه سلولی، از جمله سلول‌های کوچک است. و معمولاً سریعتر از اکثر شبکه‌های 4G هستند. به این

^{۴۶}Self Organizing Network (SON)

شبکه‌های Wi-Fi اپراتور تلفن همراه، شبکه‌های درجه یک حامل گفته می‌شود دوم، مکانیزمی برای شروع انتخاب خودکار Wi-Fi در مقابل شبکه تلفن همراه زمانی که مشترکی تلاش می‌کند به منبعی از ویدئو یا سایر داده‌های بزرگ دسترسی پیدا کند، مورد نیاز است. تلفن هوشمند یا تبلت مشترک به دنبال شبکه‌های موجود می‌گردد، سپس بهترین گزینه را انتخاب می‌کند که بیشتر از Wi-Fi در دسترس باشد. تخمین زده شده است که تا ۵۰ درصد از ترافیک داده‌های سلولی در نهایت به‌وای فای اختصاص می‌یابد و به اپراتورها زمان می‌دهد تا سلول‌های کوچک بیشتری را راه اندازی کنند، شبکه‌های LTE خود را گسترش دهند یا طیف جدیدی اضافه کنند و در عین حال هزینه‌های سرمایه‌ای^{۴۷} (CAPEX) را به حداقل برسانند.

مکانیزم این امر اکنون در قالب 2.0 اتحاد Hotspot و استاندارد IEEE 802.11u در دسترس است. اول، 802.11u یک پیشرفت نسبتاً جدید برای استانداردهای WLAN 802.11 است. Wi-Fi را قادر می‌سازد تا با شبکه‌های دیگر از جمله شبکه‌های تلفن همراه کار کند. این بهبود اساساً اتصال بین تلفن هوشمند، تبلت یا لپ‌تاپ به شبکه‌های Wi-Fi مختلف را خودکار می‌کند. این جایگزین فرآیند کشف نقاط نزدیک، وارد کردن رمزهای عبور، انجام احراز هویت و اتصال می‌شود. در مرحله بعد، 2.0 افروزدنی به استاندارد پایه است که از 802.11u برای خودکارسازی نقاط دسترسی، کشف، ثبت و تهییه و اتصال استفاده می‌کند. این نه تنها رومینگ بین هات اسپات‌ها را امکان پذیر می‌کند، بلکه مکانیزمی را برای پیوند به شبکه‌های سلولی برای انجام انتقال خودکار بین شبکه تلفن همراه و هات اسپات‌های Wi-Fi موجود فراهم می‌کند.

تقريباً تمام سلول‌های کوچک 3G/4G همچنین دارای Wi-Fi درجه یک حامل یا در یک محفظه یا در جعبه مجاور خواهند بود. علاوه بر این، مدل‌های جدیدتر تلفن همراه از 2.0/802.11u Hotspot استفاده می‌کنند تا عملکرد گزینه Offload را انجام دهند. و بدون شک اپراتورهای تلفن همراه استراتژی تخلیه بار را راهی برای خرید زمان می‌دانند تا زمانی که طیف بی‌سیم بیشتری در دسترس باشد یا منابع مالی برای بهدست آوردن آن در دسترس باشد. Wi-Fi در فصل بیست و یکم پوشش داده شده است.

Wi-Fi پشتیبانی

پشتیبانی نام اتصال یک سایت سلولی به شبکه اصلی است. ایستگاه‌های اصلی قدیمی‌تر از خطوط T1 یا T2 استفاده می‌کردند، اما امروزه اکثر BS ماکرو در ایالات متحده از کابل فیبر نوری استفاده می‌کنند. برخی در مناطق صعب العبورتر از پیوند(لینک) مایکروویو استفاده می‌کنند. البته فیبر ترجیح داده می‌شود، زیرا سریع و قابل اعتماد است. با این حال، نصب آن پرهزینه است زیرا نیاز به دسترسی به اموال، حفاری در زمین یا اجرازه استفاده از تیرهای برق دارد. مایکروویو به سادگی نقطه دید (LOS) و ارسال بی‌سیم است. این به این سرعت نیست، اما این محدودیت به تدریج با سیستم‌های جدید از بین می‌رود. با اکثر پیوندهای مایکروویو، ظرفیت داده تا یک گیگابیت بر ثانیه معمولاً در دسترس است.

بک هال(پشتیبانی) سلول‌های کوچک به احتمال زیاد ترکیبی از فیبر و بی‌سیم خواهد بود. اگر فیبر موجود و مقرر به صرفه باشد از آن استفاده می‌شود. در غیر این صورت، یک لینک بی‌سیم گزینه اصلی انتخابی خواهد بود.

بک هال سلول‌های کوچک گاهی اوقات مشکل خواهد بود. با سلول‌های کوچک روی پایه‌های لامپ، کناره‌های ساختمان‌ها و در مکان‌های عجیب و غریب، فیبر یا حتی برق متناسب ممکن است

^{۴۷}Capital Expenditures (CAPEX)

سخت باشد. پیوند بی‌سیم ممکن است تنها انتخاب باشد. و حتی این می‌تواند در شهرهای بزرگ با ساختمان‌های بلند و سایر سازه‌ها که اکثر مسیرهای بازگشت به شبکه اصلی را مسدود می‌کنند، چالش برانگیز باشد. ممکن است در برخی موارد از پیوندهای هاپ متعدد استفاده شود.



شکل ۲۲.۲۰: نمونه‌ای از واحدهای پشتیبانی سلول کوچک موجود است. این یکی رادیو، رابط‌ها و آتنن بشقاب را در یک واحد بسته بندی می‌کند و در فرکانس‌های باند مجاز استاندارد از ۶ تا ۴۴ گیگاهرتز در دسترس است. نرخ معمول داده یک گیگابیت در ثانیه در یک کانال اترنوت واحد است. از ۲۰۴۸ QAM استفاده می‌کند.

محبوب‌ترین فرکانس‌های بک‌هال بی‌سیم ۶، ۱۱، ۱۸ و ۲۳ گیگاهرتز هستند. استفاده از این فرکانس‌ها نیاز به مجوز دارد و تجهیزات معمولاً گران هستند. با این حال، باندهای بالقوه دیگر باند ۶۰ گیگاهرتز و باند ۷۰/۸۰ E گیگاهرتز هستند. باند ۸۰ گیگاهرتز نیز نیاز به مجوز دارد، اما باند ۶۰ گیگاهرتز نیازی به مجوز ندارد. باند ۶۰ گیگاهرتز (۵۷-۶۴ گیگاهرتز) یک باند صنعتی - علمی - پژوهشی (ISM) است که برای هر سرویسی باز است.

باندهای میلی‌متری بالای ۳۰ گیگاهرتز پهنه‌ای باند زیادی را برای پشتیبانی از نرخ داده بالاتر ارائه می‌دهند. دامنه آنها به شدت توسط فیزیک طول موج کوتاه آنها محدود شده است. با این حال، با آتنن‌های جهت‌دار با بهره بالا و قدرت بالاتر، برد می‌تواند تا چندین کیلومتر افزایش یابد. اخیراً FCC قوانین و مقررات قسمت ۱۵ را اصلاح کرده است تا امکان افزایش توان و آتنن در باند ۶۰ گیگاهرتز را فراهم کند تا برای بک‌هال سلول‌های کوچک مفیدتر باشد.

شکل (۲۲.۲۰) یک نوع واحد بک‌هال سلول کوچک را نشان می‌دهد. در کنار محفظه سلول کوچک نصب می‌شود.

شبکه‌های خودسازماندهی

شبکه‌های خودسازماندهی (SON) یک راه حل نرم افزاری برای مدیریت هستنت^{۴۸} است. در حالی

^{۴۸}(HetNet)

که تعامل بین ماکروسل‌ها معمولاً به صورت دستی مدیریت می‌شود، با چندین سلول کوچک، چنین کار دستی بسیار دشوار است. با SON، هتننت اساساً خود را مدیریت خواهد کرد. SON می‌تواند پیکربندی خودکار را انجام دهد و شبکه را به صورت پویا بر اساس بارهای ترافیکی بهینه کند. شبکه‌های خودسازماندهی را می‌توان بر اساس سه عملکرد اصلی خود دسته‌بندی کرد: خود پیکربندی، خود بهینه‌سازی و خود درمانی. تنظیمات خودکار به سیستمی اطلاق می‌شود که فرکانس سلول کوچک، سطح توان و رابط‌ها را به طور خودکار هنگام اضافه شدن به سیستم تنظیم می‌کند. این نرم افزار با نرم افزار روابط همسایگی خودکار^{۴۹} (ANR) کار می‌کند که فهرستی از تمام سلول‌های شبکه و مکان و ویژگی‌های فیزیکی هر کدام را ایجاد و نگهداری می‌کند. اگر سلول جدیدی اضافه شود، پیکربندی خودکار است و لیست به روز می‌شود. اگر یک سلول حذف شود، همین اتفاق می‌افتد. خود بهینه‌سازی به توانایی شبکه برای تطبیق خود با شرایط اطراف و بهینه‌سازی عملکرد خود بر اساس پوشش، ظرفیت، انتقال بین سلول‌ها و تداخل اشاره دارد. دو عملکرد کلیدی تعادل بار و کاهش تداخل است. متعادل‌سازی بار ترافیک بین سلول‌ها را تقسیم می‌کند به طوری که اگر سلول‌های مجاور در محدوده باشند و ظرفیت در دسترس داشته باشند، هیچ سلولی بیش از حد بارگذاری نمی‌شود. تعادل بار به طور خودکار انجام می‌شود. و این توانایی همچنین به تعادل بار ترافیک بکهال کمک می‌کند.

مدیریت تداخل در هتننت ضروری است زیرا سلول‌های کوچک معمولاً با یکدیگر فاصله دارند و به طور بالقوه می‌توانند با یکدیگر تداخل داشته باشند. نرم افزار SON از سلول‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های سلول‌های مجاور استفاده می‌کند تا تعیین کند که آیا تداخل وجود دارد یا خیر.

خوددرمانی به توانایی SON برای سازگاری با شرایط متغیر مانند شکست سلولی اشاره دارد. SON بخش کلیدی یک HetNet است و آن را در استاندارد LTE پیش بینی می‌کند. آزمایش‌های نشان داده‌اند که SON می‌تواند در برخی موارد شبکه را در عرض میلی ثانیه نظارت و به روزرسانی کند و به صورت پویا وفق دهد. توان کلی در بسیاری از موارد ۱۰ تا ۴۵ درصد قابل بهبود است.

سیستم‌های توزیع آنتن

بخش کلیدی جنبش HetNet سیستم‌های آنتن توزیع شده (DAS) است. DAS دقیقاً یک سلول کوچک نیست، اما تأثیر آن مشابه است زیرا پوشش و عملکرد بهتری را در یک منطقه خاص ارائه می‌دهد. کاری که یک DAS انجام می‌دهد این است که با توزیع سیگنال در یک منطقه وسیع تر با استفاده از شبکه‌ای از آنتن‌ها، پوشش را در یک ایستگاه پایه معین گسترش می‌دهد. DAS برای بهبود پوشش در ساختمان‌های اداری چند طبقه، استادیوم‌ها، هتل‌ها، مراکز خرید، فروگاه‌ها، متروها و همچنین تونل‌ها و جاده‌ها مفید است. آنها را می‌توان در داخل یا خارج از خانه استفاده کرد، اگرچه پوشش داخلی بیشتر رایج است.

یک سیستم DAS اساساً با یک یا چند ایستگاه پایه ماکرو موجود یا از طریق اتصال مستقیم یا از طریق یک پیوند بی‌سیم اتصال برقرار می‌کند. سپس این سرویس را روی کابل فیبر نوری یا کابل کواکس یا ترکیبی توزیع می‌کند. به طور معمول واحد متصل به ایستگاه پایه شامل یک تکرار کننده یا کنترل کننده است که سیگنال RF را تقویت و آن را به سیگنال نوری تبدیل و توسط کابل‌های فیبر نوری به مناطق مختلف در منطقه تحت پوشش ارسال می‌کند. فیبر به جعبه‌های توزیع متصل می‌شود که سیگنال‌های نوری را به RF برای توزیع کابل هم‌محور به مجموعه‌ای از آنتن‌ها تبدیل می‌کند. این آنتن‌ها باید با چندین طول موج از یکدیگر جدا شوند تا موثر باشند. آرایه اساساً توان ارسالی را بین

^{۴۹} Automatic Neighbor Relations (ANR)

آنتن‌ها تقسیم می‌کند. DAS به طور موثر مناطق مرده ناشی از تضعیف عظیم را با فاصله و از طریق دیوارها و سقف و سایر موانع حذف می‌کند. این ارتباط مستقیم‌تری با تلفن همراه یا سایر دستگاه‌های کاربر فراهم می‌کند.

DAS ممکن است منفعل یا فعال باشد. سیستم‌های غیرفعال ساده‌ترین هستند و از ترکیبی از فیلتر، اسپلیتر و کوپلر برای توزیع سیگنال‌ها استفاده می‌کنند. سیستم فعال از تقویت کننده‌ها و تکرار کننده‌ها برای افزایش سطح سیگنال استفاده می‌کند.

DAS معمولاً به جای حامل سلولی، مانند سایر سلول‌های کوچک، متعلق به مالک تأسیسات است. توافقنامه توزیع با شرکت حمل و نقل ضروری است. DAS ممکن است خاص حامل یا عمومی برای کنترل هر سیگنال 2G/3G/4G Wi-Fi باشد. برخی از DAS‌ها نیز کار می‌کنند.

سؤالات:

۱. وقتی از اصطلاح بی‌سیم استفاده می‌شود به چه فناوری ارتباطی کلیدی اشاره می‌شود؟
۲. آخرین نسل از فناوری تلفن همراه در حال حاضر چیست؟
۳. دو باند فرکانسی اصلی مورد استفاده برای تلفن‌های همراه در ایران را نام ببرید.
۴. چه مشخصه اولیه محدوده پوشش سایت سلولی را تعیین می‌کند؟
۵. کدام بخش از طیف فرکانس بیشتر توسط صنعت سلولی استفاده می‌شود؟ محدوده‌های بالا و پایین تقریبی را بیان کنید.
۶. نام روش‌های دسترسی مورد استفاده در سیستم‌های سلولی.
۷. درست یا غلط؟ رادیوهای تلفن همراه تمام دوبلکس کار می‌کنند.
۸. درست یا غلط؟ اندازه مناطق تحت پوشش سایت سلولی همگی یکسان نیستند.
۹. چهار حامل اصلی سلولی ایران را نام ببرید.
۱۰. درست یا غلط؟ تعداد مشترکین تلفن سیمی بیشتر از مشترکین تلفن همراه است.
۱۱. چه چالش عمده اپراتورها را از افزایش ظرفیت و سرعت داده خود باز می‌دارد؟
۱۲. کدام یک از کاربردها باعث افزایش نرخ داده‌های سلولی شده است؟
۱۳. فناوری رادیویی اولیه گوشی‌های 3G چیست؟
۱۴. کدام نوع دوبلکس پرکاربردتر است؟
۱۵. چه مداری در تلفن همراه به فرستنده و گیرنده اجازه می‌دهد تا یک آنتن را به اشتراک بگذارند؟
۱۶. مزیت TDD نسبت به FDD چیست؟
۱۷. رابطه بین سرعت داده و پهنای باند را همانطور که در سیستم سلولی اعمال می‌شود بیان کنید.

۱۸. چه تکنیکی به چندین ایستگاه پایه اجازه می‌دهد تا یک کانال مشترک را به اشتراک بگذارند؟
۱۹. وکودر (Vocoder) چیست؟
۲۰. دو سیستم تلفن همراه دیجیتالی 2G اولیه را که در سراسر جهان استفاده می‌شوند، فهرست کنید.
کدام پر کاربرد ترین است؟
۲۱. دو عملکرد اصلی وکودر را نام ببرید.
۲۲. برای تعیین بازده طیفی طرح مدولاسیون از چه واحد اندازه‌گیری استفاده می‌شود؟
۲۳. پهنه‌ای باند یک کانال GSM چقدر است؟
۲۴. چند کاربر می‌توانند یک کانال را در GSM به اشتراک بگذارند؟
۲۵. درست یا غلط؟ GSM از TDMA استفاده می‌کند.
۲۶. چه مدولاسیونی در GSM استفاده می‌شود؟
۲۷. چه نوع دسترسی چند کاربره در IS-95 CDMA و WCDMA موجود است؟
۲۸. پهنه‌ای باند یک کانال معمولی CDMA و WCDMA چقدر است؟ حداکثر تعداد مشترکینی که می‌توانند از کانال استفاده کنند را ذکر کنید.
۲۹. چه ویژگی CDMA برای موفقیت آن در دریافت بسیار مهم است؟
۳۰. CDMA با چه روشی کانالیزه می‌شود؟
۳۱. چه دو معماری گیرنده در اکثر تلفن‌های همراه مدرن 2G رایج است؟ بیان کنید که چرا آنها بر معماری‌های ابرهترودانی قدیمی تر ترجیح داده می‌شوند.
۳۲. چرا از مدار Q/I در تلفن‌های همراه استفاده می‌شود؟
۳۳. چهار عملکرد را که معمولاً توسط یک تراشه DSP در قسمت باند پایه یک تلفن همراه انجام می‌شود، فهرست کنید.
۳۴. مبدل‌های A/D در اکثر گیرندها در چه نقطه‌ای قرار می‌گیرند؟
۳۵. ساختار اصلی آنتن یک ایستگاه پایه سایت سلولی معمولی را شرح دهید.
۳۶. الگوی تشعشع آنتن را شرح دهید و توضیح دهید که چگونه بهبخش بندی اجازه می‌دهد.
۳۷. چگونه آنتن اجازه استفاده مجدد از فرکانس را می‌دهد؟
۳۸. چه نوع تقویت کننده‌هایی در ایستگاه‌های پایه استفاده می‌شود؟ سطح قدرت آنها چقدر است؟
۳۹. چرا خطی بودن تقویت کننده توان بسیار مهم است؟
۴۰. آیا CDMA2000 یک فناوری 2G است یا 3G توضیح دهید. چه کسی آن را توسعه داد؟

۴۱. سریع‌ترین نسخه‌های CDMA2000 چه نام دارند؟ حداکثر نرخ داده آنها چقدر است؟
۴۲. فناوری را نام ببرید که WCDMA را سریعتر می‌کند. چه روش‌های مدولاسیون استفاده می‌شود؟
۴۳. درست یا غلط؟ یک گوشی 3G می‌تواند با ایستگاه پایه CDMA2000 ارتباط برقرار کند.
۴۴. حداکثر نرخ داده رایج‌ترین شکل HSPA چقدر است و از چه مدولاسیونی استفاده می‌شود؟
۴۵. اپراتورهای ایالات متحده که از WCDMA/HSPA و GSM/GPRS/EDGE استفاده می‌کنند نام ببرید.
۴۶. اپراتورهای ایالات متحده که از CDMA2000 استفاده می‌کنند را نام ببرید.
۴۷. چه فناوری آنتنی باعث افزایش رشد مشترکین در ایستگاه‌های پایه موجود می‌شود؟
۴۸. نام آخرین فناوری تلفن همراه که با نام 4G به بازار عرضه می‌شود چیست؟
۴۹. چه روش‌های مدولاسیونی در تلفن‌های همراه 4G استفاده می‌شود؟
۵۰. اصطلاح مسدود کردن منبع را تعریف کنید و مشخصات آن را بیان کنید.
۵۱. آیا از LTE یا FDD استفاده می‌کند؟
۵۲. آیا یک تلفن LTE از T&AT در شبکه Verizon کار می‌کند؟ توضیح دهید.
۵۳. حداکثر پهنای باند کانال LTE چقدر است؟ چه پهنای باند دیگری محبوب هستند؟
۵۴. چه ویژگی LTE مشکلات چند مسیری و شیفت دابلر را جبران می‌کند؟
۵۵. حداکثر پیکر بندی MIMO برای LTE چقدر است؟ برای LTE-A چیست؟
۵۶. چه چیزی مخفی سازی MIMO را در تلفن هوشمند محدود می‌کند؟ حداکثر عملی چیست؟
۵۷. حداکثر نرخ داده LTE تقریباً چقدر است؟ چه نرخی معمولی‌تر است؟
۵۸. چه روش دسترسی با LTE استفاده می‌شود؟ چگونه کار می‌کند؟
۵۹. LTE-Advanced چگونه نرخ داده را تا یک گیگابیت بر ثانیه پیاده‌سازی می‌کند؟
۶۰. هد (سر) رادیویی از راه دور چیست؟ مزایای آن چیست؟
۶۱. آیا گوشی‌های LTE دارای فناوری 3G یا 2G هستند؟
۶۲. حداقل پنج رادیو مختلف مورد استفاده در تلفن‌های هوشمند را فهرست کنید.
۶۳. تماس‌های صوتی در تلفن‌های همراه معمولی 3G یا 4G چگونه انجام می‌شود؟
۶۴. تماس‌های صوتی در LTE چگونه انجام می‌شود؟

۶۵. هت نت چیست؟
۶۶. چهار اندازه اصلی سلولهای کوچک و کاتیونهای آنها را نام ببرید.
۶۷. ماکروسیل چیست؟
۶۸. سلولهای کوچک چگونه شبکه سلولی را بهبود میبخشند؟
۶۹. چه تکنیکهایی سلولهای کوچک را امکان پذیر میکند؟
۷۰. بک هال چیست؟ رایج‌ترین انواع آن کدامند؟
۷۱. تخلیه وای فای چیست و چرا مفید است؟
۷۲. جایگزینی برای مجموعه‌ای از سلولهای کوچک برای بهبود پوشش سلولی چیست؟
۷۳. انتظار می‌رود سه ویزگی یا مشخصات فنی اساسی فناوری سلولی ۵G چه باشد؟
- مسائل:**
-
۱. راندمان طیفی مدولاسیون را محاسبه کنید که نرخ داده $2/4$ مگابیت بر ثانیه در پهنهای باند $1/5$ مگاهرتز می‌دهد.
 ۲. بدون هیچ روش مدولاسیون خاصی، تقریباً چه پهنهای باندی برای انتقال سرعت داده $1/2$ مگابیت بر ثانیه لازم است؟
 ۳. چند کanal GSM می‌تواند در طیف شکل (۴.۲۰)(ب) وجود داشته باشد؟
 ۴. چند منبع LTE را در یک کanal 20 مگاهرتز مسدود می‌کند؟
 ۵. پهنهای باند یک زیر حامل LTE چقدر است؟
 ۶. حداکثر تعداد کاربران روی فرمتوسل چقدر است؟

فصل ۲۱

فناوری‌های بی‌سیم

raig ترین فناوری بی‌سیم مربوط به تلفن‌های همراه است که در فصل بیستم توضیح داده شد. با این حال، امروزه سیستم‌ها و کاربردهای بی‌سیم بسیار بیشتری وجود دارد که مورد استفاده قرار می‌گیرند. اینها عمدتاً سیستم‌های کوتاه بردی هستند که بسته به کاربرد، بردی از چند اینچ تا چندین مایل دارند. این فصل کاربردهای گسترده‌تری از این سیستم‌های مطلوب را شرح می‌دهد. هر کدام به طور کلی توسط یک استاندارد صنعتی خاص تعریف می‌شوند و با یک یا حداقل چند کاربرد شناخته شده شناسایی می‌شوند. این فناوری‌های محبوب و کاربردهای اصلی آنها در جدول زیر خلاصه شده است. توجه داشته باشید که هر فناوری با نام تجاری یا نام استاندارد آن، نام مشترک یا شماره استاندارد IEEE مشخص می‌شود. در شکل (۲۱)، فناوری‌ها با نرخ داده و محدوده (برد) مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌کنید، برخی از فناوری‌ها در پوشش خود همپوشانی دارند. یک سیستم بی‌سیم وجود دارد که تقریباً هر نیازی را برآورده م کند.

کاربردهای اولیه

فناوری‌های بی‌سیم

شبکه اترنت بی‌سیم	Wi-Fi 802.11
بی‌سیم برد کوتاه در درجه اول برای صدا	بلوتوث
نظارت و کنترل خانگی/صنعتی	ZigBee 802.15.4
سرعت بالا و برد کوتاه برای تجهیزات	عرض باند فوق العاده (UWB)
جانبی کامپیوتر و اتصالات ویدئویی
بی‌سیم پهن باند MAN	WiMAX 802.16
بارکد بی‌سیم برای ریدیابی و شناسه	شناسه فرکانس رادیویی (RFID)
برد بسیار کوتاه برای کارت‌های	ارتباطات میدان نزدیک (NFC)
هوشمند و شناسه
تله متري و کنترل برد کوتاه بدون	پژوهشی علمی صنعتی (ISM)
مجوز با کاربرد مختلف
بی‌سیم نوری برای کنترل و داده	مادون قرمز (IR)
تله متري و کنترل بی‌سیم و دسترسی به اینترنت؟	رادیو فضای سفید

بخش‌های بعدی هر یک از این فناوری‌ها را با جزئیات بیشتری توضیح می‌دهند.
اهداف:

بعداز تکمیل این فصل، شما می‌توانید:

■ شبکه منطقه شخصی (PAN) و شبکه محلی بی‌سیم (WLAN) را تعریف کنید.

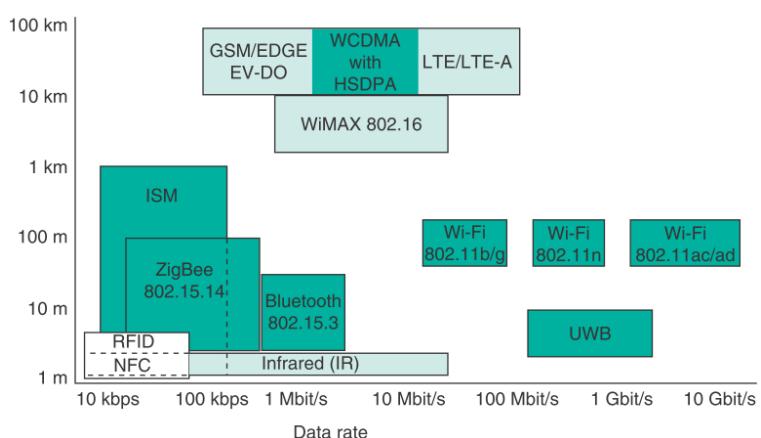
■ دو فناوری محبوب PAN را نام ببرید.

■ ویژگی‌ها، مزايا، کاربردها و عملکرد فناوری‌های بی‌سیم WiMAX، ZigBee، Wi-Fi، بلوتوث، WiMAX، و باند فوق‌واسیع (UWB) را شناسایی کنید.

■ عملکرد و کاربردهای فناوری‌های بی‌سیم NFC، RFID و IR را توضیح دهید.

■ رادیو فضای سفید را توضیح دهید.

■ اینترنت اشیا (IoT) و بی‌سیم ماشین به‌ماشین (M2M) را تعریف کنید.



شکل ۱.۲۱: محدوده (برد) در مقابل سرعت داده: فناوری‌های رایج بی‌سیم

۱.۲۱ شبکه‌های محلی بی‌سیم

شبکه‌های محلی بی‌سیم بیشتر با نام تجاری Wi-Fi^۱ شناخته می‌شوند. در این متن از اصطلاحات WLAN، Wi-Fi و ۸۰۲.۱۱ استفاده شده است. شبکه‌های محلی (LAN) در یک شرکت، سازمان دولتی، بیمارستان یا سازمان‌های دیگر معمولاً از یک زوج سیم پیچ خورده بدون محافظ CAT5 یا CAT6 به عنوان محیط انتقال استفاده می‌کنند. با این حال، افزونه‌های بی‌سیم برای این شبکه‌های محلی بیشتر و بیشتر شده و مانند شبکه‌های محلی کاملاً بی‌سیم مطلوب می‌شوند. مودم‌های بی‌سیم

^۱Wireless Fidelity

ارزان قیمت نصب شده در کامپیوترهای شخصی و لپ‌تاپ‌ها این امکان را فراهم می‌کند. سه پیکربندی رایج در شکل (۲.۲۱) نشان داده شده است. شکل (۲.۲۱)(الف) نشان می‌دهد که یک نقطه دسترسی بی‌سیم^۲ (AP) به یک LAN سیمی موجود، معمولاً از طریق یک سوئیچ اترنت متصل است. این AP شامل یک فرستنده گیرنده است که می‌تواند یک منطقه جغرافیایی خاص، معمولاً در داخل یک ساختمان را پوشش دهد. این منطقه معمولاً بیش از ۱۰۰ متر گسترش نمی‌یابد، اما به طور کلی به دلیل تضعیف سیگنال زیاد دیوارها، سقف‌ها، کف‌ها و سایر موائع، برد کمتر است. کامپیوترهای شخصی یا لپ‌تاپ‌ها در آن محدوده و حاوی مودم رادیویی می‌توانند به AP متصل شوند، که به نوبه خود کامپیوتر یا لپ‌تاپ را به شبکه اصلی LAN و هر سرویسی که عموماً از طریق آن LAN در دسترس است، مانند ایمیل و دسترسی به اینترنت، متصل می‌کند.

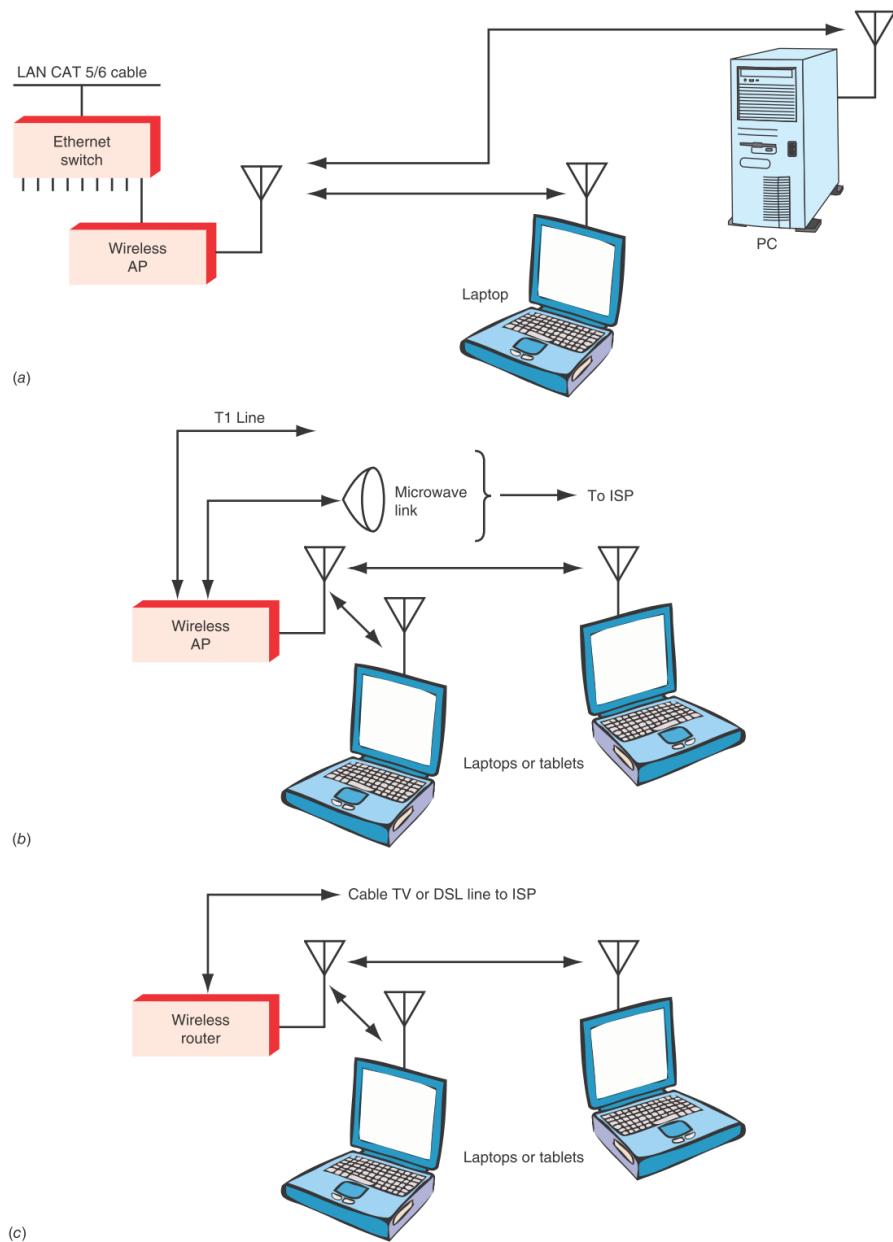
یکی دیگر از پیکربندی‌های معروف در شکل (۲.۲۱)(ب) نشان داده شده است. در اینجا AP به LAN اصلی یا معمولاً به یک ارائه دهنده خدمات اینترنت (ISP) از طریق یک اتصال دوربرد مانند یک خط T3 یا T1 سیم کشی شده، اتصال فیبر، یا یک پیوند رله مایکروویو مانند وایمکس متصل شده و در ادامه این فصل شرح داده شده است. AP معمولاً در رستوران، کافی شاپ، فرودگاه، هتل، مرکز همایش یا سایر مکان‌های عمومی نصب می‌شود. بیشتر به عنوان "نقطه داغ" شناخته می‌شود. برخی شهرها نیز در حال نصب نقاط داغ شهری هستند. هر کسی که لپ‌تاپ مجهز به رابط مودم LAN داشته باشد می‌تواند به AP پیوند داده و به ایمیل یا اینترنت خود دسترسی داشته باشد. صدها هزار نقطه داغ در سراسر جهان وجود دارد.

چیزی که LAN بی‌سیم را بسیار جذاب می‌کند این است که انعطاف پذیری، راحتی و هزینه کمتر را ارائه می‌دهد. برای افروzen یک گره به یک شبکه LAN سیمی موجود، مشکل اصلی سیم کشی جدید است. اگر چنین سیم کشی قبلاً در محل قرار نگرفته باشد، کشیدن کابل‌ها از طریق دیوارها و سقف‌ها و نصب کانکتورها زمان بر و پرهزینه است. جایگایی کامپیوترها در داخل ساختمان به دلیل پیکربندی مجدد دفتر یک مشکل و هزینه بزرگ است مگر اینکه سیم کشی موجود قابل استفاده مجدد باشد. با استفاده از یک پسوند بی‌سیم، چنین مشکلاتی اساساً ناپدید می‌شوند. هر کامپیوتری را می‌توان در هر نقطه جدید به سرعت و به راحتی بدون هزینه اضافی قرار داد. تا زمانی که کامپیوتر در محدوده AP باشد، اتصال خود کار است. بی‌سیم یک راه عالی برای گسترش شبکه موجود است.

شبکه‌های محلی بی‌سیم همچنین نیاز مستمر ما به موبایل بیشتر در مشاغل و فعالیت‌های ایمان را تأمین می‌کند. تلفن همراه به‌ما این آزادی را داده است که بتوانیم ارتباطات را در هر مکان، در هر زمان و تقریباً در هر مکان حفظ کنیم. شبکه LAN بی‌سیم همچنین همان قابلیت حمل را برای کامپیوترهای ایمان، عمدهاً لپ‌تاپ‌ها، به‌ما می‌دهد، که اساساً تبدیل به فاکتور واقعی کامپیوتر شخصی شده‌اند. در یک سازمان، کاربر می‌تواند لپ‌تاپ خود را برای یک جلسه به‌اتاق کنفرانس، به‌دفتر همکار یا برای صرف ناهار به کافه تریا ببرد. و با وجود تمام نقاط داغ موجود، می‌توانیم از لپ‌تاپ‌های ایمان تقریباً در همه جا استفاده کنیم، مخصوصاً وقتی در سفر هستیم.

یکی دیگر از کاربردهای رو به رشد شبکه‌های محلی بی‌سیم در پیاده‌سازی شبکه‌های خانگی است، شکل (۲.۲۱)(ج). از آنجایی که خانواده‌های بیشتری از کامپیوترهای شخصی، تبلت‌ها و تلفن‌های هوشمند متعدد استفاده می‌کنند، نیاز به اتصال هر دستگاه به یک اتصال اینترنت پهن باند مانند DSL یا خط تلویزیون کابلی وجود دارد. این اجازه می‌دهد تا هر کاربر به‌ایمیل یا اینترنت دسترسی داشته باشد یا یک دستگاه جانبی مشترک مانند چاپگر را به‌اشتراک بگذارد. اکثر صاحبان خانه‌ها نمی‌خواهند

^۲ Access Point (AP)



شکل ۲.۲۱: انواع WLAN (الف) پسوند نقطه دسترسی به شبکه LAN سیمی، (ب) نقطه دسترسی عمومی از طریق یک ارائه دهنده خدمات اینترنت (ISP) و (ج) روتر خانگی برای دسترسی به اینترنت.

خانه‌های خود را با کابل 6/CAT5 با هزینه زیاد سیم کشی کنند. نصب LAN بی‌سیم این روزها سریع، آسان و بسیار ارزان است. جعبه مخصوصی بهنام دروازه مسکونی یا روتر بی‌سیم به تلویزیون کابلی یا DSL متصل می‌شود و به عنوان نقطه دسترسی عمل می‌کند. این دروازه یا روتر از یک رویکرد نرم‌افزاری بهنام انتقال آدرس شبکه (NAT) استفاده می‌کند تا به نظر برسد که هر کامپیوتر شخصی شبکه‌ای آدرس اینترنتی خود را دارد، در حالی که در واقعیت تنها آدرس مرتبط با خط پهن باند ورودی استفاده می‌شود.

سخت افزار شبکه‌های محلی بی‌سیم

دستگاه‌های سخت افزاری در یک شبکه محلی بی‌سیم، نقطه دسترسی یا دروازه/روتر و مودم‌های رادیویی در کامپیوترهای شخصی هستند. نقطه دسترسی فقط یک جعبه حاوی یک فرستنده گیرنده است که از طریق سیم کشی CAT5/6 به شبکه محلی موجود متصل می‌شود. معمولاً توان عملیاتی خود را از طریق کابل کشی زوج سیم تابیده دریافت می‌کند، زیرا ولتاژ منبع تغذیه dc روی داده‌ها قرار می‌گیرد. استاندارد IEEE 802.3af مربوط به تجهیز برق dc از طریق کابل شبکه به عنوان Power over Ethernet (PoE) نمی‌باشد. AP معمولاً بر روی دیوار یا سقف نصب می‌شود تا پوشش خوبی به یک منطقه خاص بدهد. آتن ممکن است در جعبه تعبیه شده باشد یا ممکن است یک آرایه جداگانه باشد که جهت‌گیری را به AP می‌دهد تا از پوشش ناحیه مورد نظر و حداقل تداخل با سایر WLAN‌های مجاور اطمینان حاصل کند.

در یک شبکه خانگی، دروازه یا روتر برای اتصال به مودم DSL یا تلویزیون کابلی با کابل 6/CAT5 طراحی شده است. اغلب از طریق کابل به‌کمی از کامپیوترهای شخصی در شبکه خانگی متصل می‌شود. سایر کامپیوترهای شخصی به صورت بی‌سیم به دروازه/روتر متصل می‌شوند.

مودم‌های رادیویی برای هر کامپیوتر شخصی اشکال مختلفی دارند. همه فرستنده گیرنده‌ها با یک آتن همراه هستند. فرستنده‌ها معمولاً در اکثر سیستم‌های جدیدتر یک تراشه هستند. در سیستم‌های قدیمی‌تر، مودم روی یک کارت پلاگین برای گذرگاه PC/PCI قرار دارد. امروزه استفاده از مودم رادیویی در مادربرد کامپیوتر شخصی رایج‌تر است.

برای لپ‌تاپ و تبلت، مودم تعبیه شده است، بنابراین نیازی به نصب خاصی نیست.

استانداردهای شبکه‌های محلی بی‌سیم

در طول سال‌ها، تعدادی از روش‌های LAN بی‌سیم توسعه یافته، آزمایش شده و کنار گذاشته شده‌اند. یک استاندارد به عنوان منعطف‌ترین، مقرر به صرفه‌ترین و قابل اعتمادترین استاندارد ظاهر شده است. این استاندارد که به عنوان استاندارد IEEE 802.11 شناخته می‌شود، در اشکال مختلف برای نیازهای مختلف موجود است. جدول نسخه‌های مختلف استاندارد و برخی جزئیات فنی را نشان می‌دهد.

IEEE Standard	Frequency, GHz	Access	Max. Data Rate, Mbps	Max. Range, m
802.11a	5	OFDM	54	50
802.11b	2.4	DSSS	11	100
802.11g	2.4	OFDM	54	100
802.11n	2.4/5	OFDM/MIMO	600	100
802.11ac	5	OFDM/MIMO	1.3	50–100
802.11ad	60	OFDM/beamforming	7	10

خوب است بدانید که:

موسسه مهندسین برق و الکترونیک (IEEE) استانداردهای بی‌سیم را برای *WLAN* تعیین می‌کند، اما *Wi-Fi Alliance* از قابلیت همکاری تراشه‌ها، مازول‌ها، نقاط دسترسی و سایر محصولات پشتیبانی، ترویج، آزمایش و گواهی می‌کند. اتحاد همچنین پیشرفت‌هایی را در استانداردها ایجاد می‌کند. علامت *Wi-Fi* تجاری رسمی استاندارد ۸۰۲.۱۱ است.

IEEE 802.11b : اولین نسخه مفید و رایج‌ترین نسخه استاندارد ۸۰۲.۱۱b ۸۰۲.۱۱ است. در ۱۱ کanal در باند ISM بدون مجوز ۲/۴ گیگاهرتز کار می‌کند. این باند از ۲/۴۸۳۵ تا ۲/۴۲۳۵ مگاهرتز برای کل پهنه‌ای باند ۸۳/۵ مگاهرتز گسترش می‌یابد. فرکانس‌های مرکزی هر کanal در زیر آورده شده است. توجه داشته باشید که کanal‌ها با فاصله ۵ مگاهرتز از هم در طول طیف قرار دارند. با این حال،

Channel	Center Frequency, GHz
1	2.412
2	2.417
3	2.422
4	2.427
5	2.432
6	2.437
7	2.442
8	2.447
9	2.452
10	2.457
11	2.462

عرض هر کanal ۲۲ مگاهرتز است به‌طوری که کanal‌ها همپوشانی دارند. هر AP مشخصی از یکی از این کanal‌ها استفاده می‌کند. روش دسترسی، طیف گسترده توالی مستقیم^۳ (DSSS) است به‌طوری که سیگنال‌های متعدد ممکن است باند یکسانی را به‌اشتراك بگذارند. تخصیص کanal در امکاناتی که چندین WLAN وجود دارد بسیار مهم است، به‌طوری که تداخل به‌حداقل می‌رسد.

استاندارد ۸۰۲.۱۱b دارای حداکثر سرعت داده تا ۱۱ مگابیت در ثانیه است. این نرخ تنها در شرایط مساعد مسیر مانند حداقل برد و حداقل نویز به‌دست می‌آید. افزایش دامنه یا نویز باعث می‌شود که نرخ به‌طور خودکار به $\frac{5}{5}$ یا ۱ مگابیت بر ثانیه کاهش یابد. این به‌اطمینان از اتصال قابل اعتماد با وجود سرعت پایین کمک می‌کند. در نرخ‌های ۱ و ۲ مگابیت بر ثانیه، سیگنال داده سریال با یک کد ۱۱ بیتی به‌نام کد Barker برای تولید سیگنال DSSS XOR می‌شود. این دنباله بیت خاص دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی است که دریافت و رمزگشایی آن را آسان می‌کند. دنباله بارکر ۱۰۱۱۰۰۱۱۰۰۰ است. هر بیت داده سریال با این کد XOR شده است. برای مدولاسیون، ۱ مگابیت در ثانیه با DBPSK می‌آید. برای ۲ مگابیت بر ثانیه، مدولاسیون DQPSK است.

^۳Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

برای دستیابی به نرخ‌های سریعتر ۵/۵ و ۱۱ مگابیت در ثانیه، از شکل متفاوتی از کدگذاری بهنام کلیدزنی کد مکمل^۴ (CCK) استفاده می‌شود. سپس سیگنال داده سریال با استفاده از یکی از ۶۴ کد هشت بیتی برای نمایش ۶ بیت از سیگنال داده سریال اصلاح می‌شود. بیت‌های رمزگذاری شده تراشه‌ها هستند. مدولاسیون عبارت است از کلید زنی دیفرانسیل تغییر فاز چهارگانه (DQPSK). چهار تراشه در هر دنباله ۶ بیتی برای دستیابی به نرخ ۵/۵ مگابیت بر ثانیه استفاده می‌شود. استفاده از CCK تا حد زیادی عملکرد سیگنال را در شرایط نویز و چند مسیری بهبود می‌بخشد زیرا کدهای منحصر به‌فرد دارای ویژگی‌هایی هستند که شناسایی و رمزگشایی آنها را در شرایط نامطلوب آسان می‌کند.

هنگامی که شرایط بین AP و گره بی‌سیم به‌دلیل افزایش فاصله، نویز یا تعداد موائع کاهش می‌یابد، فرستنده گیرنده به‌طور خودکار با تنظیم نرخ داده به‌سمت پایین، به‌طور خودکار با شرایط در حال تغییر تنظیم می‌شود، یعنی ابتدا با استفاده از DQPSK/CCK به سرعت ۵/۵ مگابیت در ثانیه، سپس به ۲ مگابیت در ثانیه با استفاده از DQPSK به‌نهایی و سپس به ۱ مگابیت در ثانیه با استفاده از DBPSK. حداکثر توان تابشی معادل همسانگرد مجاز^۵ (EIRP) ۱ وات است. اکثر فرستنده‌های آی‌سی خروجی ۱۰۰ میلی وات تولید می‌کنند. تا زمانی که توان خروجی به‌اضافه بهره آتن کمتر از EIRP ۱ – W مجاز باشد، می‌توان از آتن‌های بهره‌ای استفاده کرد. انواع لوازم جانبی تقویت کننده قدرت و آتن‌ها به‌صورت تجاری برای سفارشی کردن هر شبکه محلی موجود است.

محدوده کلی به‌شرایط محیطی بستگی دارد. در داخل خانه برد معمولاً کمتر از ۱۰۰ فوت در ۱۱ مگابیت بر ثانیه است. سرعت آن در حدود ۳۰۰ فوت به ۱ مگابیت در ثانیه کاهش می‌یابد. در فضای باز با دید واضح و حداکثر EIRP، می‌توان به‌بردی تا ۸ کیلومتر (حدود ۱۲ مایل) دست یافت.

IEEE 802.11a : استاندارد 802.11a در مرحله بعد توسعه یافت. از باند بدون مجوز ۵ گیگاهرتز استفاده می‌کند. سه بخش مجاز وجود دارد: ۱/۵ تا ۵/۲۵ گیگاهرتز با حداکثر توان ۵۰ میلی‌وات، ۵/۲۵ تا ۵/۳۵ گیگاهرتز با حداکثر توان ۲۵۰ میلی‌وات و ۵/۷۲۵ تا ۵/۸۲۵ گیگاهرتز با حداکثر توان ۱۰۰ میلی‌وات. هر یک از این باندها به‌چندین کانال غیر همپوشانی با پهنای ۲۰ مگاهرتز تقسیم می‌شوند. هر کانال برای حمل یک سیگنال OFDM مشکل از ۵۲ زیر حامل، ۴۸ برای داده و ۴ دیگر برای کدهای تصحیح خطأ طراحی شده است. هر یک از حامل‌های فرعی حدود ۳۰۰ کیلوهرتز عرض دارد.

همانند استاندارد 802.11b، نسخه 802.11a نیز از طیف وسیعی از نرخ‌های داده پشتیبانی می‌کند. سریعترین آنها ۵۴ مگابیت بر ثانیه است. سایر نرخ‌های بازگشته معمولاً شامل ۴۸، ۱۸، ۱۲، ۳۶، ۹ و ۶ مگابیت بر ثانیه است. هر کدام از طرح مدولاسیون متفاوتی استفاده می‌کنند. برای ۶ مگابیت بر ثانیه، BPSK استفاده می‌شود. برای ۱۲ مگابیت بر ثانیه، QPSK استفاده می‌شود. برای نرخ‌های بالاتر، QAM استفاده می‌شود. ۲۴ مگابیت در ثانیه می‌دهد، در حالی که QAM-۶۴ برای دستیابی به ۵۴ مگابیت در ثانیه استفاده می‌شود. این استاندارد نرخ داده‌های برگشته را به‌دلیل بدتر شدن شرایط پیوند به‌دلیل افزایش دامنه، نویز یا تداخل چند مسیری فراهم می‌کند.

مزیت کلیدی استاندارد 802.11a این است که باند فرکانسی بسیار کمتر از باند شلوغ ۲/۴ گیگاهرتز استفاده می‌شود که شامل اجاق‌های مایکروویو، تلفن‌های بی‌سیم، بی‌سیم بلوتوث و تعدادی سرویس دیگر است که همگی می‌توانند باعث ایجاد تداخل در آن شوند. هر چند وقت یکبار، در نتیجه تداخلی ایجاد می‌شود که می‌تواند ارتباطات را مسدود کند یا حداقل برد و سرعت داده را کاهش دهد. با

^۴Complementary Code Keying (CCK)

^۵Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP)

سیگنال‌های تداخل کمتر در باند ۵ گیگاهرتز، تداخل کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر وجود دارد. نقطه ضعف این استاندارد برد کوتاه‌تر آن است. با افزایش فرکانس عملیات، محدوده انتقال داده شده معمولًا کاهش می‌یابد. عملکرد در فضای داخلی تا حد زیادی دامنه را کاهش می‌دهد زیرا سیگنال‌های ۵ گیگاهرتز راحت‌تر از سیگنال‌های ۲/۴ گیگاهرتز جذب و منعکس می‌شوند. با ۸۰۲.۱۱a حداکثر برد در حداکثر سرعت داده حدود ۵۰ متر است.

IEEE 802.11g : استاندارد ۸۰۲.۱۱g ۸۰۲ تلاشی برای افزایش سرعت داده در باند محبوب ۲/۴ گیگاهرتز بود. با استفاده از OFDM، این استاندارد حداکثر سرعت داده ۵۴ مگابیت بر ثانیه را در ۱۰۰ فوت داخل ساختمان فراهم می‌کند. همانطور که در استاندارد ۸۰۲.۱۱a وجود دارد، همانطور که قبلًا توضیح داده شد، با کاهش مسیر ارتباطی، نرخ عقب نشینی کمتری وجود دارد. استاندارد ۸۰۲.۱۱g همچنین استانداردهای ۸۰۲.۱۱b ۸۰۲.۱۱b می‌تواند با یک AP ۸۰۲.۱۱g اما با سرعت داده کمتر، صحبت است. یک فرستنده گیرنده ۸۰۲.۱۱b ۸۰۲.۱۱b می‌تواند با یک AP ۸۰۲.۱۱b اما همچنین با سرعت داده پایین‌تر، صحبت کند.

IEEE 802.11n : نسخه ۸۰۲.۱۱n برای افزایش بیشتر نرخ داده توسعه یافته است. همچنین از هر دو باند ۲/۴ گیگاهرتز و ۵ گیگاهرتز و OFDM استفاده می‌کند. ویژگی اصلی این استاندارد استفاده از سیستم‌های آنتن چند خروجی چند ورودی (MIMO) برای بهبود قابلیت اطمینان لینک است. AP‌ها برای ۸۰۲.۱۱n از دو یا چند آنتن ارسال و سه یا چند آنتن دریافت استفاده می‌کنند. گره‌های بی‌سیم از آرایش مشابهی استفاده می‌کنند. در هر مورد، چندین فرستنده گیرنده برای AP و گره مورد نیاز است. این ترتیب سرعت داده را در محدوده ۱۰۰ تا ۶۰۰ مگابیت در ثانیه در فاصله تا ۱۵۰ متر امکان پذیر می‌کند. سیستم‌های MIMO تا حد زیادی مشکلات چند مسیری را کاهش می‌دهند و به‌گسترش برد و قابلیت اطمینان پیوند بی‌سیم کمک می‌کنند.

در همه این استانداردها، روش دسترسی چندگانه حس حامل با اجتناب از برخورد (CSMA/CA) برای به‌حداقل رساندن ارتباط بین گره‌های بی‌سیمی که به‌دبیال دسترسی به AP هستند، استفاده می‌شود. هر فرستنده و گیرنده قبل از ارسال در یک کanal گوش می‌دهد. اگر کanal اشغال شده باشد، فرستنده و گیرنده یک دوره تصادفی را قبل از تلاش برای ارسال مجدد منتظر می‌ماند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که کanal برای انتقال آزاد شود.

امروزه بر فضای LAN بی‌سیم غالب است، زیرا معمولاً در همه تلفن‌های هوشمند، تبلت‌ها و لپ‌تاپ‌ها موجود است. و این فناوری بی‌سیم تمام نقاط داغ و نقاط دسترسی، از جمله میلیون‌ها روتر بی‌سیم خانگی است. این به‌طور فزاینده‌ای در تجهیزات الکترونیکی مصرفی تعییه شده است. همچنین با استانداردهای قبلی سازگار است و امکان استفاده از تجهیزات ۸۰۲.۱۱a/g را فراهم می‌کند.

IEEE 802.11ac : یکی از جدیدترین نسخه‌های استاندارد ۸۰۲.۱۱ac است. ۸۰۲.۱۱ac فقط از باند ISM ۵ گیگاهرتز برای حداقل تداخل و حداکثر پهنای باند موجود استفاده می‌کند. علاوه بر این، استفاده از MIMO و OFDM را ادامه می‌دهد. با این حال، برخی تغییرات کلیدی بسته به مدولاسیون، پهنای باند کanal و پیکربندی MIMO، نرخ داده نظری را بالاتر از ۳ گیگابیت بر ثانیه افزایش می‌دهند.

تغییرات اولیه علاوه بر کanal معمولی ۴۰ مگاهرتز، کanal‌های پهنای ۸۰ و ۱۶۰ مگاهرتز هستند. با افزایش پهنای باند، تعداد حامل‌های فرعی OFDM نیز افزایش می‌یابد و به‌حداکثر ۵۱۲ در پهنای باند ۱۶۰ مگاهرتز می‌رسد. همچنین ۲۵۶QAM را اضافه می‌کند که سرعت داده را بیشتر افزایش

می‌دهد. در نهایت، تعداد بیشتری از نسخه‌های MIMO را با حداکثر پیکربندی ۸۳۸ تعریف می‌کند. یک نسخه چند کاربره MU-MIMO نیز تعریف شده است. این استاندارد همچنین از همزیستی و سازگاری با دستگاه‌های قبلی ۱۱a و ۱۱n پشتیبانی می‌کند. شکل دهی پرتو انتقال نیز گزینه‌ای برای افزایش برد و اطمینان از قابلیت اطمینان پیوند است.

IEEE 802.11ad. : نسخه دیگر وای فای ۸۰۲.۱۱ad است. ۱۱ad از باند ۶۰ گیگاهرتز استفاده می‌کند. این پروتکل با تمام نسخه‌های قبلی از جمله ۱۱a/b/g/n/ac ۱۱a سازگار است، زیرا لایه‌های کنترل دسترسی رسانه (MAC) پروتکل مشابه هستند. نسخه ۱۱ad نیز با نام تجاری WiGig شناخته می‌شود.

WiGig از باند ISM بدون مجوز ۶۰ گیگاهرتز استفاده می‌کند. این فناوری این را به چهار باند ۲/۱۶ گیگاهرتز تقسیم می‌کند. طرح مدولاسیون اولیه OFDM است که می‌تواند از سرعت داده تا ۷ گیگابیت بر ثانیه پشتیبانی کند و آن را به یکی از سریع‌ترین فناوری‌های بی‌سیم موجود تبدیل می‌کند. این استاندارد همچنین یک حالت تک حامل را ارائه می‌کند که انرژی کمتری مصرف می‌کند. این برای برخی از دستگاه‌های دستی قابل حمل بهتر است. حالت تک حامل می‌تواند سرعت داده تا ۴/۶ گیگابیت بر ثانیه را ارائه دهد. هر دو سرعت امکان انتقال ویدئوی فشرده نشده را فراهم می‌کنند. مشخصات WiGig همچنین امنیت را در قالب استاندارد رمزگذاری پیشرفته (AES) فراهم می‌کند.

بهدلیل اندازه کوچک آتنن در فرکانس ۶۰ گیگاهرتز، آتنن‌های بهره معمولاً برای افزایش قدرت سیگنال و برد استفاده می‌شوند. حداکثر برد معمولی ۱۰ متر است. محصولات WiGig از آتنن‌های آرایه فازی روی تراشه استفاده می‌کنند که می‌توانند شکل دهی پرتو را ارائه دهند. این شکل دهی تطبیقی به ردیابی پرتو بین فرستنده و گیرنده اجازه می‌دهد تا اطمینان حاصل شود که می‌توان از ۱۱ad موانع اجتناب کرد و سرعت را حتی در شرایط متغیر محیطی به حداکثر رساند. نقطه ضعف اصلی برد کوتاه آن است. بهای داشته باشید که فرکانس‌های بالاتر مسافت‌های کوتاه‌تری را طی می‌کنند، همانطور که فیزیک بی‌سیم حکم می‌کند. این عیب به طور کلی توسط آتنن‌های شکل دهنده پرتو با بهره بالا برطرف می‌شود.

کاربرد اصلی ۱۱ad انتقال ویدئو از یک دستگاه به دستگاه دیگر در فاصله کوتاه است. یکی از ویژگی‌های هوشمندانه استاندارد، استفاده از لایه تطبیق پروتکل (PAL) است. این یک ساختار نرم‌افزاری است که با لایه MAC صحبت می‌کند و به پیاده‌سازی بی‌سیم ساده‌تر دیگر رابط‌های استاندارد سریع مانند USB، HDMI و DisplayPort را اجازه می‌دهد.

Wi-Fi همچنان یکی از پرکاربردترین فناوری‌های بی‌سیم در تاریخ است. بسیاری از دستگاه‌های جدید در حال کار به محصولات رسانه‌ای مصرفی، سلامت/تناسب اندام/پزشکی، خودرو، کنترل‌های هوشمند و محصولات اتوماسیون مربوط می‌شوند.

جدول (۱.۲۱) محبوب‌ترین نسخه‌های Wi-Fi را خلاصه می‌کند.

استانداردهای وای فای مرتبط

گروه‌های کاری IEEE 802.11 دستور کار توسعه را در حال اجرا نگه می‌دارند. این گروه‌ها نه تنها بر روی نسخه‌های استاندارد اصلی بعدی، بلکه بر روی بسیاری از اضافات و پیشرفتها به استانداردهای اساسی کار می‌کنند. برخی از مهم‌ترین کارهای گذشته موارد زیر را انجام می‌دهند:

- **802.11e** ویژگی‌های کیفیت خدمات (QoS) را ارائه می‌کند که به VoIP و سایر خدمات مهم اجازه می‌دهد از طریق Wi-Fi منتقل شوند.

Table 21-1		Summary of the Most Current Active Wi-Fi Standards					
IEEE std.	Band	Technology	Modulation	Channel BW	MIMO (antennas)	Range (meters)	Max. Speed
802.11n	2.4 & 5 GHz	OFDM	Up to 64QAM	20, 40 MHz	Up to 4×4	100	600 Mbps
802.11ac	5 GHz	OFDM	Up to 256QAM	40, 80, 160 MHz	Up to 8×8	100	3 Gbps
802.11ad	60 GHz	OFDM	Up to 64QAM	2.16 GHz	Beamforming	10	7 Gbps

جدول ۱.۲۱: خلاصه‌ای از رایج‌ترین استانداردهای فعال Wi-Fi.

امنیت کامل Wi-Fi را در قالب WEP، WPA، و WPA2 فراهم می‌کند. 802.11i •

شبکه مش موقعی خودکار را به Wi-Fi می‌آورد. 802.11s •

پروتکلی را بین نقاط دسترسی و کلاینت‌ها فراهم می‌کند که به شبکه‌های بین‌المللی با پشتیبانی از احراز هویت، مجوز، و حسابداری با انتخاب شبکه، اجرای سیاست رمزگذاری و مدیریت منابع اجازه می‌دهد. اتصالات خودکار و انتقال شبکه را تسهیل می‌کند. به Wi-Fi اجازه می‌دهد تا برای انتقال سلولی در سلول‌های کوچک استفاده شود 802.11u •

Wi-Fi را به باند ۳۷۰۰–۳۶۵۰ مگاهرتز می‌آورد. 802.11y •

یکی از جالب‌ترین نسخه‌های Wi-Fi، استاندارد 802.11p است که قرار است در سیستم‌های V2x یا خودرو به خودرو (V2V)^۶ و خودرو به زیرساخت (V2I)^۷ مستقر شود. این سیستم‌ها بخشی از سیستم مخابراتی هوشمند پیشنهادی (ITS)^۸ هستند که اطلاعات ایمنی و ترافیکی را با استفاده از تله‌ماتیک برای وسائل نقلیه فراهم می‌کنند. این استاندارد که سیستم بی‌سیم ارتباطات کوتاه برد اختصاصی (DSRC) نامیده می‌شود، مشابه استاندارد وای‌فای 802.11a است.

سیستم ارتباطات کوتاه برد اختصاصی (DSRC) از استاندارد IEEE 802.11p و پروتکلی به نام دسترسی بی‌سیم در محیط‌های خودرو (WAVE)^۹ استفاده می‌کند. به DSRC یک بخش ۷۵ مگاهرتز از طیف از ۵/۸۵ تا ۵/۹۲۵ گیگاهرتز اختصاص داده شده است. هفت کanal ۱۰ مگاهرتزی وجود دارد که با اعداد زوج از ۱۷۲ تا ۱۸۴ تعیین شده‌اند. اندازه این کانال‌ها نصف یک کانال استاندارد ۸۰۲.۱۱ ۲۰ مگاهرتز است تا جابجایی داپلر و محو شدن چند مسیره را به حداقل برساند. به یک نسخه اروپایی سیستم، پهنای باند ۵۰ مگاهرتز برای پنج کانال اختصاص داده شده است.

هدف از این طیف این است که برای زیرساخت وسیله نقلیه و واحد کنار جاده‌ای (RSU)^{۱۰} اجازه دهد شبکه‌های موردنی خودرویی (VANET)^{۱۱} را تشکیل دهند. این شبکه‌ها پویا خواهند بود

^۶Vehicle-to-Vehicle (V2V)

^۷Vehicle-to-Infrastructure (V2I)

^۸Intelligent Telecommunications System (ITS)

^۹Dedicated Short-Range Communications (DSRC)

^{۱۰}Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)

^{۱۱}RoadSide Unit (RSU)

^{۱۲}Vehicular Ad hoc NETworks (VANETs)

و اتصال متنابع کوتاه مدت را برای پیاده‌سازی برنامه‌های کاربردی مختلف اینمنی برای جلوگیری از برخورد و اینمنی جاده فراهم می‌کنند. اتصالات اتوماتیک هستند. رادیو استاندارد ۸۰۲.۱۱ میمه دو طرفه با سرعت داده در محدوده ۶ تا ۲۷ مگابیت بر ثانیه است و حداکثر برد تخمینی آن ۳۰۰ متر (۱ کیلومتر) است.

پروتکل WAVE از لایه‌های استاندارد PHY و MAC استاندارد ۸۰۲.۱۱a استفاده می‌کند اما از خانواده استاندارد ۱۶۰۹ IEEE برای لایه‌های بالایی استفاده می‌کند، از جمله یک پسوند MAC، یک لایه LLC، لایه‌های شبکه و انتقال که شامل IPv6 با UDP و TCP و یک لایه برنامه کاربردی پیام بالایی امنیت نیز توسعه استاندارد ۱۶۰۹.۲ ارائه شده است. انواع مختلفی از قالب‌های پیام کوتاه برای شرایط مختلف توسعه داده شده است.

پس از آن هنوز پروژه‌هایی در گروه‌هایی در حال توسعه هستند. یک مثال ۸۰۲.۱۱ah است. این تغییری در استانداردهای موجود است که به کار کرد در باندهای زیر ۱ گیگاهرتز اجازه می‌دهد تا برد را افزایش داده و برنامه‌هایی مانند متر هوشمند را پیاده‌سازی کند. یکی دیگر از استانداردهای جدید جالب در حال توسعه، ۱۱af برای فرصت فضای سفید تلویزیون است که در ادامه این فصل پوشش داده خواهد شد.

اتحاد Wi-Fi

چیزی که Wi-Fi را بسیار خوب می‌کند، پشتیبانی، ترویج و توسعه اتحاد Wi-Fi (WFA) است، یک انجمن تجاری از شرکت‌هایی که در حال توسعه و استفاده از استاندارد هستند. عملکرد کلیدی آن آزمایش و تأیید همه تراشهای و محصولات برای اطمینان از سازگاری و قابلیت همکاری کامل است. WFA همچنین استانداردهای خود و برخی پیشرفتهای عالی را در استانداردها ایجاد می‌کند. برخی از نمونه‌ها Passpoint و HotSpot 2.0، Wi-Fi Direct و Miracast هستند. معمولاً اینها پیشرفتهای نرم افزاری هستند که می‌توانند در تراشهای و محصولات استاندارد گنجانده شوند.

Wi-Fi Direct تغییری در استاندارد اولیه است که به دستگاه‌های دارای Wi-Fi اجازه می‌دهد بدون عبور از یک نقطه داغ یا روتر سنتی به یکدیگر متصل شوند. این به تلفن‌های هوشمند، لپ‌تاپ‌ها و تبلت‌ها، دوربین‌ها، چاپگرها و سایر دستگاه‌های مجهز به Wi-Fi اجازه می‌دهد تا به طور خودکار ارتباطات یک به یک را توسعه دهند. بسیاری از تراشهای و دستگاه‌ها اکنون با Wi-Fi Direct فعال هستند.

HotSpot 2.0 پاسخ WFA به اتصال نقاط دسترسی (AP) و در نهایت شبکه‌های سلولی است. Passpoint استاندارد گواهی است که راه آسان‌تری برای اتصال به شبکه Wi-Fi ارائه می‌کند. یافتن و فعال کردن دسترسی ب NFC داغ و نقاط دسترسی را ساده می‌کند. مکان و اتصال نقاط داغ صاف و خودکار است و با امنیت WPA2 کاملاً محافظت می‌شود.

HotSpot 2.0 فعال کننده استاندارد ۸۰۲.۱۱u است. این اجازه می‌دهد تا دستگاه‌ها و شبکه‌ها به طور خودکار مذاکره و متصل شوند. کاربر مجبور نیست کاری انجام دهد. HotSpot 2.0 Passpoint بهترین AP نزدیک را انتخاب می‌کنند و بدون تعامل با کاربر متصل می‌شوند. آنها اجازه رومینگ Wi-Fi را می‌دهند و راه را برای انتقال خودکار برای پیاده سازی تخلیه داده‌های سلولی به Wi-Fi هموار می‌کنند.

Miracast راه حل WFA برای نمایش ویدیو بین دستگاه‌ها به صورت بی‌سیم بدون عبور از نقطه دسترسی است. این به دستگاه‌های دارای Miracast امکان می‌دهد مستقیماً ویدیو را انتقال دهند، مانند لپ‌تاپ به تلویزیون با صفحه‌نمایش بزرگ، یا از تلفن هوشمند به تلویزیون، یا از لپ‌تاپ به نمایشگر

ویدیویی بزرگتر در یک ایستگاه اتصال. سایر کاربردهای احتمالی ارسال صفحه نمایش لپ تاپ به یک پروژکتور یا اجرازه دادن به تبلت برای نمایش تلویزیون از یک ستاپ باکس کابلی است. Miracast از Wi-Fi Direct برای برقراری اتصال استفاده می‌کند.

آینده Wi-Fi

اگرچه به نظر می‌رسد Wi-Fi اکنون در همه جا وجود دارد، بهزودی حتی گستردگرتر خواهد شد. در حال حاضر در بسیاری از هوایپیماهای مسافربری موجود است تا مسافران بتوانند در پرواز به اینترنت متصل شوند. در پرینترها و دوربین‌ها استفاده می‌شود. اما این همه چیز نیست.

یکی دیگر از اهداف Wi-Fi حوزه ماشین به ماشین^{۱۳} (M2M) و اینترنت اشیا^{۱۴} (IoT) است. به عنوان مثال، به نظر می‌رسد Wi-Fi به عنوان بی‌سیم انتخابی در شبکه‌های خانگی و حتی لوازم خانگی در حال ظهور است. هر دو دستگاه بی‌سیم Z-Wave و ZigBee از قبیل در خانه هستند، اما برای ایجاد اتصال به اینترنت به نوعی دروازه نیاز دارند. از آنجایی که بسیاری از خانه‌ها در حال حاضر دارای یک شبکه Wi-Fi هستند، این یک انتخاب طبیعی برای شبکه‌های خانگی است. Whirlpool، LG و دیگران از Wi-Fi برای جمع‌آوری داده‌های استفاده از یخچال، ماشین لباسشویی و سایر لوازم خود استفاده می‌کنند. برخی از سازندگان لوازم خانگی یک برنامه تلفن هوشمند ارائه می‌کنند که به‌مالک امکان می‌دهد مصرف انرژی، مصرف، نگهداری و سایر داده‌های مربوط به‌هر دستگاه متصل را ببینند.

امنیت بی‌سیم : استاندارد 802.11 همچنین شامل پیش‌بینی‌هایی برای رمزگذاری برای محافظت از حریم خصوصی کاربران بی‌سیم است. از آنجایی که سیگنال‌های رادیویی به معنای واقعی کلمه توسط هر کسی که یک گیرنده مناسب دارد می‌تواند دریافت کند، کسانی که نگران حریم خصوصی و امنیت هستند باید از ویژگی رمزگذاری تعیینه شده در سیستم استفاده کنند. پروتکل امنیتی اولیه Wired Equivalent Privacy (WEP) نامیده می‌شود و از استاندارد رمزگذاری و احراز هویت RC4 استفاده می‌کند. WEP ممکن است توسط کاربر خاموش یا روشن شود. سطح پایه‌ای از امنیت را فراهم می‌کند. با این حال، WEP توسط هکرها کرک شده است و کاملاً در برابر پیشرفت‌های سارقان اطلاعات ایمن نیست. دو استاندارد رمزگذاری قوی‌تر به نام‌های (WPA) و (WPA2) IEEE نیز به اشکال مختلف برای تقویت بیشتر فرآیند رمزگذاری در دسترس هستند. همچنین دارای یک استاندارد امنیتی به نام 802.11i است که نهایت حفاظت را فراهم می‌کند. این همه شک و تردید در مورد ایمنی انتقال داده را برای سخت‌ترین برنامه‌ها برطرف می‌کند. استاندارد دیگر، 802.11x، روشی امن برای احراز هویت برای تراکنش‌های بی‌سیم ارائه می‌کند.

در حالی که استانداردهای IEEE تلاش می‌کنند تا مشخصات فنی فرستنده‌ها و رابطه‌های آن‌ها را تعیین کنند، پیاده‌سازی‌های متفاوت استانداردها توسط تولیدکنندگان مختلف نیمه‌رساناهای مشکلات قابلیت همکاری را ایجاد کرده‌اند. این بدان معنی است که حتی اگر هر سازنده استاندارد را رعایت کرده است، برخی تغییرات جزئی مانع از برقراری ارتباط فرستنده گیرنده با گیرنده سازنده دیگر می‌شود. چنین مشکلات قابلیت همکاری تا حد زیادی پذیرش را در مراحل اولیه WLAN های 802.11b محدود کرد. آنقدر بد بود که سازنده‌گان با هم متحده شدند تا اتحاد Wi-Fi را تشکیل دهند. Wi-Fi مخفف وفاداری بی‌سیم است و به عنوان علامت تجاری محصولات 802.11 پذیرفته شده است. اتحاد Wi-Fi استانداردهای آزمایش و صدور گواهینامه را تنظیم کرد که همه فروشنده‌گان برای اطمینان از قابلیت

^{۱۳}Machine-to-Machine (M2M)

^{۱۴}Internet of Things (IoT)

همکاری کامل همه محصولات باید رعایت می‌کردند. هر AP یا گره بی‌سیم گواهی Wi-Fi با سایر محصولات دارای گواهی Wi-Fi صحبت می‌کند. قابلیت همکاری کامل حاصل از فرآیند آزمایش و صدور گواهینامه، این استاندارد بی‌سیم را محبوب و بسیار مورد استفاده قرار داده است.

۲.۲۱ PAN و بلوتوث

شبکه شخصی^{۱۵} (PAN) یک شبکه بی‌سیم بسیار کوچک است که به صورت غیر رسمی یا به صورت وقت ایجاد می‌شود. معمولاً فقط دو یا سه گره را شامل می‌شود، اما برخی از سیستم‌ها اجازه می‌دهند بسیاری از گره‌ها در یک منطقه کوچک بهم متصل شوند.

محبوب‌ترین سیستم PAN بی‌سیم بلوتوث است، استانداردی که توسط شرکت تلفن همراه اریکسون برای استفاده به عنوان جایگزین کابل توسعه یافته است. هدف این بود که با حذف کابل اتصال تلفن همراه به هدست، عملکرد هندزفری تلفن همراه را فراهم کنیم. امروزه این یکی از کاربردهای اصلی بلوتوث است، اما کاربردهای جایگزین کابل دیگری نیز دارد.

بلوتوث یک استاندارد رادیویی دیجیتال است که از طیف گسترده پرش فرکانس^{۱۶} (FHSS) در باند ISM بدون مجوز ۲/۴ گیگاهرتز استفاده می‌کند. بیش از ۷۹ فرکانس با فاصله ۱ مگاهرتز از ۲۰۴۰۲ تا ۲۴۸۰ گیگاهرتز پرش می‌کند. سرعت پرش در ثانیه است. بنابراین، زمان ماندن در هر فرکانس $625 = \frac{1}{1600}$ میکرو ثانیه است. در این مدت داده‌های دیجیتالی منتقل می‌شود. نرخ کل داده یک مگابایت در ثانیه است، اما مقداری از آن سربار است (هدر، تشخیص و تصحیح خطأ و غیره). سرعت داده واقعی $\frac{722}{2} = 361$ کیلوبیت بر ثانیه سیمپلکس یا $\frac{433}{9} = 48.1$ کیلوبیت بر ثانیه دوبلکس است. داده‌ها، که ممکن است صدا یا هر اطلاعات دیجیتالی دیگری باشند، در بسته‌ها قرار می‌گیرند و به طور متوالی در پنج شکاف زمانی ارسال می‌شوند. سیگنال داده سریالی با فیلتر گاووسی است و سپس از FSK برای مدولاسیون استفاده می‌شود. تغییر فرکانس بین 160 ± 1 باینری است.

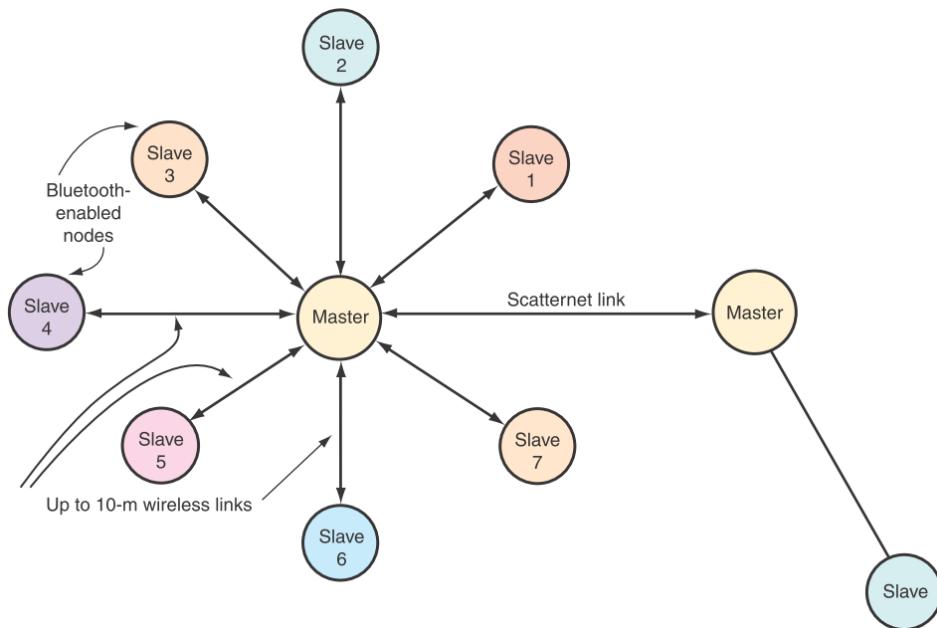
بسته به کاربرد، سه سطح از توان انتقال تعریف شده است. برای فواصل کوتاه تا ۱۰ متر، توان کلاس ۳ در 0 dBm (۱ mW) استفاده می‌شود. برای مسافت‌های طولانی تر یا عملکرد قوی‌تر در محیط‌هایی با موانع و سر و صدا، کلاس ۲ با توان بالاتر را می‌توان با 4 dBm یا $2/5$ میلی‌وات استفاده کرد. حداکثر برد بلوتوث حدود ۱۰۰ متر است و با توان کلاس ۱ 20 dBm یا 100 mW به دست می‌آید. فرستنده‌های بلوتوث به عنوان فرستنده‌های تک‌تراسهای در دسترس هستند که به دستگاه متصل می‌شوند تا بخشی از یک PAN باشند. این دستگاه‌ها همواره حاوی نوعی کنترل‌کننده تعییه شده هستند که برنامه را مدیریت می‌کند. اگر از صدا استفاده می‌شود، یک وکتور مورد نیاز است.

بلوتوث طوری تنظیم شده است که فرستنده گیرنده بی‌سیم دائمی یک سیگنال جستجو ارسال می‌کند و سپس به سایر دستگاه‌های بلوتوث مجهز مشابه نزدیک گوش می‌دهد. اگر دستگاه دیگری وارد محدوده شود، دو دستگاه بلوتوث به طور خودکار به یکدیگر متصل شده و داده‌ها را مبادله می‌کنند. این دستگاه‌ها چیزی را تشکیل می‌دهند که piconet نامیده می‌شود، اتصال یک دستگاه بلوتوث که به عنوان یک کنترل کننده اصلی به هفت دستگاه دیگر بلوتوث دیگر عمل می‌کند. هنگامی که

^{۱۵}Personal Area Network (PAN)

^{۱۶}Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

ایجاد شد، گره‌ها می‌توانند اطلاعات را با یکدیگر مبادله کنند. دستگاه‌های بلوتوث همچنین می‌توانند برای ایجاد پراکنده‌گی‌های بزرگ‌تر به پیکنت‌های دیگر متصل شوند، شکل (۳.۲۱).



شکل ۳.۲۱: پیکونت بلوتوث با لینک پراکنده. حداکثر هفت دستگاه را می‌توان به‌طور فعال متصل کرد.

یکی دیگر از نسخه ۲/۰ بلوتوث، Enhanced Data Rate (EDR) نام دارد. تمام ویژگی‌هایی که قبلاً توضیح داده شد را دارد اما سرعت کلی داده را به ۳ مگابیت در ثانیه افزایش می‌دهد. نرخ ۳ مگابیت بر ثانیه شامل تمام هدراها و سایر سربارها می‌شود. نرخ داده خام سه برابر نرخ ۷۲۳ کیلوبیت بر ثانیه است که قبلاً برای نرخ خالص بیش از ۲/۱ مگابیت در ثانیه ذکر شد. پروتکل جدید همچنان با سرعت یک مگابیت در ثانیه با استفاده از GFSK برای دسترسی و شناسایی ورودی‌ها برای ایجاد پیوند و برای سربرگ‌های پروتکل ارسال می‌کند. با این حال، از یک روش مدولاسیون متفاوت برای دستیابی به نرخ داده بالاتر در محموله داده استفاده می‌کند.

نرخ ناخالص داده ۲/۱ مگابیت بر ثانیه با استفاده از فرمی از QPSK به نام QPSK دیفرانسیل^۴/ n به دست می‌آید. از 90° تغییر فاز با فاصله $+135^\circ, +45^\circ, -45^\circ$ و -135° استفاده می‌کند. هر نماد ۲ بیت را با نرخ نماد ۱ مگابیت بر ثانیه ارسال می‌کند.

برای رسیدن به نرخ ۳ مگابیت بر ثانیه، از طرح مدولاسیون کلیدزنی تغییر فاز دیفرانسیل هشت فازیپ (8DPSK) استفاده می‌شود. در هر نماد ۳ بیت ارسال می‌کند. در غیر این صورت تمام ویژگی‌های دیگر استاندارد بلوتوث یکسان است.

آخرین نسخه بلوتوث ۴/۰ است. این بلوتوث تمام ویژگی‌های قبلی بلوتوث را در خود جای داده است، اما بلوتوث کم انرژی^{۱۷} (BLE) را اضافه می‌کند، که یک تغییر کم مصرف از استاندارد اصلی بلوتوث است.

^{۱۷}Bluetooth Low Energy (BLE)

بلوتوث BLE بلوتوث هوشمند نیز نامیده می‌شود. اسمارت از مجموعه‌های متفاوت از تکنیک‌های فنی و رادیویی برای اطمینان از مصرف انرژی بسیار کم استفاده می‌کند. پروتکل داده به گونه‌ای تغییر کرد که انتقال چرخه کار کم یا یک انتقال بسیار کوتاه بین دوره‌های طولانی انجام شود. چرخه کم کار، علاوه بر حالت‌های خواب^{۱۸} بسیار کم مصرف، به محصلو هوشمند بلوتوث اجازه می‌دهد تا سال‌ها بر روی سلول سکه^{۱۹} کار کند. بلوتوث هوشمند گروهی از API‌ها را برای توسعه سریع و آسان برنامه‌ها فراهم می‌کند.

بلوتوث کم انرژی همچنان در همان باند فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز بدون مجوز ISM (صنعتی-علمی-پزشکی) به عنوان بلوتوث استاندارد کار می‌کند. با این حال، از یک طرح طیف گستردۀ پرش فرکانس (FHSS) متفاوت استفاده می‌کند. جهش استاندارد بلوتوث با سرعت ۱۶۰۰ پرش در ثانیه روی ۷۹ کانال با عرض ۱ مگاهرتز. BLE از FHSS با عرض ۴۰ کانال با ۲ مگاهرتز برای اطمینان از قابلیت اطمینان بیشتر در فواصل طولانی‌تر استفاده می‌کند. بلوتوث استاندارد نرخ داده ناچالص ۱، ۲ یا ۳ مگابیت بر ثانیه را ارائه می‌دهد. حداکثر نرخ ۱ BLE مگابیت در ثانیه با توان عملیاتی خالص ۲۶۰ کیلوبیت در ثانیه است. مدولاسیون GFSK استفاده می‌شود.

از دیگر ویژگی‌های BLE توان خروجی (1 mW) ۰ و حداکثر برد معمولی ۵۰ متر است. امنیت AES ۱۲۸ بیتی است. قابلیت اطمینان پیوند با استفاده از تکنیک جهش فرکانس تطبیقی که از تداخل جلوگیری می‌کند، ۲۴ بیتی و بررسی یکپارچگی پیام ۳۲ بیتی بهبود می‌یابد. رایج‌ترین شکل‌بندی‌های شبکه P2P یا ستاره هستند. تأخیر فقط ۶ میلی ثانیه است.

نکته کلیدی این است که BLE با بلوتوث استاندارد سازگار نیست و یک رادیو جداگانه بر روی تراشه‌های استاندارد بلوتوث ۴/۰ است. اگر چنین قابلیت همکاری مطلوب باشد، می‌توان آن را با یک دستگاه دو حالت پیاده سازی کرد. این یک مدار یکپارچه است که شامل یک رادیو بلوتوث استاندارد و یک رادیو BLE است که هر یک می‌توانند به طور جداگانه، اما نه همزمان، کار کنند. آنها می‌توانند یک آتنن را به اشتراک بگذارند. همچنین به عنوان یک دستگاه جداگانه برای برنامه‌های کاربردی کم مصرف نیز موجود است.

فقط برای توضیح بیشتر، در اینجا اصطلاحات جدید بلوتوث آمده است:

- Bluetooth Smart Ready - این به مجموعه تراشه‌های دو حالت نسخه ۴/۰ اشاره دارد. علاوه بر BLE، تمامی نسخه‌های قبلی بلوتوث کلاسیک را کنترل می‌کند.
- Bluetooth Smart - این فقط BLE است. هیچ نسخه دیگری از بلوتوث را به جز Smart Ready یا سایر دستگاه‌های BLE وصل نمی‌کند.

• بلوتوث - این بلوتوث کلاسیک است که با نسخه‌های قبلی و دستگاه‌های سازگار است. با دستگاه‌های هوشمند وصل نمی‌شود.

اپل، گوگل، اندروید و مایکروسافت (ویندوز ۸) از استانداردهای بلوتوث پشتیبانی نرم افزاری ارائه می‌کنند. این امر اتصال با دستگاه‌هایی مانند تلفن‌های هوشمند، تبلت‌ها و لپ‌تاپ‌ها را تسريع می‌کند. یک برنامه بلوتوث جالب، سرویس مکان بی‌سیم iBeacon اپل است. از بلوتوث کم انرژی (BLE) برای پیاده‌سازی چراغ‌ها برای ارسال پیامی استفاده می‌کند که مکان آن‌ها را به گوشی‌های هوشمند

^{۱۸}Sleep modes

^{۱۹}Coin cell

BLE نزدیک مشخص می‌کند. این فناوری جدید مجموعه‌ای کاملاً جدید از کاربردها را بهارغان می‌آورد.

یک برچسب Beacon، یا ابزاری است که با باتری کار می‌کند و در مکانی قرار می‌گیرد که به آن امکان می‌دهد به دستگاه‌های بلوتوث نزدیک مانند آیفون یا تلفن‌های اندرویدی دسترسی پیدا کند. تگ (برچسب Tag) iBeacon در حدود ۴۰ تا ۵۰ فوت در یک محیط داخلی دارد، اما می‌تواند تا ۱۰۰ فوت یا بیشتر در یک محیط بیرونی با یک مسیر دید واضح برسد. بیکن سیگنالی را به بیرون ارسال می‌کند که سپس دریافت و تایید می‌شود. سپس بیکن پیام مورد نظر را به تلفن ارسال می‌کند.

بیشترین برنامه ذکر شده تبلیغات برای فروشگاه‌های خرد فروشی و رستوران‌ها است. در یک مرکز خرید یا سایر مناطق خرید، هنگامی که در محدوده فروشگاه قرار گرفتید و اگر برنامه iBeacon مناسب را داشته باشید، به طور خودکار اعلامیه‌های فروش یا انتخاب منو دریافت خواهد کرد. هر برنامه geo-fencing را می‌توان در iBeacon اعمال کرد. Geo-fencing برای تعريف یک مرز مجازی استفاده می‌کند. هنگامی که در آن "حصار" قرار گرفتید، می‌توانید در هر برنامه‌ای که در حال اجرا است شرکت کنید.

بسیاری از تلفن‌ها قبلاً BLE را نصب کرده‌اند. همه آیفون‌ها از ۴S گرفته تا مدل‌های فعلی، آماده هستند. بسیاری از مدل‌های اندروید مانند سامسونگ گلکسی نیز همینطور هستند. تخمین زده می‌شود که اکثر گوشی‌های هوشمند در سال‌های آینده دارای BLE باشند. برای استفاده از iBeacon تنها به برنامه‌هایی نیاز دارید.

برنامه‌های اصلی بلوتوث هدست‌های بی‌سیم برای تلفن‌های همراه و سیستم‌های صوتی هندزفری در خودروها و کامیون‌ها هستند. همچنین اتصال اصلی بین گوشی‌های هوشمند و ساعت‌های هوشمند لوازم جانبی است. بلوتوث همچنین در سایر پوشیدنی‌ها مانند آنها می‌باشد که برای نظارت پزشکی یا سلامتی استفاده می‌شود، استفاده می‌کند. کاربردهای دیگر شامل دستگاه‌های رابط انسانی بی‌سیم (HID)^{۲۰} مانند صفحه کلید، ماوس و کنترلرهای بازی است. هر گونه اتصال بی‌سیم در فاصله کوتاهی که در محدوده قابلیت سرعت داده بلوتوث باشد یک برنامه بالقوه است.

استاندارد بلوتوث توسط گروه علاقه ویژه بلوتوث (SIG) نگهداری می‌شود و توسط بیش از ۲۰۰۰ سازنده پشتیبانی می‌شود. بلوتوث نیز در ابتدا توسط IEEE ۸۰۲.۱۵.۱ به عنوان Bluetooth SIG حفظ می‌شود.

۳.۲۱ شبکه‌های بی‌سیم Mesh و ZigBee

نام تجاری دیگر فناوری شبکه ZigBee بر اساس استاندارد بی‌سیم IEEE 802.15.4 است. مانند بلوتوث، یک فناوری کوتاه برد با قابلیت شبکه است. این در درجه اول برای کاربردهای نظارت و کنترل تجاری، صنعتی و خانگی طراحی شده است. استاندارد ۸۰۲.۱۵.۴ به اصطلاح رابط هوا را تعريف می‌کند که لایه فیزیکی (PHY) یا لایه ۱ استاندارد OSI و کنترل دسترسی رسانه (MAC) یا لایه ۲ سیستم است. ZigBee Alliance، سازمانی از فروشنده‌گان تراشه، نرم‌افزار و تجهیزات محصولات ZigBee سطوح بالاتری از لایه‌ها از جمله شبکه و امنیت را مشخص می‌کند.

^{۲۰} Human Interface Device (HID)

ZigBee برای فعالیت در طیف بدون مجوز موجود در جهان طراحی شده است. این توسط FCC قسمت ۱۵ در ایالات متحده تعریف شده است. سه باند و نسخه اصلی وجود دارد. حتی اگر نرخ

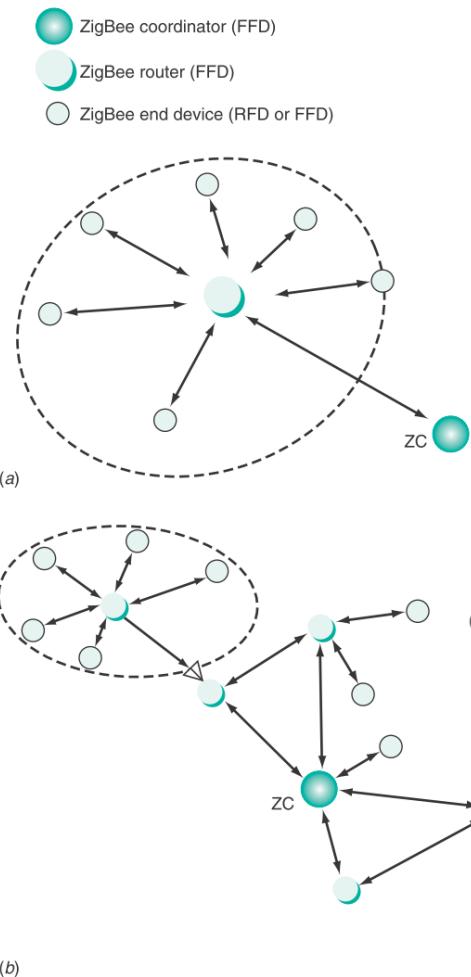
Frequency Band	Number of Channels	Modulation	Max. Data Rate, Kbps
868 MHz (Europe)	1	DSSS/BPSK	20
915 MHz	1	DSSS/BPSK	40
2.4 GHz	16	DSSS/O-QPSK	250

داده کم است، این معمولاً مشکلی نیست، زیرا اکثر برنامه‌ها صرفاً داده‌های حسگر را منتقل می‌کنند یا عملیات روشن/خاموش ساده انجام می‌دهند. انتقال توسط بسته‌هایی با حداکثر اندازه ۱۲۸ بایت است که ۱۰۴ بایت آن داده است. هر دو حالت آدرس دهی ۱۶ و ۶۴ بیتی در دسترس هستند، اگرچه حداکثر تا ۶۵۵۳۶ گره در نظر گرفته می‌شود. روش دسترسی مانند CSMA/CA Wi-Fi است. پرکاربردترین نسخه، نسخه‌ای است که در باند ۲/۴ گیگاهرتز کار می‌کند.

در مورد برد، به‌طور قابل توجهی با کاربرد و محیط متفاوت است. با استفاده از ۲/۴ گیگاهرتز، حداکثر برد معمولی در داخل ساختمان حدود ۳۰ متر است. این می‌تواند تا ۴۰۰ متر در فضای باز با یک خط دید واضح گسترش یابد. حداکثر برد در ۸۶۸ یا ۹۰۰ مگاهرتز به‌دست می‌آید و می‌تواند تا ۱۰۰۰ متر با یک مسیر دید خطی باشد.

مزیت ZigBee قابلیت شبکه سازی همه کاره آن است. این استاندارد از سه توپولوژی ستاره، مش و درخت خوشبایی پشتیبانی می‌کند. متدالول ترین آنها ستاره و مش هستند که در شکل (۴.۲۱) نشان داده شده است. این توپولوژی‌های شبکه از سه نوع گره ZigBee تشکیل شده‌اند: یک هماهنگ کننده ZC (ZigBee)، یک روتر (ZR) و یک دستگاه پایان (ZED). ZC تشکیل شبکه را آغاز می‌کند. تنها یک ZC در هر شبکه وجود دارد. ZR به عنوان مانیتور یا دستگاه کنترلی عمل می‌کند که حسگر را مشاهده می‌کند یا عملیات خاموش/اروشن را در برخی از دستگاه‌های پایانی آغاز می‌کند. همچنین به عنوان یک روتر عمل می‌کند زیرا می‌تواند داده‌ها را از گره‌های دیگر دریافت کند و دوباره آن را به گره‌های دیگر ارسال کند. ZED به سادگی یک مانیتور یا دستگاه کنترلی است که فقط داده‌ها را دریافت یا ارسال می‌کند. تکرار یا مسیری ندارد. گره‌های ZR و ZC دستگاه‌های تمام کارکرد (FFD) و ZED به عنوان یک دستگاه با عملکرد کاهش‌یافته (RFD) شناخته می‌شوند. شکل‌بندی ستاره در شکل (۴.۲۱)(الف) رایج ترین است، جایی که یک ZR واقع در مرکز داده‌ها را از سایر ZR‌ها یا ZED‌ها می‌پذیرد یا داده‌های کنترلی را توزیع می‌کند. سپس ZR مرکزی با ZC که به عنوان کنترل کننده اصلی سیستم عمل می‌کند، ارتباط برقرار می‌کند.

در توپولوژی مش، بیشتر گره‌ها ZR هستند که می‌توانند به عنوان نقاط نظارت و کنترل عمل کنند، اما همچنین می‌توانند داده‌ها را به و از گره‌های دیگر تکرار یا هدایت کنند. ارزش توپولوژی مش این است که می‌تواند دامنه شبکه را تا حد زیادی افزایش دهد. اگر یک گره قدرت یا موقعیت لازم برای رسیدن به گره مورد نظر را نداشته باشد، می‌تواند داده‌های خود را از طریق گره‌های مجاور که از امتداد داده‌ها عبور می‌کنند تا رسیدن به مکان مورد نظر منتقل کند. در حالی که حداکثر برد بین گره‌ها ممکن است تنها ۳۰ متر یا کمتر باشد، این محدوده با انتقال داده‌ها از گره به گره در محدوده بسیار طولانی‌تر و منطقه وسیع‌تری ضرب می‌شود. یکی دیگر از ویژگی‌های توپولوژی مش، قابلیت اطمینان یا استحکام شبکه است. اگر یک گره



شکل ۴.۲۱: رایج‌ترین توپولوژی‌های شبکه ZigBee. (الف) ستاره. (ب) مش.

غیرفعال باشد، داده‌ها همچنان می‌توانند از طریق گره‌های دیگر در مسیرهای جایگزین هدایت شوند. با مسیرهای اضافی به ZC، یک مش ZigBee تضمین می‌کند که داده‌ها بدون توجه به شرایط نامطلوب به مقصد می‌رسند. بسیاری از برنامه‌های کاربردی حیاتی به‌این سطح از قابلیت اطمینان نیاز دارند.

در مورد برنامه‌های کاربردی، ZigBee می‌تواند طیف گستردگی از نیازهای بی‌سیم را برطرف کند. در درجه اول برای نظارت و کنترل طراحی شده است. مانیتورینگ به بررسی طیف وسیعی از شرایط فیزیکی، بهویژه دما، رطوبت، فشار، وجود نور، سرعت و اطلاعات موقعیت اشاره دارد. سنسورها یک سیگنال آنالوگ تولید می‌کنند که نشان‌دهنده متغیر فیزیکی است که تقویت می‌شود و در غیر این صورت شرطی می‌شود و سپس به داده‌های دیجیتال تبدیل و به محل نظارت مرکزی که در آن تصمیم‌گیری می‌شود، ارسال می‌شود. این ویژگی ZigBee را به یک سیستم تله متري کوتاه برد برتر در آنچه که شبکه‌های حسگر بی‌سیم نامیده می‌شود تبدیل می‌کند.

کنترل بهارسال سیگنال‌های فرمان برای شروع برخی اقدامات اشاره دارد. معمولاً از دستورات برای خاموش و روشن کردن چیزها استفاده می‌شود. برخی از نمونه‌ها چواغ‌ها، موتورها، شیر برقی، رله‌ها و سایر دستگاه‌هایی هستند که نوع خاصی از عملکرد را انجام می‌دهند.

برخی از برنامه‌های محبوب عبارتند از نظارت و کنترل چواغ‌ها. سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع^{۲۱} (HVAC) در ساختمان‌های بزرگ؛ و نظارت و کنترل صنعتی در کارخانه‌ها، کارخانه‌های شیمیایی و عملیات تولیدی. خواندن خودکار کنتور برق و گاز یک کاربرد عمده است. کاربردهای دیگر شامل کاربردهای پزشکی مانند نظارت بی‌سیم بیمار، سیستم‌های حسگر خودرو، نظارت بر میدان نبرد نظامی و مجموعه‌ای از برنامه‌های کاربردی مصرف‌کننده مانند نظارت و کنترل خانه، کنترل از راه دور سایر اشیاء و امنیت است. از آنجایی که ZigBee بسیار کم‌هزینه و با باتری کار می‌کند، می‌توان از آن در طیف گسترده‌ای از موقعیت‌ها استفاده کرد که احتمالاً اکثر آنها هنوز کشف نشده‌اند.

۴.۲۱ وایمکس و شبکه‌های بی‌سیم شهری

شبکه‌های منطقه شهری (MAN) عمدتاً شبکه‌های فیبر نوری، اغلب حلقه‌های SONET هستند که شبکه‌های محلی سازمانی را به شبکه‌های WAN یا ستون فقرات اینترنت متصل می‌کنند. یکی دیگر از MAN معمولی یک شبکه تلویزیون کابلی محلی است. اکنون یک رقیب بی‌سیم برای شبکه‌های شهری وجود دارد. این سیستم که با نام وایمکس شناخته می‌شود، یک سیستم بی‌سیم است که توسط استاندارد IEEE 802.16 طراحی شده است. این برای ارائه یک جایگزین بی‌سیم برای مصرف‌کنندگان برای اتصالات اینترنت پهن باند توسعه یافته است. این اتصالات اکنون تحت سلطه تلویزیون کابلی و DSL هستند، اما با استاندارد جدید WiMAX، ارائه دهندهای خدمات اینترنت بی‌سیم (WISP) ممکن است به‌زودی اتصالات پهن باند بی‌سیم را ارائه دهند.

استاندارد اولیه با نام IEEE 802.16-2004 یا 802.16d شناخته می‌شود. کاربردهای اولیه آن به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: نقطه به نقطه (P2P) یا نقطه به چند نقطه^{۲۲} (PMP). حالت P2P برای کاربردهایی است که نیاز به انتقال داده بین دو نقطه دارند. نمونه‌های متداول عبارتند از بکهال سایت سلولی از یک ایستگاه پایه به سوئیچینگ دفتر یا اتصالات نقطه اتصال ISP به Wi-Fi هر دوی این کاربردها معمولاً به اتصالات T1 یا T3 بی‌سیم کشی شده مตکی هستند که بسیار گران هستند. یک لینک بکهال بی‌سیم بسیار ارزان‌تر است، نه اینکه نصب آن آسان‌تر باشد.

حال PMP یک حالت پخش از یک ایستگاه پایه مرکزی به چندین گره اطراف است. در این حالت، وایمکس به عنوان WISP برای خانه‌ها یا مشاغل عمل می‌کند. در هر دو حالت، سرویس ثابت فرض می‌شود. یعنی هیچ یک از گره‌ها متحرک نیستند.

وایمکس به گونه‌ای طراحی شده است که در هر نقطه‌ای در محدوده ۲ تا ۶ گیگاهرتز هرجا که طیف مناسب در دسترس باشد کار کند. این طیف بسته به مکان و کشور میزبان ممکن است دارای مجوز یا بدون مجوز باشد. رایج‌ترین باندها ۲/۳، ۲/۵ و ۵/۸ گیگاهرتز در ایالات متحده و ۳/۵ گیگاهرتز در اروپا، آسیا و کانادا هستند.

^{۲۱} Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC)

^{۲۲} Point-to-Point (P2P)

^{۲۳} Point-to-multipoint (PMP)

حداکثر سرعت داده ۷۵ مگابیت در ثانیه است، اما معمولاً بین تعداد زیادی از کاربران تقسیم می‌شود. سرعت بر اساس پهنانی باند تنظیم می‌شود که می‌تواند از ۱/۷۵ تا ۲۰ مگاهرتز باشد. پهنانی باند و سرعت را به کاربران بر اساس نیاز آنها اختصاص می‌دهد و بر اساس آن هزینه را شارژ می‌کند. حداکثر برد یک ایستگاه پایه منفرد حدود ۳۰ مایل است، اگرچه در یک سیستم عملی یک ایستگاه پایه معمولاً فقط محدوده ۲ تا ۱۰ کیلومتر (۱/۲۵ تا ۶/۲۵ مایل) را پوشش می‌دهد. دوبلکس کامل با استفاده از تقسیم زمان دوبلکس (TDD) یا تقسیم فرکانس دوبلکس (FDD) توسط استاندارد پشتیبانی می‌شود. یکی یا دیگری بر اساس برنامه کاربردی و طیف و خدمات موجود انتخاب می‌شود. وایمکس از یک سیستم OFDM 256 حامل با مدولاسیون تطبیقی استفاده می‌کند. OFDM یک روش برتر است که مشکلات خط دید (LOS) را که در سرویس دهی به یک منطقه بزرگ رخ پیش می‌آید، کاهش می‌دهد. انعکاس از ساختمان‌ها و سازه‌های دیگر باعث مشکلات چند مسیری می‌شود که می‌تواند انتقال را متوقف کند. درختان و خانه‌ها می‌توانند سیگنال را جذب کنند و دریافت را ضعیف یا وجود نداشته باشند. با این حال OFDM به کاهش این مشکلات کمک می‌کند. روش مدولاسیون هر کanal OFDM به طور خودکار بسته به محدوده، نویز و نرخ داده انتخاب می‌شود. این استاندارد از QPSK، BPSK، 16-QAM، 64-QAM و 256-QAM پشتیبانی می‌کند. BPSK برای برد طولانی‌تر و سرعت‌های پایین‌تر انتخاب می‌شود. 64-QAM یا 256-QAM برای بازه‌های کوتاه‌تر انتخاب می‌شود تا سرعت بالاتری داشته باشد.

نسخه موبایل وایمکس اکنون در دسترس است. استاندارد IEEE 802.16e 2005 است. این استاندارد به ونهای طراحی شده است که به گره‌ها اجازه می‌دهد در حین حفظ تماس با ایستگاه پایه، متحرک باشند. به عنوان مثال یک لپ‌تاپ مجهز به وایمکس در قطار شهری یا ماشین یا کامپیون است. حداکثر برد حدود ۳ مایل است، اما این به محیط و زمین بستگی دارد. سرعت‌هایی تا حدود ۷۵ مایل در ساعت قابل استفاده است. نرخ داده‌ها با محیط و محدوده سازگار است اما در شرایط ایده‌آل می‌تواند حداکثر به ۱۵ مگابیت در ثانیه برسد. IEEE 802.16e از ۲۰۴۸ کanal OFDMA برای دستیابی به این ویژگی‌ها استفاده می‌کند. روش دسترسی OFDMA (دسترسی) است که در آن سیگنال OFDMA کanal ۲۰۴۸ بین چندین کاربر تقسیم می‌شود. با اختصاص ۶۴ کanal به هر مشترک، یک پهنانی باند OFDMA می‌تواند حداکثر ۳۲ کاربر را در خود جای دهد.

اگرچه وایمکس یک فناوری بی‌سیم به‌خوبی توسعه یافته و اثبات شده است، اما LTE آن را تحت الشاعع قرار داده است. LTE از بسیاری جهات مشابه WiMAX است، به خصوص TD-LTE، زیرا هر دو از OFDMA و TDD استفاده می‌کنند. اکثر شرکت‌های تلفن همراه و ارائه‌دهندگان خدمات اینترنت LTE را انتخاب کرده‌اند و آینده‌ای مبهم برای وایمکس باقی می‌گذارند.

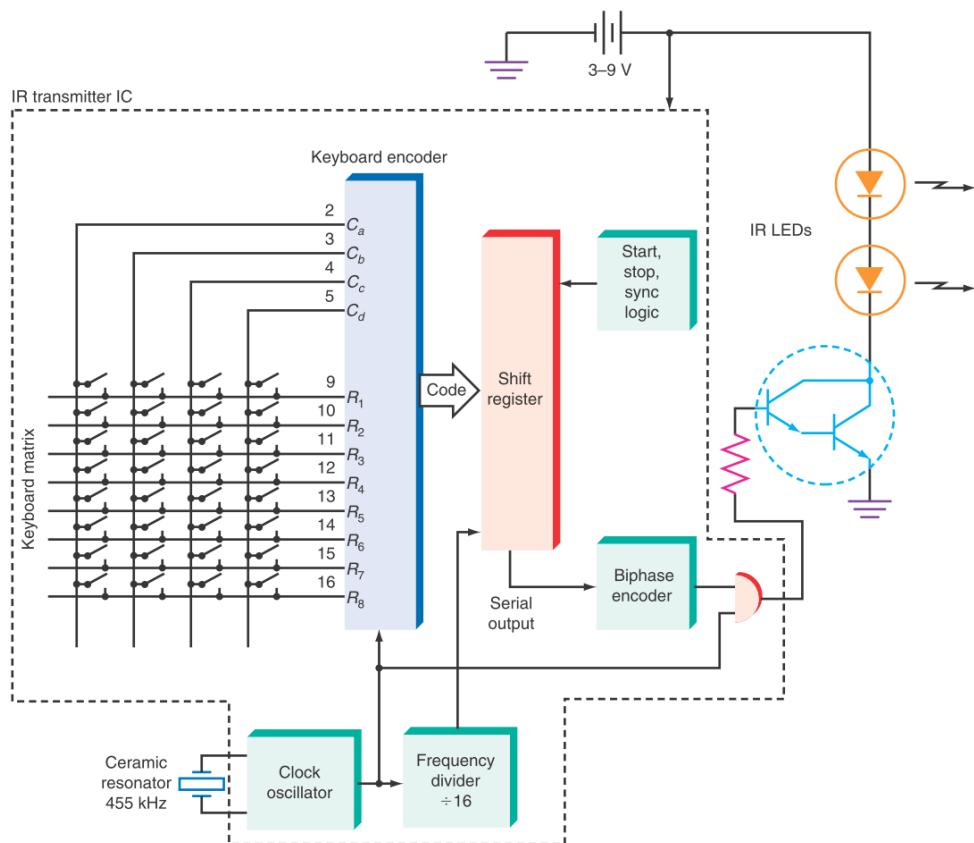
۵.۲۱ بی‌سیم مادون قرمز

شاید گسترده‌ترین سیستم بی‌سیم از نور مادون قرمز برای ارتباط داده در فاصله کوتاه استفاده می‌کند. رایج‌ترین مثال، کنترل از راه دور بی‌سیم تقریباً در تمام تلویزیون‌ها، پخش کننده‌های DVD و اکثر سیستم‌های استریو CD صوتی است. این ویژگی استاندارد در اکثر محصولات الکترونیکی مصرفی به قدری رایج است که بدیهی تلقی می‌شود. مادون قرمز برای PAN‌های بی‌سیم نیز استفاده شده است. از آنجا که نور در خطوط مستقیم حرکت می‌کند، باید یک مسیر روشن از فرستنده به گیرنده وجود داشته باشد تا سیستم کار کند. علاوه بر این، نور مانند رادیو بی‌سیم به دیوارها، کف‌ها و سقف‌ها

نفوذ نمی‌کند، بنابراین شبکه‌های IR LAN کاربردی نیستند. با این حال، PAN‌های بی‌سیم به طور گسترده‌ای برای پیوند دادن لپ‌تاپ‌ها، کامپیوترهای شخصی و PDA‌هایی مانند Palm Pilots استفاده می‌شوند. این بخش به بررسی محبوب‌ترین سیستم‌های بی‌سیم IR می‌پردازد.

کنترل از راه دور تلویزیون

تقریباً هر تلویزیونی که این روزها فروخته می‌شود، صرف نظر از اندازه یا هزینه، دارای یک کنترل از راه دور بی‌سیم است. سایر محصولات الکترونیکی مصرفی دارای کنترل از راه دور از جمله VCR‌ها، مبدل‌های تلویزیون کابلی، پخش کننده‌های CD و DVD، سیستم‌های صوتی استریو و برخی رادیوهای معمولی هستند. کنترل از راه دور عمومی برای اتصال به هر دستگاهی که می‌خواهد از راه دور کنترل کنید در دسترس هستند.



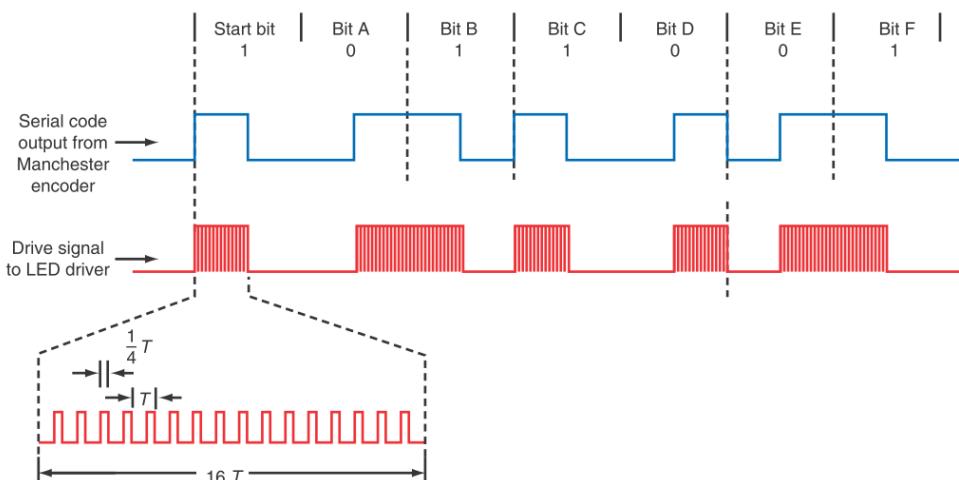
شکل ۵.۲۱: فرستنده کنترل از راه دور تلویزیون مادون قرمز.

همه این دستگاه‌ها بر اساس یک اصل اساسی کار می‌کنند. یک واحد کوچک با باتری دستی یک کد دیجیتال سریال را از طریق یک پرتو IR به گیرنده‌ای ارسال می‌کند که آن را رمزگشایی می‌کند و عمل خاص تعریف شده توسط کد را انجام می‌دهد. کنترل از راه دور تلویزیون یکی از پیچیده‌ترین این کنترل‌ها است، زیرا برای انجام کنترل صدا، انتخاب کanal و سایر عملکردها به کدهای زیادی نیاز دارد.

شکل (۵.۲۱) یک بلوک دیاگرام کلی از یک فرستنده کنترل از راه دور است. در اکثر واحدهای مدرن، تمام مدارها، به جز ترانزیستورهای درایور IR LED، در یک آی سی واحد قرار دارند. هدف فرستنده تبدیل ورودی صفحه کلید به یک کد باینری سریالی است که توسط IR به گیرنده ارسال می‌شود.

صفحه کلید ماتریسی از دکمه‌های فشاری تک قطبی تک قطبی تماس لحظه‌ای^{۲۴} (SPST) است. ترتیب نشان داده شده به صورت هشت سطر و چهار ستون سازماندهی شده است. اتصالات سطر و ستون به مدار رمزگذار صفحه کلید در داخل آی سی ایجاد می‌شود. پالس‌های تولید شده در داخل به خطوط ستون اعمال می‌شود. هنگامی که یک کلید فشرده می‌شود، پالس‌های یکی از خروجی‌های ستون به یکی از ورودی‌های ردیف متصل می‌شوند. مدار رمزگذار این ورودی را به یک کد باینری منحصر به فرد تبدیل می‌کند که یک عدد برای انتخاب کانال یا برخی عملکردها مانند کنترل صدا را نشان می‌دهد. برخی از رمزگذارها تنها ۶ بیت و برخی دیگر تا ۳۲ بیت کد تولید می‌کنند. همچنین کدهای ۹ و ۱۰ بیتی بسیار رایج هستند.

خروچی سریالی توسط شیفت رجیستر با جابجایی داده‌ها به بیرون تولید می‌شود. یک کد سریالی استاندارد بدون بازگشت به صفر (NRZ) تولید می‌شود. این معمولاً برای یک رمزگذار سریالی برای تولید یک کد دوفاز یا منچستر استاندارد اعمال می‌شود. بهاید بیاورید که کد دوفاز انتقال و دریافت قابل اطمینان‌تری را فراهم می‌کند زیرا برای هر انتقال $0 \rightarrow 1$ یا $1 \rightarrow 0$ یک تغییر سیگنال وجود دارد. نرخ بیت واقعی معمولاً در محدوده $30 \text{ تا } 70 \text{ کیلوبیت بر ثانیه}$ است.



شکل ۶.۲۱: شکل موج پالس در فرستنده کنترل از راه دور مادون قرمز.

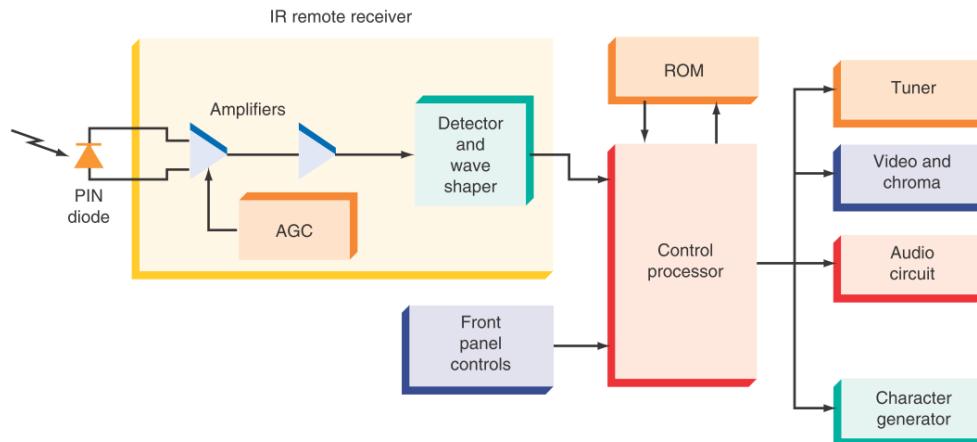
جریان بیت سریالی یک منبع پالس با فرکانس بالاتر را مطابق با 1s و 0s باینری کد خاموش و روشن می‌کند. آی سی فرستنده حاوی یک نوسانگر ساعت است که در فرکانس $445 \text{ تا } 510 \text{ کیلوهرتز}$ کار می‌کند. یک واحد معمولی با فرکانس 455 کیلوهرتز کار کرده و از یک تشید کننده سرامیکی خارجی برای تنظیم فرکانس استفاده می‌کند. داده‌های سریالی، پالس‌های 455 کیلوهرتز را خاموش و روشن می‌کند. برای مثال، یک باینری 1 ضربه‌ای از 16 پالس 455 کیلوهرتز تولید می‌کند، همانطور

^{۲۴}Single Pole Single Throw (SPST)

که در شکل (۶.۲۱) نشان داده شده است. هنگامی که یک باینری در قطار داده رخ می‌دهد، هیچ پالسی منتقل نمی‌شود. شکل یک کد ۶ بیتی (۱۱۰۰۱۰) را با یک پالس شروع نشان می‌دهد. دوره T پالس‌های ۴۵۵ کیلوهرتز ۲/۲ میکرو ثانیه است. عرض پالس برای چرخه کاری حدود ۲۵ درصد یا T/4 تنظیم شده است.

اگر ۱۶ پالس یک بازه ۱ باینری را تشکیل دهند، این مدت زمان $2/2 \times 16 = 32$ میکرو ثانیه است. این به نرخ بیت کد $6^{-1} = 10 \times 32/2 = 1/4$ یا ۲۸/۴۱۰ کیلوهرتز منتقل می‌شود.

پالس‌های ۴۵۵ کیلوهرتز منبع نور IR را با خاموش و روشن کردن آن مدوله می‌کنند. منبع IR معمولاً یک یا چند LED IR است. همانطور که در شکل (۵.۲۱) نشان داده شده است، اینها توسط یک زوج ترانزیستور دارلینگتون خارج از آی‌سی هدایت می‌شوند. دو یا چند LED برای اطمینان از سطح کافی تابش IR به گیرنده در تلویزیون استفاده می‌شود. جریان LED معمولاً بسیار زیاد است و سطح خروجی IR بالایی را برای انتقال مطمئن به گیرنده می‌دهد. برخی از واحدهای راه دور از سه LED برای سیگنال انتقال با زاویه باز استفاده می‌کنند تا سیگنالی با دامنه بالا بدون توجه به جهتی که کنترل از راه دور در آن قرار گرفته است دریافت شود.



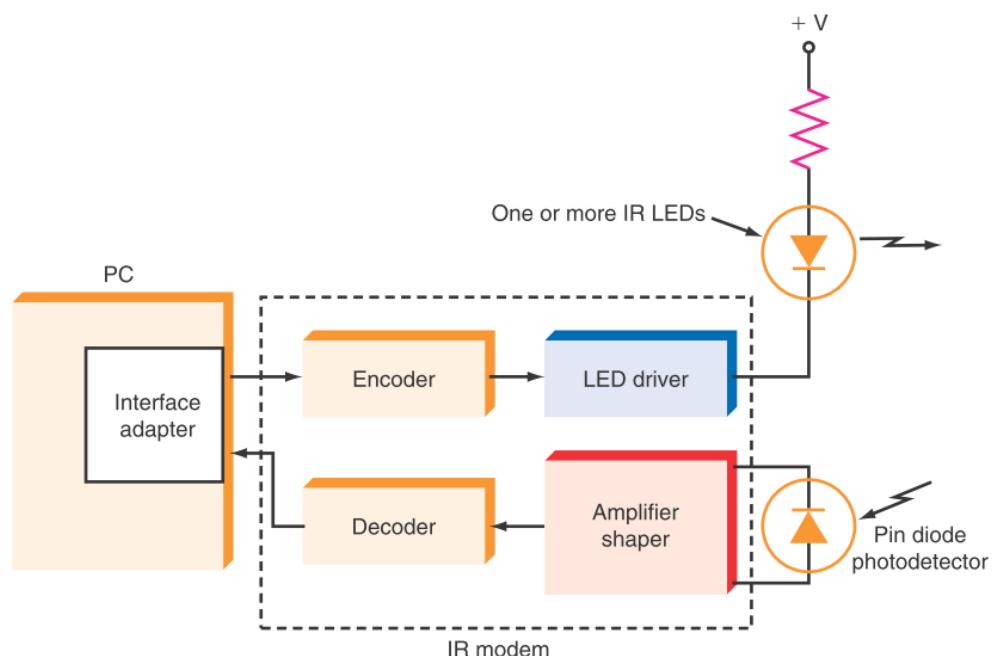
شکل ۷.۲۱: گیرنده IR و ریزپردازنده کنترل.

یک گیرنده IR در شکل (۷.۲۱) نشان داده شده است. فتودیود IR در جلوی تلویزیون نصب شده است، جایی که سیگنال IR را از فرستنده دریافت می‌کند. سیگنال دریافتی با وجود این واقعیت که فاصله بین فرستنده و گیرنده به طور متوسط تنها ۶ تا ۱۵ فوت است بسیار کوچک است. دو یا چند تقویت کننده با بهره بالا سطح سیگنال را افزایش می‌دهند. اکثر مدارها دارای نوعی کنترل بهره خودکار (AGC) هستند. پالس‌های ورودی شناسایی می‌شوند، شکل می‌گیرند و به قطار داده سریالی اصلی تبدیل می‌شوند. سپس این داده‌های سریالی توسط میکرو کامپیوتر کنترلی که معمولاً بخشی از گیرنده تلویزیون است خوانده می‌شود.

میکروکنترلر یک میکرو کامپیوتر اختصاصی است که در هر تلویزیون تعییه شده است. یک برنامه کنترل اصلی در یک ROM ذخیره می‌شود. میکرو کامپیوتر ورودی‌های کنترل از راه دور و کنترل‌های پنل جلویی را به سیگنال‌های خروجی تبدیل می‌کند که عملکردهای مختلف یک تلویزیون مانند انتخاب کanal و کنترل صدا را کنترل می‌کنند.

میکروکنترلر سیگنال ورودی را وارد و رمزگشایی می‌کند و سپس سیگنال‌های کنترل خروجی را به تمام مدارهای دیگر صادر می‌کند: سینتی‌سایزر فرکانس PLL که تیونر تلویزیون را کنترل می‌کند، مدارهای کنترل صدا در بخش صدا، و در گیرندهای پیشرفته‌تر، کرومای ویدئو مانند رنگ، اشباع، روشنایی و کنتراس است. میکروکنترلر همچنین گاهی اوقات با کمک یک آی‌سی خارجی، کاراکترها و گرافیک‌های ساده‌ای را تولید می‌کند که می‌تواند روی صفحه نمایش داده شود. اکثر میکروکنترلرها دارای یک ساعت داخلی نیز هستند.

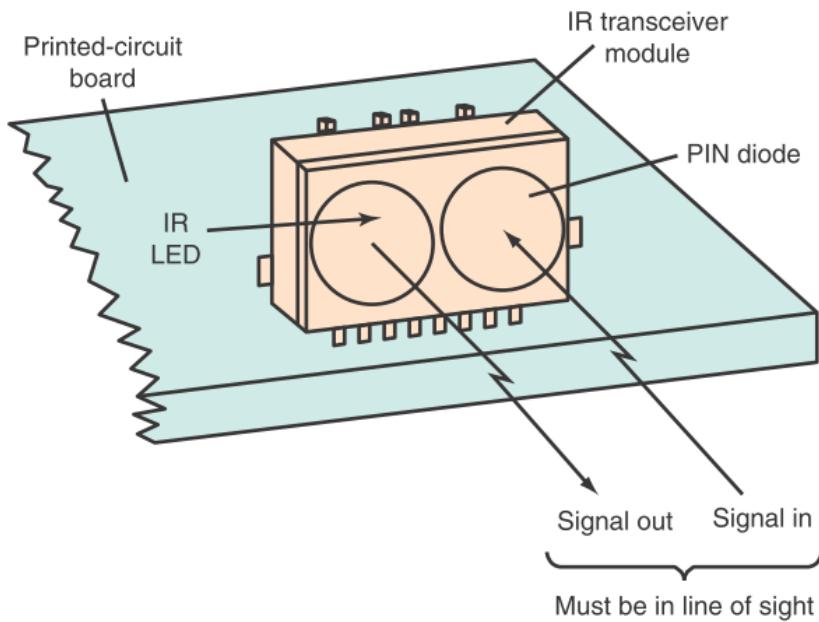
کنترل‌های IR هنوز به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و همچنان خواهند بود. با این حال، آنها به تدریج با یک نسخه رادیویی مبتنی بر ZigBee به نام RF4CE یا فرکانس رادیویی برای لوازم الکترونیکی مصرفی جایگزین می‌شوند. ریموت‌های RF4CE برد بیشتری دارند و نیازی به جهت‌گیری خط دید ندارند. علاوه بر این آنها توانایی ارتباط دو طرفه با دستگاه کنترل شده را اضافه می‌کنند. برخی از محصولات از RF4CE و IR استفاده می‌کنند.



شکل ۸.۲۱: فرستنده LAN بی‌سیم IR

PAN‌های مادون قرمز

علاوه بر کنترل از راه دور، کاربرد اصلی برای ارتباطات داده IR در پیوندهای فاصله کوتاه بین کامپیوترها و سایر دستگاه‌ها است. برای IR فاصله کوتاه معمولاً تا ۱ متر است. تحت برخی شرایط خاص، فاصله حداقل تا ۹ متر قابل افزایش است. و باید بین فرستنده و گیرنده یک خط دید واضح وجود داشته باشد. از آنجایی که بسیاری از گزینه‌های رادیویی کوتاه برد، مانند بلوتوث و ZigBee برد بهتر و مزایای دیگر را ارائه می‌دهند، IR دیگر به عنوان یک فناوری بی‌سیم به طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. با این حال، ممکن است در عملیات‌های تخصصی کاربرد پیدا کند که در آن مزایای IR فاکتورهای مهمی هستند.



شکل ۹.۲۱: مژول فرستنده گیرنده مادون قرمز.

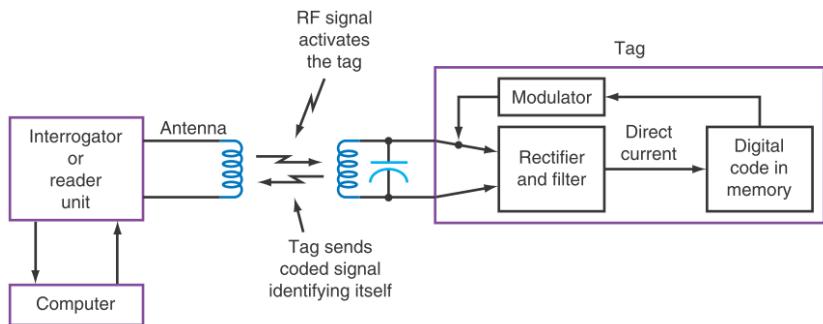
شکل (۸.۲۱) یک بلوک دیاگرام از یک گیرنده IR را نشان می‌دهد. بهمداد رابط در کامپیوتر شخصی یا دستگاه دیگر متصل می‌شود. رابط معمولاً یک کنترلر جاسازی شده کوچک در داخل کامپیوتر یا دستگاه است. رمزگذار داده‌های دیجیتال سریالی را از کامپیوتر شخصی در قالب مناسب برای انتقال قرار می‌دهد. یک ترانزیستور دوقطبی با جریان بالا یا ماسفت یک یا چند LED IR را هدایت می‌کند. گیرنده از دیود پین تشکیل شده است که نور مادون قرمز را از فرستنده نزدیک می‌گیرد. سیگنال تقویت شده و شکل می‌گیرد و سپس به رمزگشا ارسال می‌شود که داده‌های اصلی را بازیابی می‌کند. شکل (۹.۲۱) آرایش فیزیکی مژول فرستنده گیرنده را نشان می‌دهد. این شامل دیودهای LED و PIN به همراه مدار مربوطه است. دیود LED و PIN در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و حدود ۵٪ تا ۱ در فاصله از هم قرار گرفته‌اند.

یک سیستم محبوب برای سیستم ارتباط داده IR وجود دارد که توسط هیولت پاکارد در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت. از آن زمان بهیک استاندارد بین المللی تبدیل شده است که توسط انجمان داده‌های مادون قرمز (IrDA) حفظ می‌شود. رابط و سیستم کامل به عنوان IrDA نامیده می‌شود. سیستم‌ها برای برد کوتاه طراحی شده‌اند. محدوده معمولی حدود یک متر است.

در مورد سرعت داده، استاندارد اصلی سرعت تا $115/2$ کیلوبیت بر ثانیه را پشتیبانی می‌کند. اکثر سیستم‌ها از سرعت کمتر از $2/4$ کیلوبیت در ثانیه استفاده می‌کردن، اگرچه 9600 bps بسیار رایج بود. نسخه‌های مختلف از سرعت ۵۷۶ کیلوبیت بر ثانیه و $1/152$ مگابیت در ثانیه تا 4 مگابیت در ثانیه پشتیبانی می‌کنند که رایج‌ترین نسخه IrDA است. نسخه‌های جدیدتر نرخ‌های پشتیبانی استاندارد ۱۶ مگابیت بر ثانیه، ۹۶ مگابیت در ثانیه، ۵۱۲ مگابیت در ثانیه، یک گیگابیت در ثانیه، ۵ گیگابیت در ثانیه و ۱۰ گیگابیت بر ثانیه. IrDA به اندازه فناوری‌های RF به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

۶.۲۱ شناسایی فرکانس رادیویی و ارتباطات میدان نزدیک

یکی دیگر از تکنیک‌های رو بهرشد بی‌سیم، شناسایی فرکانس رادیویی (RFID) است. می‌توانید آن را به عنوان نسخه بی‌سیم بارکدها در نظر بگیرید. این فناوری از برچسب‌ها یا برچسب‌های نازک و ارزان قیمت حاوی مدارهای رادیویی غیرفعال استفاده می‌کند که می‌تواند توسط یک واحد بازجویی بی‌سیم از راه دور جستجو شود. برچسب‌ها به هر مردمی که قرار است نظارت، ردیابی، دسترسی، مکان‌یابی یا شناسایی شود، متصل می‌شوند. برچسب‌های RFID به طور گسترده در کنترل موجودی، حمل و نقل کانتینر و بسته، تجهیزات سرمایه و سایر مدیریت دارایی‌ها، جایجایی چمدان‌ها، و ساخت و ردیابی خط تولید استفاده می‌شود. آنها همچنین به طور گسترده برای جمع آوری عوارض خودکار و دسترسی به پارکینگ وسائل نقلیه استفاده می‌شوند. از دیگر کاربردهای تگ‌های RFID می‌توان به بررسی امنیتی پرسنل و دسترسی، ردیابی حیوانات و جلوگیری از سرفت اشاره کرد. با توسعه فناوری، قیمت‌ها کاهش یافته و بسیاری از برنامه‌های کاربردی جدید کشف شده‌اند.



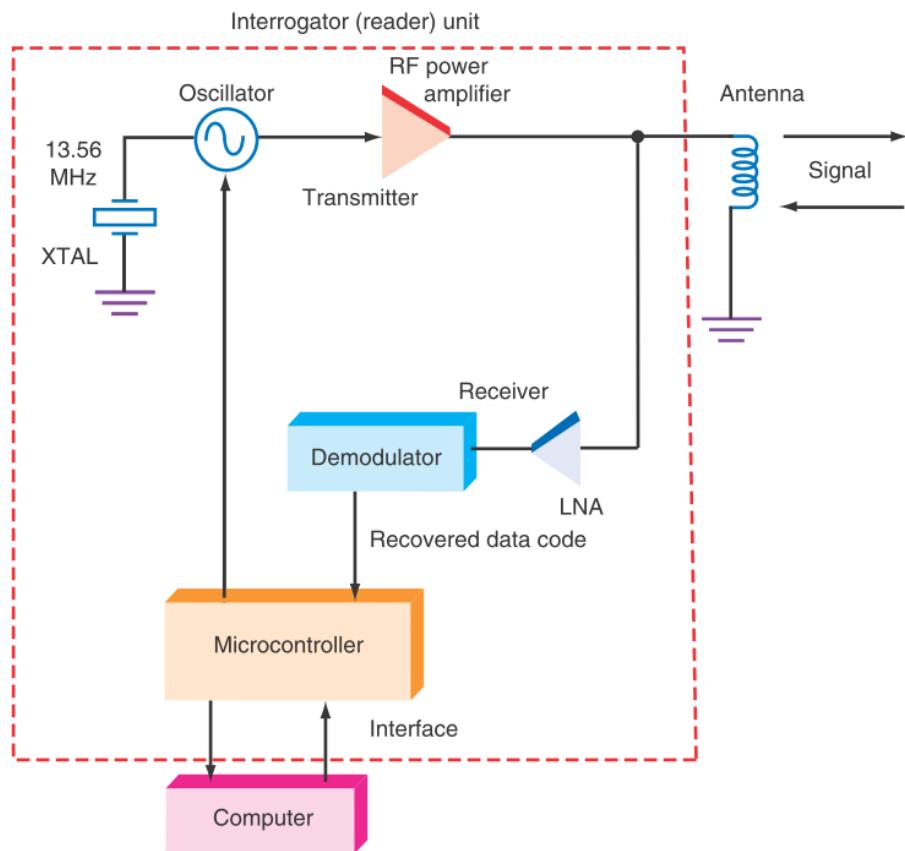
شکل ۱۰.۲۱: مفهوم اساسی و اجزای یک سیستم RFID

مفهوم اصلی RFID در شکل (۱۰.۲۱) نشان داده شده است. تگ یک دستگاه برچسب مانند بسیار نازک است که در آن یک گیرنده و آنتن رادیویی تک تراشه غیرفعال ساده تعییه شده است. این تراشه همچنین حاوی حافظه‌ای است که یک کد شناسه دیجیتال منحصر به فرد مورد برچسب را ذخیره می‌کند. برای شناسایی آیتم، باید از کنار واحد بازجویی یا خواننده عبور کند، یا واحد خواننده باید به صورت فیزیکی به مکانی نزدیک کالا برود. سیستم‌های برد بلندتر یک ساختمان یا منطقه کامل را پوشش می‌دهند. واحد خواننده یک سیگنال رادیویی را ارسال می‌کند که ممکن است از چند اینچ تا بیش از ۱۰۰ فوت یا بیشتر حرکت کند. سیگنال رادیویی به اندازه کافی قوی است که برچسب را فعال کند. تگ سیگنال RF را به جریان مستقیمی که فرستنده گیرنده را کار می‌کند، تصحیح و فیلتر می‌کند. این یک فرستنده کم مصرف را فعال می‌کند که سیگنالی را به همراه کد شناسه تعییه شده به واحد بازپرس ارسال می‌کند. سپس خواننده کامپیوتر متصل خود را بررسی کرده، جایی که وجود مورد را یادداشت می‌کند و ممکن است سایر وظایف پردازشی مرتبط با برنامه را انجام دهد.

سیستم‌های RFID در طیف کامل رادیویی کار می‌کنند. سیستم‌های تجاری برای کارکردن از ۵۰ کیلوهرتز تا ۲/۴ گیگاهرتز ساخته شده‌اند. محبوب‌ترین محدوده‌ها ۱۲۵ کیلوهرتز، ۱۳/۵۶ مگاهرتز،

^{۲۵}Radio Frequency Identification (RFID)

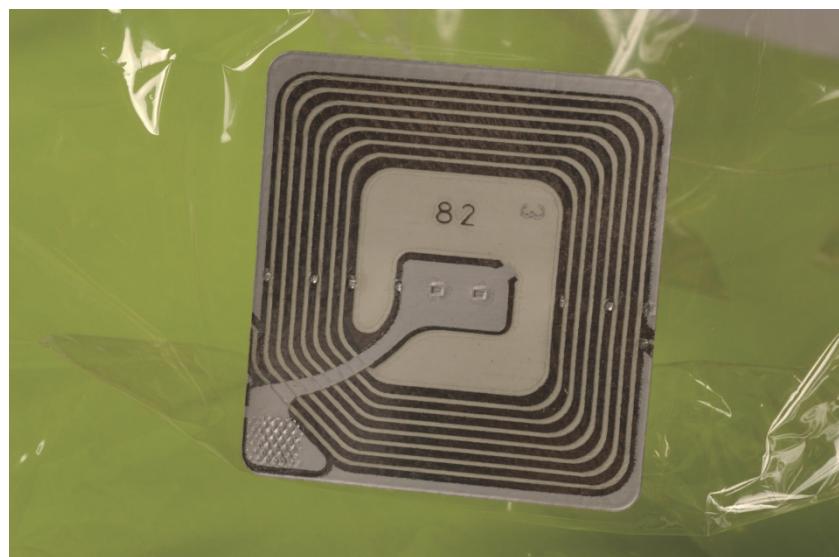
۹۰۲ تا ۹۲۸ مگاهرتز و ۲/۴۵ گیگاهرتز هستند. واحدهای ۱۲۵ کیلوهرتز و ۱۳/۵۶ مگاهرتز فقط در فواصل کوتاه تا چند فوت کار می‌کنند، در حالی که واحدهای ۹۰۲ مگاهرتز و ۲/۴۵ گیگاهرتز می‌توانند تا حدود ۱۰۰ فوت کار کنند. اکثر برچسب‌ها غیرفعال هستند. یعنی هیچ منبع برقی از خود ندارند. آنها برای تامین یک سیگنال RF به‌اندازه کافی بزرگ برای تصحیح برق dc به واحد بازپرس متکی هستند. با این حال، برخی از تگ‌های فعال حاوی باتری‌های تخت کوچک در دسترس هستند و می‌توانند در محدوده بسیار بزرگ‌تری کار کنند.



شکل ۱۱.۲۱: بلوک دیاگرام پرسش کننده RFID

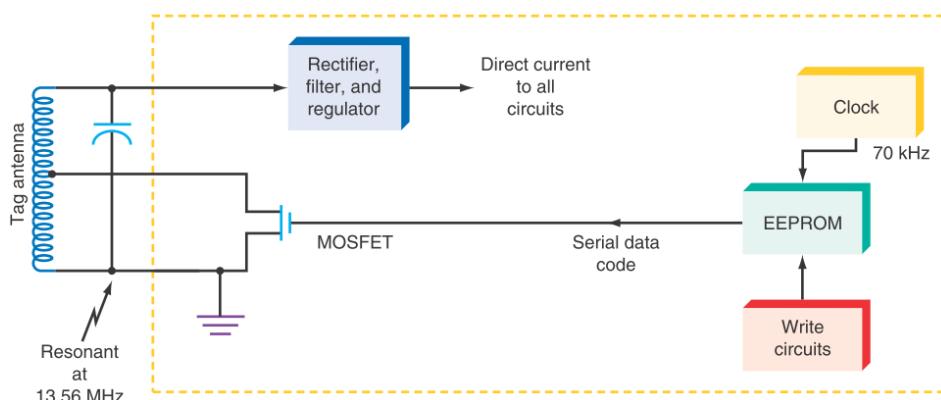
شکل (۱۱.۲۱) بلوک دیاگرامی از یک واحد بین پرسش کننده RFID معمولی ۱۳/۵۶ مگاهرتز را نشان می‌دهد. یک نوسان‌ساز کریستالی ۱۳/۵۶ مگاهرتز سیگنال اصلی RF را تولید می‌کند که تقویت شده و به آنتن ارسال می‌شود. یک میکروکنترلر برای مدت کوتاهی نوسانگر را روشن کرده و سپس گیرنده منتظر پاسخ از تگ می‌ماند. آنتن سیگنال ضعیف تگ را دریافت می‌کند. گیرنده آن را تقویت و دمودوله و سپس کد داده سریالی را بازیابی می‌کند. میکروکنترلر با کامپیوتر متصل شده ارتباط برقرار می‌کند تا هر پردازشی را که در فرآیند ID لازم است انجام دهد.

برخی از پیکربندی‌های برچسب RFID در شکل (۱۲۲۱) نشان داده شده است. آنها از یک سلف مارپیچ تخت و یک خازن تشکیل شده‌اند که یک مدار هماهنگی با فرکانس ۱۳/۵۶ مگاهرتز را



شکل ۱۲.۲۱: پیکربندی تگ RFID

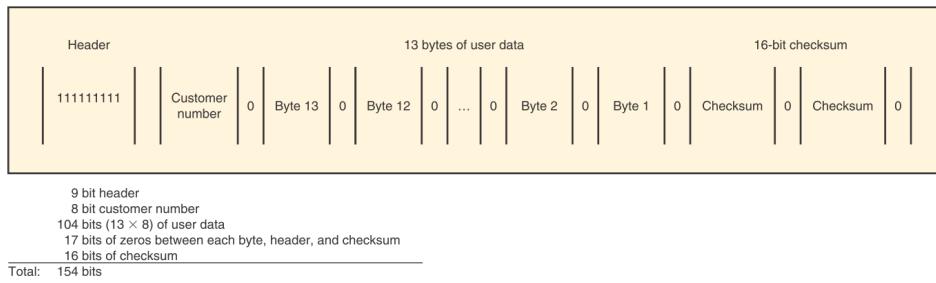
تشکیل می‌دهند که به عنوان آنتن عمل می‌کند. تراشه فرستنده گیرنده در نقطه سیاه روی برقسپ قرار دارد. بلوک دیاگرام مدار در شکل (۱۳.۲۱) آورده شده است. یک برقسپ معمولی مدل MCRCF ۳۶۰y۳۵۵ است که محصول شرکت Microchip Technology Inc. هنگامی که ولتاژ به حدود ۴ ولت اوج تا اوج می‌رسد، مدارهای قدرت فعال می‌شوند. RF در یک مدار ضرب‌کننده ولتاژ یکسو می‌شود، فیلتر و به جریان مستقیمی تنظیم می‌شود که مدارهای باقی مانده را به کار می‌گیرد.



شکل ۱۳.۲۱: بلوک دیاگرام تگ RFID

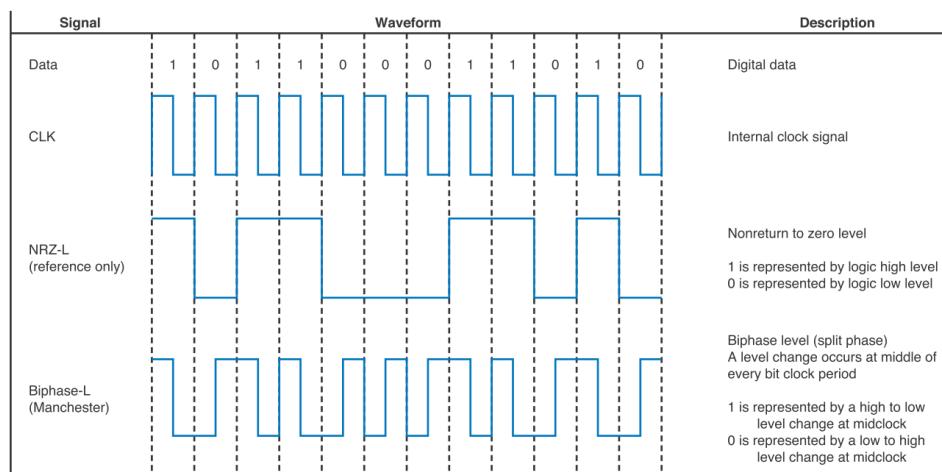
کد شناسه منحصر به فرد در یک حافظه فقط خواندنی قابل برنامه ریزی (EEPROM)^{۲۶} قابل پاک کردن الکتریکی در تراشه برقسپ ذخیره می‌شود. در این دستگاه کد ۱۵۴ بیتی است. شکل

^{۲۶}Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM)



شکل ۱۴.۲۱: قالب بسته‌های کدگذاری شده توسط برچسب بهخواننده منتقل می‌شود.

(۱۴.۲۱) فرمت بسته ارسال شده بهخواننده را نشان می‌دهد. هدر ۹ بیتی همگام‌سازی (سنکرون) را در گیرنده خواننده برای بازیابی ساعت آغاز می‌کند. شماره شناسه منحصر به فرد مشتری با ۱۳ بایت کدگذاری شده است. چک‌سوم بررسی خطای خواننده فراهم می‌کند. کد توسط سازنده با یک فرستنده تماسی در تراشه ذخیره می‌شود که تراشه را فعال می‌کند و کد را در حافظه می‌نویسد. تراشه برچسب حاوی مدار نوشتن EEPROM است که کد را ذخیره می‌کند.



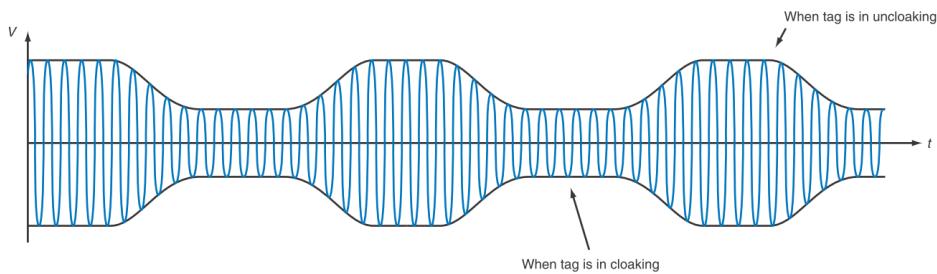
شکل ۱۵.۲۱: شکل موج داده در تگ سیگنال کد منجستر، ترانزیستور پوشاننده را کار می‌کند.

کد ID در EEPROM به صورت سریال در قالب داده NRZ خواننده و سپس به سیگنال منجستر یا دو فاز تبدیل می‌شود که برای مدوله کردن حامل ارسال بهخواننده استفاده می‌شود، شکل (۱۵.۲۱). از کد منجستر استفاده می‌شود تا بتوان ساعت را به راحتی از داده‌های موجود در خواننده بازیابی کرد. سرعت داده معمولاً ۷۰ کیلوبیت بر ثانیه است. با زمان بیت $14/28s = 10^3 \times 1/70 = 154$ ، انتقال کد بیتی به $14/28s = 2200s$ یا $2/2ms$ دارد.

مدولاسیون مورد استفاده شکلی از مدولاسیون دامنه به نام مدولاسیون پس پراکندگی^{۲۷} است. مدار در شکل (۱۳.۲۱)، و فرآیند در شکل (۱۶.۲۱) نشان داده شده است. سیم‌پیچ در مدار آتن

^{۲۷} Backscatter modulation

هماهنگی خارجی ضربه زده می‌شود. یک ترانزیستور سوئیچینگ ماسفت به آن سر داخل تگ متصل است. داده‌هایی که قرار است منتقل شوند به این ترانزیستور اعمال می‌شود. هنگامی که ترانزیستور خاموش است، حامل بهمدار هماهنگی ارسال و به خواننده ارسال می‌شود، که سیگنال را به عنوان باينری ۱ می‌خواند. هنگامی که ترانزیستور روشن می‌شود، بخشی از سیم‌پیچ کوتاه و مدار هماهنگی خارجی را به تشديد، در فرکانس $3\text{~T}\alpha 4$ مگاهرتز بالاتر از فرکانس طراحی 13.56 مگاهرتز آن، واميدارد. اين سیگنال خارج از محدوده فرکانس خواننده است، بنابراین سیگنال سطح بسيار پايین تری دريافت می‌کند که به صورت دودوبي تفسير می‌شود. در طول مدته که ترانزیستور روشن است، گفته می‌شود سیگنال در حال پنهان‌سازی است. با خاموش بودن ترانزیستور، سیگنال باز می‌شود. فرآيند پنهان‌كاری uncloaking و cloaking باعث ايجاد کليزني تغيير دامنه (ASK) در گيرنده خواننده می‌شود، شكل (۱۶.۲۱). در برخى از سистемها، مدار هماهنگی برچسب به صورت سيم‌پیچ ثانويه ترانسفورماتور عمل



شکل ۱۶.۲۱: سیگنال RF در خواننده که ASK را با پوشاندن نشان می‌دهد.

مي‌کند که در آن آنتن خواننده سيم‌پیچ اوليه است. پالس‌های دودوبي که يايد ارسال شوند، اميدانس آنتن برچسب را تغيير می‌دهند و اين بهنوبه خود باعث تغيير دامنه در خواننده می‌شود. همانطور که داده‌های برچسب خواننده می‌شوند، فرآيند آنتن برچسب سيم‌پیچ ثانويه را بارگيري و تخلیه می‌کند و باعث ايجاد اميدانس منعكس شده به آنتن خواننده می‌شود. يک حامل معمولی ممکن است دامنه اوج تا اوج 100 ولت داشته باشد که با انتقال داده توسط تگ چندين صد ملي ولت جابجا می‌شود. يک آسكارساز پيك سیگنال را بازيابي می‌کند.

جديدترین استاندارد جديد RFID Gen 2 برای نسل دوم نام دارد. اين استاندارد است که توسط بيش از 60 شركت در سراسر جهان توسعه یافته است. اين استاندارد تحت نظارت EPCGlobal است، سازمانی که همچينين کد محصول الکترونیکی (EPC) را برای استفاده در تمام موارد برچسب گذاري شده استاندارد می‌کند. استاندارد Gen 2 در محدوده 900 مگاهرتز با فرکانس‌های متفاوتی که در كشورهای مختلف بسته به مقررات محلی استفاده می‌شود، کار می‌کند. فرکانس 868 مگاهرتز در اروپا رايج است در حالی که 915 مگاهرتز در ایالات متحده رايج است. اين استاندارد از پس پراكندگي ASK استفاده می‌کند و از يك EPC 96 بيتي به اضافه يك کد تصحيح خطای 32 بيتی و يك فرمان kill که يك برچسب را پس از خواندن غيرفعال می‌کند، پشتيباني می‌کند.

يکي از مزاياي کليدي استاندارد جديد اين است که برای خواندن سريعتر چندين برچسب طراحی شده است. نرخ خواندن برچسب تا 1500 تگ در ثانие امكان پذير است، اگرچه در بيشتر موقعياتها نرخ خواندن بيش از 500 تا 1000 تگ در ثانие نخواهد بود، که هنوز بسيار سريعتر از 100 برچسب در ثانие است که توسط استانداردهای قديمی تحويل شده است. تگ‌های Gen 2 همچنین

قوی‌تر هستند و می‌توانند به طور قابل اعتماد در محیطی با چندین خواننده که همزمان ارسال و دریافت می‌کنند، کار کنند. زمینه RFID هنوز جدید است اما با کاهش قیمت برچسب‌ها و توسعه اقدامات امنیتی بیشتر در حال رشد است.

ارتباطات میدان نزدیک

یکی از جدیدترین اشکال بی‌سیم، نسخه‌ای از RFID به نام ارتباطات میدان نزدیک^{۲۸} (NFC) است. این یک بی‌سیم با برد فوق کوتاه است که برد آن به ندرت بیشتر از چند اینچ است. این یک فناوری است که در کارت‌های هوشمند و تلفن‌های همراه برای پرداخت هزینه‌های خرید یا اخذ پذیرش از برخی امکانات استفاده می‌شود. میدان نزدیک به معنای میدان نزدیک یک موج رادیویی است. همانطور که قبلًا گفته شد، یک موج رادیویی از دو میدان الکتریکی و مغناطیسی تشکیل شده است. در فاصله حدود 10° طول موج یا بیشتر در فرکانس کاری، موج رادیویی درست همانطور که معادلات ماسکول آن را توصیف می‌کند. این دو میدان انرژی را مبادله می‌کنند و در حین عبور از آنتن فرستنده به آنتن گیرنده، یکدیگر را تقویت می‌کنند. این به اصطلاح میدان دور است. در فاصله کمتر از 10° طول موج از آنتن فرستنده، میدان نزدیک است که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مجزا در آن وجود دارد. میدان الکتریکی مفید نیست، اما میدان مغناطیسی برای ارتباطات کوتاه برد استفاده می‌شود. راه برای تصور NFC به عنوان میدان مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های یک ترانسفورماتور است. ضریب کوپلینگ به دلیل فاصله زیاد بین سیم‌پیچ اولیه (آنتن فرستنده) و سیم‌پیچ ثانویه (آنتن گیرنده) بسیار پایین است. محدودیت اصلی میدان نزدیک این است که شدت میدان مغناطیسی با سرعتی در حدود $1/d^6$ کاهش می‌یابد، در جایی که فاصله بین دو طرف است. تنها با توان کم، برد بسیار محدود است. میدان دور فقط با نرخ $1/d^2$ کاهش می‌یابد.

NFC در سطح بین المللی استاندارد شده است. این فناوری مشابه با فناوری RFID است. این کارت مشابه و سازگار با فناوری مورد استفاده در کارت‌های هوشمند است، آن دسته از کارت‌های اعتباری با یک تراشه داخلی که به شما امکان می‌دهد فقط با عبور کارت از روی ترمینال خوان نقطه‌فروش (POS) مبلغی را بپردازید.

این استاندارد فرکانس کاری 13.56MHz ، باند مجوز بین المللی و یکی از فرکانس‌های باند ISM Part 15/18 در ایالات متحده را مشخص می‌کند. سرعت انتقال داده 10.6Mbps یا 212Mbps یا 424Mbps بر ثانیه است. سرعت به برد بستگی دارد که حداکثر تا 20 cm سانتی‌متر یا حدود 8 cm بیشتر موارد، محدوده واقعی تنها چند اینچ یا بیشتر از 10 cm سانتی‌متر نخواهد بود.

این استاندارد همچنین حالت فعال و غیرفعال عملکرد را مشخص می‌کند. در حالت فعال، هر دو طرف دارای فرستنده و گیرنده برق هستند. این بدان معنی است که هر گره دارای یک باتری یا منبع تغذیه دیگری است. هر یک از واحدها ممکن است یک انتقال را آغاز کند که نیمه دوطرفه با پروتکل "گوش دادن قبل از ارسال" است. یکی از دستگاه‌ها آغازگر است و دستگاه دیگر به هدف تبدیل می‌شود.

در حالت غیرفعال، هدف یک وسیله غیرفعال مانند تگ RFID است. تگ قدرت عملیاتی خود را از میدان ارسال شده توسط آغازگر دریافت می‌کند. سپس داده‌ها را با مدوله کردن میدان مغناطیسی با استفاده از backscatterAM به آغازگر ارسال می‌کند.

چندین کاربرد در نظر گرفته شده برای این فناوری فوق کوتاه برد وجود دارد. بیشترین استفاده از ابزار پرداخت خودکار مانند کارت هوشمند است. اما به جای استفاده از کارت هوشمند، فرستنده

^{۲۸}Near Field Communications

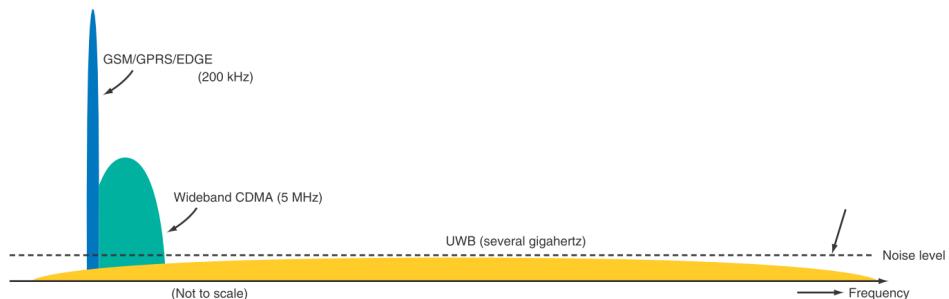
NFC در تلفن همراه شما تعییه شده است. برای خرید چیزی، کافی است تلفن همراه خود را روی خواننده ضربه بزنید یا آن را در عرض یک اینچ یا بیشتر از آن عبور دهید، و حساب کارت اعتباری شما به طور خودکار صورتحساب می‌شود. می‌توانید از آن برای خرید بلیط تئاتر یا حتی برای پرداخت هزینه هواپیما، قطار یا هتل استفاده کنید. برخی از تلفن‌های هوشمند مدرن دارای NFC داخلی هستند، اما پرداخت با این فناوری هنوز هم در زمان نوشتمن این موضوع رایج نیست.

دومین نرم افزار کاربردی، ورود خودکار با دروازه است. گذراندن تلفن همراه خود در نزدیکی خواننده به شما امکان می‌دهد وارد یک ساختمان، پارکینگ یا سایر مناطق کنترل شده شوید. همچنین انتظار می‌رود تراشه‌های NFC در گذرنامه‌های نسل بعدی گنجانده شوند.

یکی دیگر از کاربردهای پیشنهادی، راه اندازی و تحریک دیگر اشکال بی‌سیم است. برخی از حالت‌های بی‌سیم کوتاه برد مانند وای‌فای یا بلوتوث مستلزم آن است که دو طرفی که مایل به پیوند هستند، ابتدا اطلاعات را برای تنظیم پروتکل صحیح مبادله کنند. گاهی اوقات تزویج نامیده می‌شود. قرار دادن تلفن همراه، لپتاپ یا دستگاه دیگری در کنار دستگاهی که باید به آن متصل شود، امکان تبادل خودکار تمامی تنظیمات پروتکل را فراهم می‌کند. پس از آن، دو دستگاه به‌طور خودکار در حالت بی‌سیم جدید سریع‌تر و در فاصله‌ای طولانی‌تر صحبت می‌کنند. تراشه‌های NFC کوچک و ارزان هستند، بنابراین به دنبال کشف کاربردهای بیشتر از آنها باشید.

۷.۲۱ بی‌سیم فوق العاده پهن‌باند

شاید جدیدترین و غیرمعمول‌ترین شکل بی‌سیم به نام بی‌سیم فوق العاده پهن‌باند^{۲۹} (UWB) شناخته شود. دو شکل اصلی UWB وجود دارد، نسخه اصلی مبتنی بر ضربان‌های بسیار باریک و نوع جدیدتر مبتنی بر OFDM. هر دو سیگنال را در یک طیف بسیار گسترده اما در سطح سیگنال بسیار پایین پوشش می‌کنند، بنابراین با سیگنال‌های دیگر که روی آن فرکانس‌ها کار می‌کنند تداخلی ایجاد نمی‌کند. هر دو روش استفاده می‌شود، اما به نظر می‌رسد نسخه جدید OFDM بیشترین تعداد شرکت‌های تولیدی و برنامه‌های کاربردی را به خود اختصاص داده است. هر دو نوع UWB در این بخش پوشش داده شده است.

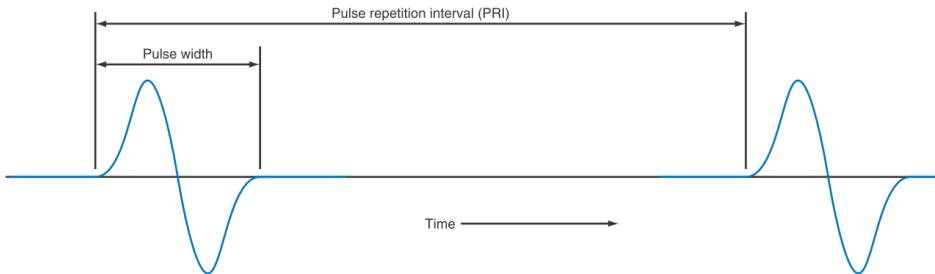


شکل ۱۷.۲۱: پهنای باند سیگنال UWB در مقایسه با پهنای باند سیگنال طیف معمولی و گسترده.

^{۲۹} Ultrawideband (UWB)

UWB اصلی کشف شده در دهه ۱۹۶۰ به عنوان بی‌سیم ضربه‌ای، بیس باند یا بدون حامل شناخته می‌شود. این شکل از UWB داده‌ها را به شکل پالس‌های بسیار کوتاه، معمولاً کمتر از ۱ ns ارسال می‌کند. از نظریه فوریه مورد بحث در فصل دوازدهم، می‌دانید که یک موج سینوسی فرکانس اساسی و هارمونیک‌های زیادی می‌تواند هر قطار پالسی را نشان دهد. یک سیگنال UWB با استفاده از پالس‌های بسیار کوتاه با چرخه کاری کم، پهنه‌ای باند بسیار وسیعی را اشغال می‌کند. سیگنال UWB به عنوان داشتن پهنه‌ای باند حداقل ۲۵ درصد فرکانس مرکزی یا حداقل ۱/۵ گیگاهرتز تعریف می‌شود. یکی دیگر از ویژگی‌های تعریف شده UWB این است که بیش از ۵۰۰ مگاهرتز طیف را اشغال می‌کند. شکل (۱۷.۲۱) یک طیف سیگنال UWB را در مقایسه با یک کانال تلفن همراه استاندارد ۳۰ کیلوهرتز و یک کانال تلفن همراه CDMA (طیف گسترده) باند پهن ۵ مگاهرتز نشان می‌دهد.

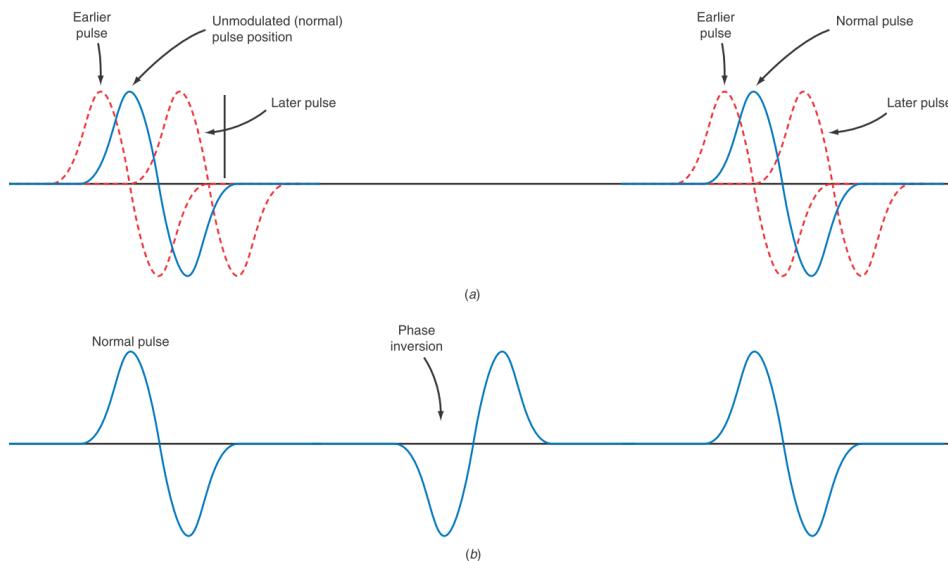
FCC به UWB در محدوده ۱/۶ تا ۱۰/۶ گیگاهرتز اجازه می‌دهد. تنها خدمات دیگر در این منطقه ماهواره، رادار، پهنه‌ای باند بی‌سیم و شبکه‌های بی‌سیم است. تجهیزات UWB سیگنال‌های خود را در بسیاری از این محدوده پخش می‌کنند، اما سطح توان آنقدر پایین است که اساساً هیچ تداخلی برای سایر خدمات وجود ندارد. UWB مانند طیف گسترده‌ای است که بسیاری از کاربران می‌توانند یک پهنه‌ای باند گسترده را به طور همزمان با اشتراک بگذارند.



شکل ۱۸.۲۱: شکل موج اصلی UWB تک چرخه‌های تکراری.

یک سیگنال UWB به صورت یک جریان پالس مستطیلی با چرخه کاری بسیار کم (۱ درصد) در برخی بازه‌های تکرار پالس (PRI) شروع می‌شود. سپس پالس‌ها با فیلتر گاوی فیلتر شده و تمایز داده می‌شوند تا پالس‌های نهایی ارسال شوند. پالس‌ها مستقیماً روی آنتن اعمال می‌شوند (شکل ۱۸.۲۱). این پالس‌ها که به عنوان تک چرخه شناخته می‌شوند، فقط یک چرخه از یک موج سینوسی نیستند. آنها توسط یک فیلتر گاوی شکل گرفته‌اند. عرض پالس فرکانس مرکزی سیگنال و پهنه‌ای باند نیمه توان را تعیین می‌کند. فرکانس مرکزی تقریباً متقابل عرض پالس است. برای عرض پالس 500 ps ، فرکانس مرکزی $= 2 \times 10^{-12} / 500 = 10^{10} \text{ گیگاهرتز}$ است.

سپس داده‌های سریالی که قرار است منتقل شوند با یک کد شبه تصادفی منحصر به فرد مانند آنچه در CDMA استفاده می‌شود کدگذاری می‌شود. این روش به طور موثر سیستم را "کانالیزه" می‌کند تا چندین کاربر بتوانند طیف را با اشتراک بگذارند اما هنوز به طور جداگانه شناسایی شوند. سیگنال کدگذاری شده سپس قطار پالس را توسط PPM یا BPSK مدوله می‌کند. هر دو روش در شکل (۱۹.۲۱) نشان داده شده است. در PPM، موقعیت پالس ممکن است دیر یا زودتر از یک پالس بدون مدولاسیون رخ دهد. یک باینری ۰ ممکن است با یک پالس قبلی و یک باینری ۱ به عنوان یک پالس بعدی و یا بالعکس نشان داده شود. تغییر زمان در مقایسه با عرض پالس کوچک است. به



شکل ۱۹.۲۱: انواع مدولاسیون UWB (الف) مدولاسیون موقعیت پالس. (ب) کلیدسازی باینری تغییر فاز. (۲۰.۲۱)

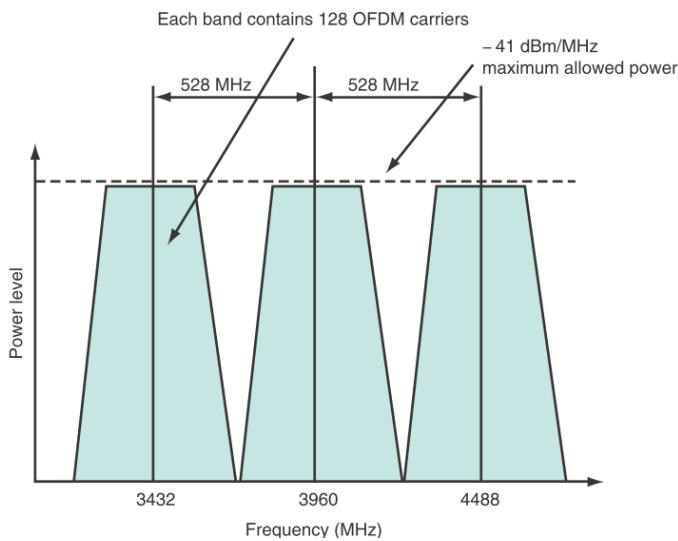
دلیل تفاوت‌های زمانی بسیار کوچک، ساعت زمان‌بندی که پالس‌ها را تولید می‌کند باید بسیار دقیق و پایدار و با حداقل لرزش باشد تا از بازیابی اطمینان حاصل شود.

در PRI، BPSK معکوس فاز برای یک باینری ۰ تولید می‌کند.

UWB OFDM چند باندی

جدیدترین شکل UWB چند بانده OFDM یا UWB MB-OFDM نام دارد. اصطلاح چند باندی از این واقعیت ناشی می‌شود که بسیاری از حامل‌های OFDM سیگنال را می‌سازند. این شکل از UWB انتهایی پایینی طیف اختصاص داده شده را به سه کانال با پهنای ۵۲۸ گیگاهرتز، همانطور که در شکل (۲۰.۲۱) نشان داده شده است، تقسیم می‌کند. این باندها از $\frac{3}{4} \times ۱۶۸$ تا $\frac{4}{4} \times ۹۵۲$ گیگاهرتز گسترش می‌یابند. به فرکانس‌های مرکزی سه باند توجه کنید. هر باند برای نگهداری سیگنال داده OFDM طراحی شده است. ۱۲۸ حامل در هر باند وجود دارد و هر اپراتور دارای پهنای باند $\frac{4}{4} \times ۱۲۵$ مگاهرتز است. از باندها 100% در واقع داده‌ها را حمل می‌کنند در حالی که 12% باند به عنوان حامل‌های آزمایشی برای کمک به برقراری ارتباط با گره‌های نزدیک استفاده می‌شوند. حامل‌های باقی مانده به عنوان نوارهای محافظت در هر طرف عمل می‌کنند تا از تداخل بین سه بخش طیف جلوگیری کنند. سیگنالی که باید ارسال شود بین حامل‌ها تقسیم می‌شود و بسته به سرعت داده انتخابی، هر کدام توسط QPSK یا BPSK مدوله می‌شوند. در شکل (۲۰.۲۱) یک خط چین را مشاهده خواهید کرد که حداقل توان مجاز تعیین شده توسط FCC را مشخص می‌کند. 41 dBm/MHz بسیار کم است که به طور کلی از هر گونه تداخل در سایر خدمات جلوگیری می‌کند.

این سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که طیف وسیعی از نرخ داده را از حدود 53° تا 48° مگابیت در ثانیه امکان‌پذیر می‌کند. بیشترین سرعت ذکر شده 11° مگابیت در ثانیه در برد تا 10 متر



شکل ۲۰.۲۱: طیف عملیاتی برای چند باند UWB OFDM.

است. سرعت تا ۴۸۰ مگابیت در ثانیه، اما فقط در محدوده ۲ تا ۳ متر، امکان پذیر است. پیاده سازی یک فرستنده گیرنده UWB OFDM درست مانند هر دستگاه OFDM است. تراشه‌های DSP برای ایجاد حامل‌های انتقال با تبدیل فوریه معکوس (IFFT) استفاده می‌شوند و یک تراشه DSP در گیرنده از FFT برای بازیابی داده‌ها استفاده می‌کند. رادیوهای MB-OFDM UWB معمولاً یک آی‌سی تک تراشه‌ای هستند که همه عملکردها را دربر می‌گیرد. استاندارد UWB وجود ندارد. شرکت‌ها سال‌ها در یک گروه کاری IEEE کار کردند تا یک استاندارد واحد به نام ۸۰۲.۱۵.۳a ایجاد کنند. هیچ اتفاق نظری حاصل نشد، بنابراین شرکت‌ها راه‌های متغّرتوی را در پیش گرفتند. بزرگترین گروه از شرکت‌ها در WiMedia Alliance با هم متحد شدند تا استانداردی را ایجاد کنند که اکثر آنها بتوانند روی آن توافق کنند. امروزه فرم UWB MB-OFDM defacto WiMedia Alliance است. این استاندارد را حفظ می‌کند.

مزایا و معایب UWB

UWB مزایای بسیاری را برای برنامه‌های رادار، تصویربرداری و ارتباطات ارائه می‌دهد:

۱. وضوح برتر در رادار و تصویربرداری.
۲. مصنونیت در برابر اثرات انتشار چند مسیره.
۳. عملیات بدون مجوز.
۴. عدم تداخل با سیگنال‌های دیگر با استفاده از همان باند فرکانسی. سیگنال‌های UWB در رادیوهای معمولی به صورت نویز تصادفی ظاهر می‌شوند.
۵. قدرت کارآمد، عملکرد بسیار کم مصرف. پیک سطوح توان در ناحیه میلی وات و توان متوسط بر حسب میکرووات است.
۶. مدارهای ساده که بیشتر آنها را می‌توان در CMOS استاندارد ادغام کرد.

۷. بالقوه کم هزینه.

نقطه ضعف اصلی، که یک مزیت نیز محسوب می‌شود، قدرت کم است. دامنه عملکرد را بهشت محدود می‌کند. برد را می‌توان در رادارهای نظامی با سطوح توان بالاتر افزایش داد، اما سطح قدرت در کاربردهای تجاری و مصرفی توسط FCC بهشت محدود شده است. محدوده‌های معمولی از چند اینچ تا بیش از ۱۰۰ فوت نیست.

کاربردهای اولیه UWB

کاربرد اولیه UWB ضربه‌ای تا بهاروز در رادار نظامی بوده است. عرض پالس بسیار کوتاه انرژی الکترومغناطیسی به‌وضوح بسیار دقیق فاصله و جزئیات هدف اجازه می‌دهد. پالس‌های کوتاه همچنین به UWB توانایی نفوذ به‌سطح را می‌دهد تا ببیند چه چیزی در پشت آنها است. بهمین دلیل، UWB یک تکنیک تصویربرداری الکترونیکی عالی است. مخصوصاً در دیدن برگها، درختان و شاخ و برگها مؤثر است. رادارهای UWB حتی می‌توانند زیر زمین را برای شناسایی مین‌ها، لوله‌ها و غیره ببینند. رادار UWB توسط پرسنل آتش نشانی، اورژانس و پلیس برای دیدن دیوارها و درها استفاده می‌شود. نسخه‌های پزشکی اجازه تصویربرداری از بدن را برای تشخیص می‌دهند.

چندین بازار هدف برای UWB وجود دارد. اول لوازم جانبی کامپیوتر است. UWB، هنگامی که با رابط USB محبوب کامپیوتر و لپ‌تاپ (گذرگاه سریالی جهانی) ازدواج می‌کند، اجازه اتصال بی‌سیم را می‌دهد. امروزه از USB تقریباً منحصراً برای اتصال دستگاه‌ها به کامپیوترهای شخصی و لپ‌تاپ‌ها مانند چاپگرهای، ماوس‌ها، درایوهای خارجی و تجهیزات شبکه استفاده می‌شود. با بی‌سیم ساختن رابط، کابل‌ها و دردرس اتصال آنها از بین می‌رود. این کاربرد برای UWB هرگز توسعه نیافته است زیرا اکثر لوازم جانبی کامپیوترهای شخصی بی‌سیم از وای‌فای (چاپگر) یا بلوتوث (صفحه کلید، ماوس) استفاده می‌کنند.

UWB همچنین برای اتصال بی‌سیم تجهیزات ویدئویی جذاب است. بهدلیل ماهیت بسیار پرسرعت تلویزیون دیجیتال و ویدئو، یک فناوری بی‌سیم با سرعت فوق العاده برای حمل و نقل مورد نیاز است. استفاده از پیوند UWB سرعت حتی بالاتری را با مصرف انرژی بسیار کم می‌دهد. برد محدود است، اما پیوندهای ویدیویی معمولاً از تلویزیون گرفته تا جعبه کابلی یا پخش‌کننده DVD یا دوربین فیلمبرداری یا بلندگوهای بی‌سیم کوتاه هستند. فرم چند بانده UWB OFDM به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، اما در برخی از ایستگاه‌های اتصال لپ‌تاپ بی‌سیم برای اتصال مانیتور ویدیویی یافت می‌شود.

۸.۲۱ کاربردهای بی‌سیم اضافی

از میان فناوری‌های بی‌سیم که در این فصل توضیح داده شد، بلوتوث و وای‌فای رایج‌ترین آنها هستند. اینها به تسلط خود ادامه خواهند داد، اما مطمئناً فناوری‌های جدیدتر توسعه یافته و برنامه‌های کاربردی جدیدی پیدا خواهند شد. سه فناوری دیگر که در اینجا شایسته ذکر هستند عبارتند از فضای سفید تلویزیون^{۳۰} (TVWS)، اینترنت اشیا^{۳۱} (IoT) و ماشین به ماشین^{۳۲} (M2M).

فضای سفید تلویزیون

^{۳۰} TV White Space (TVWS)

^{۳۱} Internet of Things (IoT)

^{۳۲} Machine-to-Machine (M2M)

”فضای سفید“ اصطلاحی است که برای اشاره به کانال‌های تلویزیونی استفاده نشده در سراسر ایالات متحده استفاده می‌شود. ایده این است که از کانال‌های خالی برای انتقال داده‌های کوتاه برد استفاده شود. تعداد و مکان این کانال‌های بلااستفاده از مکانی به مکان دیگر بسیار متفاوت است، بنابراین از تکنیک‌های رادیویی شناختی برای شناسایی کانال‌های خالی که کمترین احتمال تداخل با کانال‌های تلویزیونی را دارند، استفاده می‌شود. پایگاه داده ملی مکان‌های ایستگاه‌های تلویزیونی و کانال‌های باز به رادیو شناختی این امکان را می‌دهد که یک کانال واضح و مناسب را شناسایی کرده و به آن دسترسی پیدا کند.

فضای سفید تلویزیون (TVWS) از کانال‌های تلویزیونی در محدوده ۴۷۰ تا ۷۱۰ مگاهرتز استفاده می‌کند. اینها کانال‌های تلویزیونی 20-31 UHF هستند. پهنای باند کانال ۶ مگاهرتز است. طرح مدولاسیون اولیه BPSK، QPSK 16QAM یا 64QAM است. سطح توان انتقال 20 dBm و بهره آنتن 0 dBi است. این فرکانس‌های پایین محدوده استثنایی را ارائه می‌دهند که بسیار بیشتر از سایر نسخه‌های Wi-Fi در محدوده $\frac{2}{4}$ و $\frac{5}{5}$ گیگاهرتز است. برد تا چندین مایل امکان پذیر است. نرخ داده بسته به نوع مدولاسیون، محدوده و سایر عوامل متفاوت است. محصولات تجاری کنونی سرعت داده تا ۲۰ مگابیت بر ثانیه را ارائه می‌دهند.

کاربردهای اصلی TVWS هنوز ایجاد نشده است، اما کاربردهای بالقوه شامل پشتیبان Wi-Fi، تله‌متری و نظارت و کنترل از راه دور، و دسترسی به اینترنت پهن باند بی‌سیم برای مناطق روستایی است.

تجهیزات فعلی برای فضاهای سفید در ابتدا از استانداردهای بی‌سیم اختصاصی استفاده می‌کنند. با این حال، استاندارد Wi-Fi 802.11af فرصت فضاهای سفید تلویزیون را هدف قرار می‌دهد. استاندارد 802.11af لایه‌های MAC و PHY را برای عملیات فضای سفید تعریف می‌کند. شما در مورد IEEE 802.22 برای فضاهای سفید ایجاد شده است. هر دو 802.11af و 802.22 بر اساس OFDM هستند.

ماشین به ماشین (M2M) و کاربردهای اینترنت اشیا (IoT).

M2M و IoT هر دو جنبش‌هایی هستند که به دنبال اتصال دستگاه‌ها به یکدیگر یا اتصال دستگاه‌ها به انسان به صورت بی‌سیم هستند. M2M بیش از دو دهه است که در حال توسعه است و با کاربردهای مختلف در تله‌متری، اتوماسیون صنعتی و سیستم‌هایی مانند SCADA (کنترل نظارتی و جمع آوری داده) شروع شده است. هدف M2M اتصال ماشین‌ها به یکدیگر و تسهیل ارتباطات خودکار بین آنها است. دستگاه‌های مجهر به M2M می‌توانند بدون کمک انسان به تبادل اطلاعات، تصمیم‌گیری و اجرای عملیات بپردازند. M2M نظارت و کنترل از راه دور خودکار اجسام است. نظارت از راه دور خطوط لوله و ماشین‌های فروش خودکار و ردیابی کامیون‌ها و وسایل نقلیه ناوگان امروزه کاربردهای رایجی است. اتصال تا حد زیادی سلولی بوده است، اگرچه از فناوری‌های دیگری مانند Wi-Fi استفاده می‌شود.

M2M اساس اینترنت اشیا را تشکیل می‌دهد. اینترنت اشیا یا همان طور که برخی آن را اینترنت همه چیز می‌نامند، دیدگاه گسترده‌تری برای اتصال ماشین‌ها به یکدیگر یا ماشین‌ها به انسان است. M2M عمدها بر روی کاربردهای صنعتی، تجارتی و تجاری تمرکز دارد. اینترنت اشیا بیشتر برای کاربردهای مرتبط با مصرف کننده است. ایده بزرگ این است که تقریباً هر چیزی را در اینترنت قرار دهیم تا بتواند با کامپیوترهای راه دور، دستگاه‌های دیگر یا حتی انسان‌ها ارتباط برقرار کند.

M2M: کاربردهای M2M شامل حمل و نقل، انرژی، صنعتی، فروش و پرداخت، امنیت و مراقبت‌های بهداشتی است. به عنوان مثال، حمل و نقل شامل شرکت‌های حمل و نقل است که بر موقعیت و وضعیت تراکتورها و تریلرها نظارت می‌کنند. مدیریت ناوگان خودرو یکی دیگر از این موارد است. هر دوی این موارد شامل مکان هستند، بنابراین همه شامل گیرندهای GPS تعییه شده هستند. هر دارایی بزرگی را می‌توان از این طریق ردیابی کرد. اکثر این کاربردها از اتصالات سلولی استفاده می‌کنند. استفاده از خودرو نیز در حال ظهرور است.

کاربردهای انرژی مبتنی بر شبکه هوشمند است. M2M به طور فرایندهای برای نظارت بر تاسیسات تولید برق، پست‌ها و تجهیزات مرتبط استفاده می‌شود. این به طور گسترده در نیروگاه‌های بادی و خورشیدی استفاده می‌شود. M2M همچنین به برخی از محله‌های خانگی آمده است تا داده‌های ابزار سنج را به این شرکت ارسال کند. کنترلرهای هوشمند در خانه‌ها مصرف برق یا گاز را با استفاده از ZigBee یا برخی فناوری‌های بی‌سیم دیگر به مرکز متتمرکز کننده نزدیک منتقل می‌کنند. سپس متمرکز کننده از طریق شبکه سلولی روش بی‌سیم دیگر به ابزار برق متصل می‌شود.

M2M صنعتی به سادگی نوعی از ارتباطات اتوماسیون صنعتی است. اسکال زیادی از شبکه‌های صنعتی وجود دارد و تعداد آنها بی‌سیم هستند. تله‌متري بزرگ‌ترین دسته است که برای نظارت بر خطوط لوله نفت و گاز، مزارع مخازن، سکوهای نفتی و سایر تاسیسات راه دور توسط اتصالات سلولی یا دیگر استفاده می‌شود.

استفاده از فروش و پرداخت در همه جا وجود دارد. پایانه‌های نقطه فروش همگی به شبکه متصل هستند و بسیاری از آنها به صورت بی‌سیم هستند. ماشین‌های فروش و کیوسک‌ها اغلب توسط تلفن همراه نظارت می‌شوند.

امنیت یک مقوله اصلی است. M2M برای همه نوع نظارت امنیتی استفاده می‌شود. بخش اعظم آن ویدئویی است که توسط یک انسان ضبط شده و گاهی اوقات نظارت می‌شود. تلفن همراه انتخاب معمولی است، اگرچه سایر پیوندهای بی‌سیم اغلب درگیر هستند.

کاربردهای مراقبت‌های بهداشتی بیشتر شامل نظارت از راه دور بیمار است. ارتباطات خودرو یکی از دسته بندی‌های M2M است که سریع‌ترین رشد را دارد.

در مورد فناوری بی‌سیم، هر کدام را می‌توان استفاده کرد، اما بیشتر آن با اتصالات سلولی انجام می‌شود. اکثر کاربردها فقط به سرعت داده با سرعت پایین (1Mbps) نیاز دارند، بنابراین فناوری 2G کافی است. با این حال، از آنجایی که بسیاری از اپراتورهای تلفن همراه در حال برنامه‌ریزی برای حذف تدریجی 2G در آینده هستند، اکثر کاربردهای M2M از 3G استفاده می‌کنند. LTE نیز موجود است. خدمات M2M توسط اکثر اپراتورهای تلفن همراه ارائه می‌شود. شکل (۲۱.۲۱) یک مودم سلولی کامل را نشان می‌دهد که می‌تواند تقریباً در هر محصولی تعییه شود. برخی شامل گیرنده GPS برای ردیابی هستند. از ZigBee، Wi-Fi و بلوتوث نیز می‌توان استفاده کرد.

IoT: اینترنت اشیا مانند M2M است اما با دامنه وسیع‌تری از کاربردها. بیشتر به کاربردهای تجاری مصرف کننده و عمومی گرایش دارد. IoT فرض می‌کند که هر «چیز» یک آدرس IP دارد. تقریباً هر چیزی می‌تواند باشد. اینترنت اشیا برای سال‌ها مفهوم خوبی بوده است، اما اکنون در مراحل اولیه توسعه و استقرار است. مانند تمام فناوری‌های جدید، این فناوری با محصولات و سیستم‌های اختصاصی شروع کرده است، اما به نظر می‌رسد در جایی توسعه یابد که استانداردهایی برای پیشبرد مفهوم به سمت پیاده‌سازی در دسترس باشد.

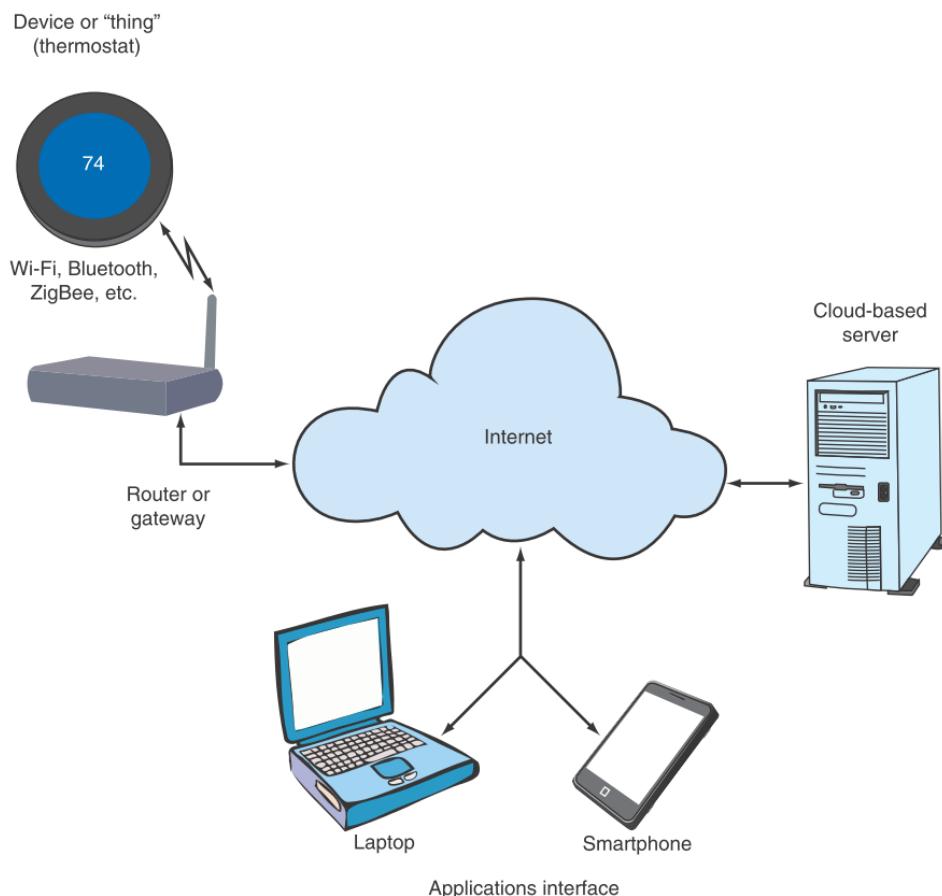
شکل (۲۲.۲۱) یک نمودار ساده از یک برنامه IoT را نشان می‌دهد. دستگاهی که باید نظارت یا



شکل ۲۱.۲۱: مارژول سلوالی تعبیه شده ۳G Sierra Wireless AirPrime SL808x اتصال HSDPA/GSM/GPRS/EDGE و پوشش چهار باند ۸۵۰/۱۹۰۰/۱۸۰۰/۹۰۰-MHz را ارائه می‌دهد. ابعاد $۲۵ \times ۳۰ \times ۲/۳۵$ میلی‌متر است.

کنترل شود حاوی یک فرستنده گیرنده بی‌سیم تعبیه‌شده است که با یک دروازه یا روتر دارای اتصال اینترنت صحبت می‌کند. به عنوان مثال، یک ترموستات خانگی از طریق Wi-Fi با روتر Wi-Fi که از طریق یک تلویزیون کابلی یا پیوند DSL به اینترنت متصل می‌شود، ارتباط برقرار می‌کند. این پیوند با یک سرور مبتنی بر ابر راه دور که اطلاعات کاربردها را تامین می‌کند، متصل می‌شود.داده‌ها را جمع آوری و آن‌ها را تجزیه و تحلیل، ذخیره و تصمیم می‌گیرد و می‌تواند اقداماتی را آغاز کند. این سرور از طریق اینترنت به رابط کاربردها متصل می‌شود، جایی که دستگاه دیگری مانند کامپیوتر شخصی وضعیت و اقدامات را تجزیه و تحلیل و نمایش می‌دهد. یک رابط برنامه‌های کاربردی محبوب تلفن هوشمند است. اینها به سرعت در حال تبدیل شدن به کنترل از راه دور همه منظوره ما هستند. بیشتر کاربردهای IoT در خانه هستند. هر وسیله‌ای، بزرگ یا کوچک، یک هدف است. برخی از ماشین‌های لباسشویی، خشک‌کن‌ها، یخچال‌ها و ماشین‌های ظرفشویی از قبل از Wi-Fi استفاده می‌کنند تا به طور خودکار استفاده و مشکلات را به سازنده گزارش دهند. وسایل کوچک مانند ظرف غذاخوری یا قهوه‌ساز نیز قابل کنترل هستند. آنها را می‌توان خاموش و روشن کرد و دمای آنها را می‌توان با یک برنامه از آیفون کنترل کرد. کنترل روشنایی LED یکی دیگر از موارد استفاده است. برخی از تولیدکنندگان دستگاهی عمومی می‌سازند که به افراد خود این امکان را می‌دهند تا با افروزن اتصال اینترنت به هر دستگاهی که با سوئیچ DC کنترل می‌شود، مانند ربات‌ها، موتورها، اسپرینکلرهای وغیره، راه حل‌هایی را از طریق برنامه آیفون بسازند.

یکی دیگر از دستگاه‌های بسیار محبوب اینترنت اشیا، ترموستات هوشمند با اینترنت اشیا می‌تواند جایگزین اکثر ترموستات‌های موجود برای نظارت و کنترل بهتر گرمایش و تهویه مطبوع برای صرفه جویی در انرژی شود. از طریق Wi-Fi به روتر خانه متصل می‌شود و یک برنامه تلفن هوشمند به شما امکان می‌دهد تنظیمات را مشاهده کنید، تنظیمات را تغییر دهید و زمان‌های تغییر را مشاهده کنید.



شکل ۲۲.۲۱: هر برنامه اینترنت اشیا شامل "چیز"، یک دروازه بی‌سیم به‌اینترنت، سرور کاربرد، و رابط کاربرد است.

در اینجا به موضوع توجه کنید. تلفن هوشمند یا تبلت به‌عنوان مانیتور و دستگاه کنترل استفاده می‌شود. اینها پلتفرم‌های (سکویهای) ایده‌آل برای اتصال به‌اینترنت هستند. این بدان معنی است که ارتباطات ماشین با انسان بیشتر به جای ماشین با ماشین M2M خالص.

تعداد کاربردهای خانگی ممکن بسیار زیاد است. علاوه بر لوازم خانگی، اینترنت اشیا شامل مواردی مانند درب‌های گاراژ، قفل درها، سیستم‌های امنیتی از جمله نظارت تصویری از راه دور و روشنایی خواهد بود. اتوماسیون کل خانه هنوز هم یک جایگاه ویژه است، اما اینترنت اشیا باید آن را محبوب‌تر کند.

یکی دیگر از حوزه‌های رو به‌رشد اینترنت اشیا سلامت و تناسب اندام است. نظارت بر بیمار رایج شده است. در بیماران پزشکی، عملکردهای خاص بدن با حسگرهایی مانند نوارهای الکتروکاردیوگرام، حسگرهای خواب، مانیتورهای قند خون و فشار خون و دماسنجهای رديابی می‌شوند و برای اطمینان از سلامتی باید دائمًا کنترل شوند. می‌توان به سرعت و به راحتی حسگرهای اتصالات بی‌سیم را برای بیماران فراهم کرد که داده‌ها را برای انتقال بعداً یا حتی در زمان واقعی جمع آوری می‌کند.

پوشیدنی‌ها دسته دیگری از اینترنت اشیا هستند. این یک طبقه‌بندی جدید است که از ابزارهایی مانند عینک گوگل، ساعت‌های هوشمند و حسگرهای تعییه شده در لباس‌هایی مانند جلیقه و کت تشکیل شده است. این دستگاه‌ها معمولاً از طریق بلوتوث به‌تلن هوشمند یا پلتفرم دیگری برای پردازش و اتصال بیشتر متصل می‌شوند.

تناسب اندام یک بخش مرتبه است و قطعاً یک موضوع داغ است. محصولات مختلفی داده‌های تمرینی مانند ضربان قلب یا قدم‌سنج را از حسگرهای بلوتوث به‌تلن هوشمند برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تجزیه و تحلیل انتقال می‌دهند. پذیرش عمومی ابزارهای پوشیدنی هنوز مشخص نشده است، اما بدون شک بخشی از ترکیب اینترنت اشیا خواهد بود.

همانطور که برای سیستم عامل‌های بی‌سیم، هر کدام را می‌توان استفاده کرد. Wi-Fi رایج‌ترین است، اما سلولی، ZigBee و بلوتوث نیز به‌طور گسترده استفاده می‌شود. بسیاری از شرکت‌های تحقیقاتی بازار و شرکت‌های IoT پیش‌بینی می‌کنند تا سال ۲۰۲۰ بین ۳۰ تا ۱۰۰ میلیارد دستگاه متصل در جهان وجود داشته باشد.

سؤالات:

۱. مزیت اصلی LAN بی‌سیم چیست؟
۲. استاندارد IEEE برای شبکه‌های WLAN را نام ببرید.
۳. نام مستعار تجاری این استاندارد چیست؟
۴. شش نسخه اصلی استاندارد IEEE WLAN را فهرست کنید و محدوده فرکانس کاری و حداقل سرعت داده را بیان کنید.
۵. نقطه دسترسی چیست؟ نقطه داغ چیست؟
۶. نام واحد پایه یک WLAN خانگی را تشکیل می‌دهد چیست؟
۷. سه باند فرکانسی وای فای را نام ببرید.
۸. دو عامل اصلی را نام ببرید که در استانداردهای 11n، 11ac و 11ad امکان نرخ داده بالاتر را فراهم می‌کند.
۹. کدام استاندارد وای فای سریعترین نرخ داده را ارائه می‌دهد؟ کاربرد اصلی آن چیست؟
۱۰. تخلیه وای فای چیست؟ چه استانداردهای IEEE و Wi-Fi Alliance این امکان را فراهم می‌کند؟
۱۱. Wi-Fi Direct را تعریف کنید.
۱۲. نحوه دستیابی به قابلیت همکاری با تجهیزات WLAN استاندارد IEEE را شرح دهید.
۱۳. PAN چیست؟
۱۴. دو استاندارد PAN را نام ببرید.
۱۵. حالت دسترسی و نوع مدولاسیون مورد استفاده در نسخه اصلی بلوتوث را شرح دهید.

۱۶. حالت دسترسی و نوع مدولاسیون مورد استفاده در جدیدترین نسخه بلوتوث را شرح دهید.
۱۷. بلوتوث کم انرژی چه تفاوتی با بلوتوث استاندارد دارد؟
۱۸. حداکثر محدوده ارتباطات تقریبی دسته‌های برق بلوتوث کلاس ۱ و کلاس ۳ چقدر است؟
۱۹. پیکونت چیست؟ پراکنده‌گی چیست؟
۲۰. پنج کاربرد محبوب برای بلوتوث را فهرست کنید. محبوب‌ترین کاربرد را نام ببرید.
۲۱. استاندارد IEEE که بر اساس آن ساخته شده است چیست؟
۲۲. برنامه اصلی ZigBee را بیان کنید.
۲۳. محدوده فرکانس کاری ZigBee و حداکثر نرخ داده برای هر یک را فهرست کنید.
۲۴. کدام نسخه از ZigBee محبوب‌ترین است؟
۲۵. روش دسترسی و مدولاسیون مورد استفاده در ZigBee چیست؟
۲۶. دو توپولوژی شبکه اصلی مورد استفاده با ZigBee را نام ببرید.
۲۷. توضیح دهید که چگونه یک شبکه مش محدوده انتقال و قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد.
۲۸. پنج کاربرد محبوب برای ZigBee را فهرست کنید.
۲۹. نام رایج استاندارد IEEE 802.16d/e چیست؟
۳۰. توضیح دهید که چرا IEEE 802.16 یک فناوری MAN است.
۳۱. دو توپولوژی اصلی استاندارد 802.16 کدامند؟
۳۲. محدوده فرکانس کاری عمومی 802.16 را نام ببرید.
۳۳. کدام فناوری بی‌سیم محبوبیت و پذیرش 802.16 را کاهش داده است؟
۳۴. روش‌های دسترسی و مدولاسیون مورد استفاده در 802.16 را نام ببرید.
۳۵. حداکثر سرعت‌های عملیاتی و برد 802.16 را فهرست کنید.
۳۶. 802.16e چیست؟
۳۷. کاربرد عمدۀ بی‌سیم IR را بیان کنید.
۳۸. استاندارد اولیه داده IR را نام ببرید.
۳۹. چه نیاز فیزیکی برای کارکرد سیستم‌های IR ضروری است؟
۴۰. RFID چیست؟
۴۱. معادل الکترونیکی کدام طرح کدگذاری و شناسه محبوب است؟

۴۲. مدار موجود در یک تگ RFID ولتاژ dc را برای کارکرد مدارهای خود از کجا دریافت می‌کند؟

۴۳. سه فرکانس عامل اصلی برای برچسب‌های RFID را نام ببرید.

۴۴. حداکثر محدوده عملکرد تقریبی یک تگ ۱۳/۵۶ مگاهرتز چقدر است؟

۴۵. نوع مدولاسیون مورد استفاده در اکثر تگ‌های غیر فعال را نام ببرید.

۴۶. کاربردهای بالقوه RFID را فهرست کنید.

۴۷. جدیدترین نسخه استانداردهای RFID چیست؟ را بیان کنید

- الف محدوده فرکانس کاری

- ب مزايا و فوائد

۴۸. کد محصول الکترونیکی در یک برچسب در کجا ذخیره می‌شود؟

۴۹. NFC چیست؟

۵۰. فرکانس کاری و نرخ داده استاندارد NFC را بیان کنید.

۵۱. دو کاربرد اصلی NFC چیست؟

۵۲. مفهوم اساسی UWB را شرح دهید. آیا از حامل استفاده می‌شود؟

۵۳. نام نوع پالس ارسالی توسط UWB چیست؟

۵۴. محدوده فرکانس کاری اولیه UWB را بیان کنید.

۵۵. دو نوع مدولاسیون مورد استفاده با UWB را بیان کنید.

۵۶. مزایای عمدۀ UWB را نسبت به سایر روش‌های بی‌سیم فهرست کنید.

۵۷. عیب اولیه UWB چیست؟

۵۸. چرا UWB دیگر به طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد؟

۵۹. حالت دسترسی، مدولاسیون و باندهای فرکانسی جدیدترین شکل UWB را توضیح دهید.

۶۰. حداکثر نرخ داده این جدیدترین فرم UWB چقدر است؟

۶۱. دو کاربرد محبوب جدیدترین فرم UWB را نام ببرید.

۶۲. مفهوم رادیو فضای سفید را توضیح دهید.

۶۳. محدوده فرکانس رادیو فضای سفید چقدر است؟

۶۴. توضیح دهید که چگونه یک رادیو فضای سفید یک کانال استفاده نشده را پیدا می‌کند.

۶۵. سه فناوری یا استاندارد بی‌سیم مورد استفاده برای فضای سفید را فهرست کنید.

۶۶. دو کاربرد اصلی را برای رادیو فضای سفید ذکر کنید.
۶۷. M2M چیست؟
۶۸. پنج برنامه کاربردی M2M را فهرست کنید.
۶۹. کدام سرویس بی‌سیم گاهی اوقات یک برنامه M2M را همراهی می‌کند؟
۷۰. فناوری بی‌سیم اولیه مورد استفاده در M2M چیست؟
۷۱. اینترنت اشیا را تعریف کنید.
۷۲. امیدوار‌کننده‌ترین کاربردهای IoT در کجا پیاده‌سازی می‌شوند؟ پنج کاربرد احتمالی را نام ببرید.
۷۳. معمولاً از چه دستگاه‌هایی برای نظارت و کنترل کاربردهای اینترنت اشیا استفاده می‌شود؟
۷۴. چه فناوری‌های بی‌سیم در کاربردهای اینترنت اشیا استفاده می‌شود؟

مسائل:

۱. با توجه به شکل (۱.۲۱) :
- الف کدام فناوری بی‌سیم کم سرعت بیشترین برد را ارائه می‌دهد؟
 - ب چه فناوری حداکثر سرعت را در بیشترین محدوده می‌دهد؟
۲. عرض پالس یک تک سیکل UWB برابر 60ps است. فرکانس مرکزی تقریبی چقدر است؟

مسائل چالش برانگیز:

۱. سه فناوری یا برنامه کاربردی بی‌سیم را نام ببرید که در این فصل به آنها پرداخته نشده است.
۲. سه برنامه کاربردی بی‌سیم جدید را در نظر بگیرید که مفید و بالقوه عملی باشند.
۳. در انتخاب LAN یا PAN چه سه فاکتور حیاتی را برای هر کاربرد باید در نظر گرفت؟
۴. دلیل اصلی محدود بودن برد رادیو 802.11ad چیست؟ چگونه بر آن نقطه ضعف غلبه می‌شود؟

۲۲ فصل

آزمایش و اندازه‌گیری در ارتباطات

این کتاب در درجه اول برای آموزش کسانی از شما که به دنبال متخصص شدن در الکترونیک ارتباطات هستند نوشته شده است. اگر شما در الکترونیک ارتباطات مشغول به کار هستید، کار شما شامل نوعی آزمایش و اندازه‌گیری است. کار ممکن است طراحی، ارزیابی، نصب، بهره برداری، سرویس، تعمیر، و نگهداری یا آزمایش بر اساس مشخصات یا استانداردها باشد.

هدف از این فصل این است که شما را با طیف گسترده‌ای از تجهیزات آزمایش ویژه و روش‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در الکترونیک ارتباطات آشنا کنید. فصل با بخش ویژه‌ای در مورد فناوری‌های عیب‌یابی و کاهش EMI به پایان می‌رسد.

به دلیل گسترده وسیعی از تجهیزات ارتباطی موجود و تفاوت‌های فراوان از سازنده‌ای به سازنده دیگر، مشخص کردن آن دشوار است. فقط آزمایش‌های کلی و روش‌های اندازه‌گیری داده شده است. فقط به خاطر داشته باشید که هنگام انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های واقعی، نه تنها باید با تجهیزات آزمایشی مورد استفاده، بلکه با فرستنده، گیرنده یا سایر دستگاه‌های ارتباطی خاص در حال آزمایش نیز آشنا شوید. کتابچه‌های راهنمای ابزارهای آزمایشی و تجهیزات ارتباطی، و همچنین هر مرجع استاندارد، باید برای مراجعه در دسترس باشد.

اهداف:

بعد از تکمیل این فصل، شما می‌توانید:

- ده ابزار آزمایش رایج مورد استفاده در آزمایش تجهیزات ارتباطی را فهرست کنید و عملیات اساسی هر کدام را شرح دهید.
- عملکرد مولد سیگنال برداری و تحلیلگر سیگنال برداری را توضیح دهید.
- آزمایش‌های رایج تجهیزات ارتباطی انجام شده بر روی فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و آنتن‌ها، از جمله اندازه‌گیری‌های فرکانس، اندازه‌گیری توان، اندازه‌گیری‌های SWR، حساسیت و تحلیل‌های طیف را نام ببرید.
- روش‌های عیب‌یابی اساسی مورد استفاده برای مکان‌یابی مشکلات در فرستنده‌ها و گیرنده‌ها را شرح دهید.

■ تداخل الکترومغناطیسی^۱ (EMI) را تعریف کنید، منابع آن را فهرست کنید، و اقدامات کنترل آن را شرح دهید.

۱.۲۲ تجهیزات آزمایش در ارتباطات

این بخش یک نمای کلی از انواع مختلف ابزارهای آزمایش موجود برای استفاده با تجهیزات ارتباطی ارائه می‌دهد. فرض بر این است که شما از قبل تکنیک‌های آزمایش و اندازه‌گیری اولیه مورد استفاده در تجهیزات آزمایش فرکانس پایین معمولی مانند مولتی متر، ژنراتور سیگنال و اسیلوسکوپ را می‌دانید. در کار ارتباطی خود، همچنان از اسیلوسکوپ‌ها و مولتی‌مترهای استاندارد برای اندازه‌گیری ولتاژ، جریان و مقاومت استفاده می‌کنید. پوشش این ابزار آزمایش پایه در اینجا تکرار نخواهد شد. با این حال، ما از دانش شما در مورد اصول آن ابزارها استفاده خواهیم کرد، زیرا آنها برای تجهیزات آزمایشی مورد بحث در این بخش به کار می‌روند.

اندازه‌گیری ولتاژ

رایج‌ترین اندازه‌گیری به دست آمده برای اکثر تجهیزات الکترونیکی ولتاژ است. این امر به‌ویژه برای کاربردهای dc و ac با فرکانس پایین صادق است. در کاربردهای RF، اندازه‌گیری ولتاژ ممکن است تحت برخی شرایط مهم باشد، اما اندازه‌گیری توان در فرکانس‌های بالاتر، به‌ویژه در مایکروویو، بسیار رایج‌تر است. در آزمایش و عیب‌یابی تجهیزات ارتباطی، همچنان از یک ولتمتر dc برای بررسی منابع تغذیه و سایر شرایط خواهید کرد. همچنین مواردی وجود دارد که اندازه‌گیری RF، یعنی ac، ولتاژ باید انجام شود.

دو روش اساسی برای اندازه‌گیری ولتاژ ac در تجهیزات الکترونیکی وجود دارد. یکی استفاده از ولتمتر ac است. اکثر ولتمترهای معمولی می‌توانند ولتاژهای ac را از چند میلی‌ولت تا چند صد ولت اندازه‌گیری کنند. مولتی‌مترهای معمولی رومیزی یا قابل حمل ac در محدوده فرکانس خود به‌حداکثر چند هزار کیلوهرتز محدود می‌شوند. ولتمترهای ac فرکانس بالاتر برای اندازه‌گیری ولتاژ صوتی تا چند صد هزار کیلوهرتز در دسترس هستند. برای فرکانس‌های بالاتر باید از ولتمترهای RF مخصوص استفاده شود. روش دوم استفاده از اسیلوسکوپ به‌شرح زیر است.

ولتمتر RF : ولتمتر RF قطعه ویژه‌ای از تجهیزات آزمایشی است که برای اندازه‌گیری ولتاژ سیگنال‌های فرکانس بالا طراحی شده است. واحدهای معمولی برای اندازه‌گیری تا ۱۰ مگاهرتز در دسترس هستند. واحدهای ویژه‌ای با قابلیت اندازه‌گیری ولتاژ از میکروولت تا صدها ولت در فرکانس‌های حداکثر ۱ تا ۲ گیگاهرتز نیز موجود است.

ولتمترهای RF برای اندازه‌گیری ولتاژ موج سینوسی ساخته شده‌اند، با بازخوانی به‌صورت ریشه میانگین مربع^۲ (rms). اکثر ولتمترهای RF از انواع آنالوگ با یک اشاره‌گر متحرک در مقیاس پس زمینه هستند. دقت اندازه‌گیری بسته به‌ابزار خاص در محدوده ۱ تا ۵ درصد است. دقت معمولاً به‌صورت درصدی از قرائت یا درصدی از مقدار مقیاس کامل محدوده ولتاژ انتخاب شده ذکر می‌شود. ولتمترهای RF با پروب‌های بازخوانی دیجیتال نیز با دقت اندازه‌گیری تا حدودی بهبود یافته در دسترس هستند.

پروب‌ها RF : یکی از راههای اندازه‌گیری ولتاژ RF استفاده از پروب RF با مولتی‌ولت dc استاندارد

^۱ElectroMagnetic Interference (EMI)

^۲Root Mean Square (rms)

است. پروب‌های RF گاهی اوقات به عنوان پروب‌های آشکارساز شناخته می‌شوند. یک پروب RF اساساً یک یکسو کننده (ژرمانیوم یا حامل گرم) با خازن فیلتر است که مقدار پیک ولتاژ RF موج سینوسی را ذخیره می‌کند. ولت‌متر dc خارجی ولتاژ خازن را می‌خواند. نتیجه یک مقدار اوج است که به راحتی می‌توان آن را با ضرب آن در 70% به ریشه میانگین مربع تبدیل کرد.

اکثر پروب‌های RF برای اندازه‌گیری ولتاژ RF تا حدود 250° مگاهرتز مناسب هستند. دقت حدود 5° درصد است، اما معمولاً برای اندازه‌گیری RF بسیار خوب است.

اسیلوسکوپ‌ها : دو نوع اساسی از اسیلوسکوپ در اندازه‌گیری RF استفاده می‌شود: اسیلوسکوپ آنالوگ و اسیلوسکوپ ذخیره‌سازی دیجیتال^۳ (DSO).

اسیلوسکوپ‌های آنالوگ سیگنالی را که باید اندازه‌گیری شود تقویت می‌کنند و آن را روی صفحه یک CRT با نرخ جاروب مشخص نمایش می‌دهند. آنها برای نمایش و اندازه‌گیری ولتاژ RF تا حدود 500° مگاهرتز در دسترس هستند. به عنوان یک قاعده، یک اسیلوسکوپ آنالوگ باید دارای پهنای باند سه تا پنج برابر یا بیشتر از مولفه با بالاترین فرکانس (یک حامل، یک هارمونیک یا یک باند جانبی) باشد که نمایش داده می‌شود.

اسیلوسکوپ‌های ذخیره‌سازی دیجیتال، همچنین به عنوان اسیلوسکوپ‌های دیجیتال یا نمونه‌برداری شناخته می‌شوند، در حال رشد هستند و به سرعت جایگزین اسیلوسکوپ‌های آنالوگ می‌شوند. DSO‌ها از نمونه‌برداری با سرعت بالا یا تکنیک‌های A/D برای تبدیل سیگنال مورد اندازه‌گیری به یک سری کلمات دیجیتالی که در حافظه داخلی ذخیره می‌شوند، استفاده می‌کنند. نرخ نمونه‌برداری بسته به اسیلوسکوپ متفاوت است، اما می‌تواند از حدود 20° میلیون نمونه در ثانیه تا بیش از 5° میلیارد نمونه در ثانیه متغیر باشد. هر نمونه اندازه‌گیری معمولاً به یک عدد باینری موازنی 8° یا 10° بیتی تبدیل می‌شود که در حافظه داخلی ذخیره می‌شود. اسیلوسکوپ‌هایی با حافظه تقریباً 1° گیگابایتی یا بیشتر بسته به محصول موجود هستند.

امروزه بیش از 50° درصد فروش اسیلوسکوپ از نوع نمونه‌برداری دیجیتال است. DSO‌ها برای اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا بسیار محبوب هستند زیرا ابزاری برای نمایش سیگنال‌ها با فرکانس‌های تا حدود 70° گیگاهرتز فراهم می‌کنند. این بدان معنی است که سیگنال‌های مایکروویو مدوله شده پیچیده را می‌توان به راحتی مشاهده، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل کرد.

خوب است بدانید که:

نقطه ضعف اصلی نمونه‌برداری زمان معادل زمان مورد نیاز برای بدست آوردن نمونه‌های کافی برای شروع نمایش است.

اندازه‌گیری توان

همانطور که قبلاً ذکر شد، اندازه‌گیری توان RF بسیار رایج‌تر از اندازه‌گیری ولتاژ یا جریان RF است. این امر به ویژه در آزمایش و تنظیم فرستنده‌هایی که معمولاً توان خروجی قابل توجهی تولید می‌کنند صادق است. یکی از پرکاربردترین ابزارهای آزمایش سنجش قدرت RF است.

قدرت سنج‌ها در اندازه‌ها و پیکربندی‌های مختلفی وجود دارند. یکی از محبوب‌ترین آنها یک کنتور برق خطی کوچک است که برای قرار دادن در کابل کواکسیال بین فرستنده و آتن طراحی شده

^۳Digital Storage Oscilloscope (DSO)

است. از دستگاه سنجش برای اندازه‌گیری منبع تغذیه خروجی فرستنده به آنتن استفاده می‌شود. یک کابل کواکسیال کوتاه خروجی فرستنده را به توان سنج متصل می‌کند و خروجی توان سنج به آنتن یا بار ساختگی متصل می‌شود.

یک توان سنج پیچیده‌تر، واحد کوچک است که برای آزمایش آزمایشگاهی یا خط تولید طراحی شده است. خروجی فرستنده یا دستگاه دیگری که قرار است توان آن اندازه‌گیری شود توسط یک کابل کواکسیال کوتاه به ورودی کنترل توان متصل می‌شود.

توان سنج‌ها ممکن است دارای سنج بازخوانی آنالوگ یا نمایشگر دیجیتالی باشند. صفحه یا صفحه نمایش بر حسب میلی وات، وات یا کیلووات کالیبره شده است. صفحه را می‌توان بر حسب dBm نیز کالیبره کرد. این مرجع قدرت دسی بل یک میلی وات (mW) است. در نوع کوچکتر قدرت سنج دستی، معمولاً قابلیت اندازه‌گیری SWR گنجانده شده است.

عملکرد یک پاورمتر (توان سنج) عموماً مبتنی بر تبدیل توان سیگنال به گرما است. هنگامی که جریان از مقاومت عبور می‌کند، توان به شکل گرما تلف می‌شود. اگر گرما را بتوان به طور دقیق اندازه‌گیری کرد، معمولاً می‌توان آن را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل کرد که می‌تواند روی یک دستگاه سنجش نمایش داده شود.

مثال ۱-۲۲

یک ولت‌متر RF با یک پروب آشکارساز برای اندازه‌گیری ولتاژ در یک بار مقاومتی ۷۵ اهم استفاده می‌شود. فرکانس ۱۳۷/۵ مگاهرتز است. ولتاژ اندازه‌گیری شده ۸ ولت است. چه توانی در بار تلف می‌شود؟

قدرت سنج RF با پروب آشکارساز، پیک خواندن ولتاژ V_P را تولید می‌کند:

$$V_P = 8V$$

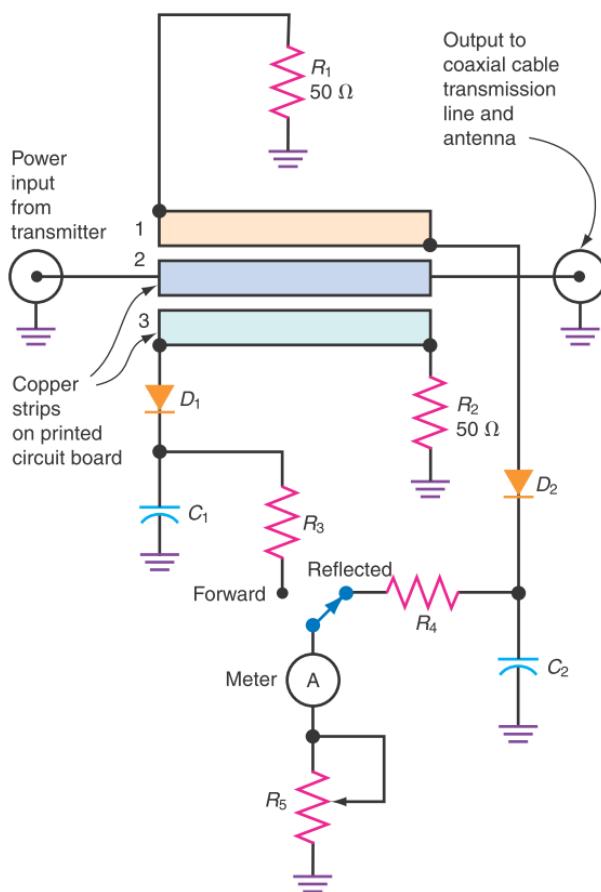
$$V_{rms} = \sqrt{0.707V_P^2} = \sqrt{0.707(8)^2} = 5.656V$$

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(5.656)^2}{75} = 42.65mW$$

قدرت را می‌توان به طور غیر مستقیم نیز اندازه‌گیری کرد. اگر امپدانس بار مشخص و مقاومتی باشد، می‌توانید ولتاژ دو سوی بار را اندازه‌گیری و سپس با رابطه $P = V^2/R$ توان را محاسبه کنید.

مدار اندازه‌گیری توان

مدارهای نسبتاً ساده را می‌توان برای اندازه‌گیری توان در فرستنده‌ها و مدارهای قدرت RF استفاده کرد. به عنوان مثال مدار مونوچ نشان داده شده در شکل (۱.۲۲) است. از یک خط انتقال ۵۰ اهمی استفاده می‌کند که با یک میکرو نوار روی یک برد مدار چاپی کوچک (PCB) ساخته شده است. هادی مرکزی قطعه‌ای است که در شکل شماتیک با شماره ۲ مشخص شده است. در هر طرف هادی مرکزی حلقه‌های باریکتری با ۱ و ۳ وجود دارد. ولتاژ RF متناسب با توان مستقیم و معکوس (انعکاس) در نتیجه تزویج خازنی و القایی با هادی مرکزی تولید می‌شود. ولتاژ در بخش ۳ نشان دهنده توان رو به جلو است. توسط دیود D_1 یکسو شده و توسط C_1 به یک ولتاژ dc متناسب فیلتر می‌شود. این ولتاژ از طریق مقاومت‌های ضرب کننده $R_۳$ و $R_۵$ به متری اعمال و مقیاس آن بر حسب وات توان کالیبره شده است. به مقاومت‌های ۵۰ اهمی توجه کنید که حلقه‌های پیکاپ را برای تطبیق امپدانس خاتمه می‌دهند.

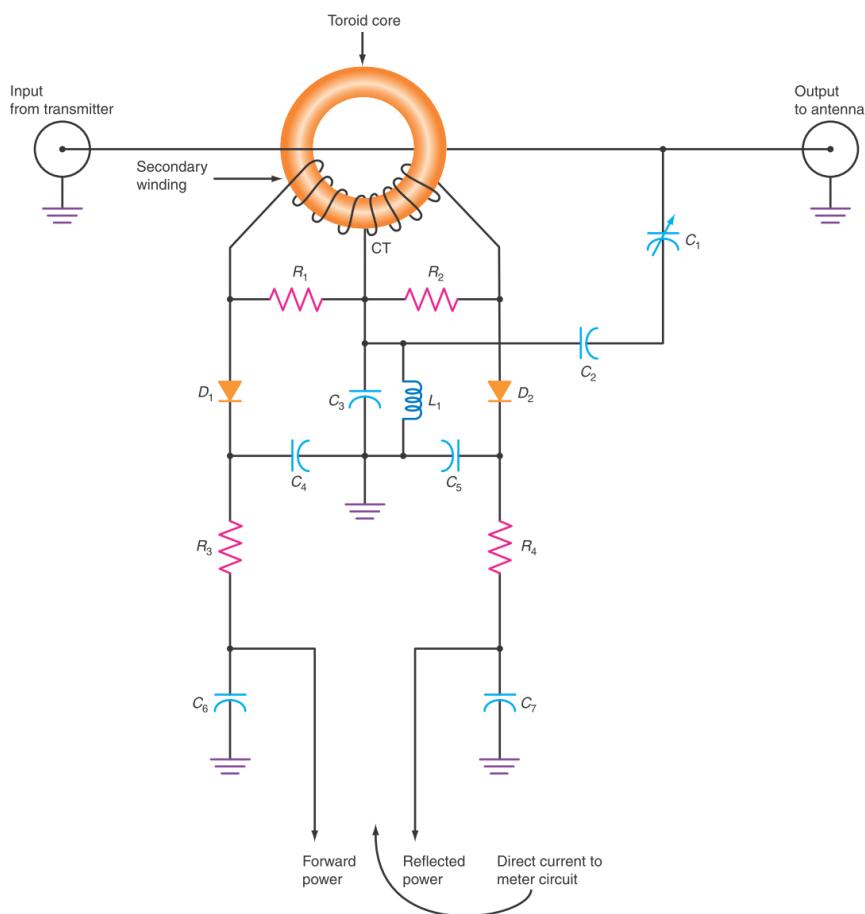


شکل ۱.۲۲: سنجش SWR یا توان تطبیقی

ولتاژ القا شده در حلقه پیکاپ ۱ متناسب با توان منعکس شده است. توسط D_2 یکسو شده و توسط C_2 به جریان مستقیم متناسب فیلتر می‌شود. یک سوئیچ برای انتخاب نمایشگر قدرت مستقیم یا بازتاب استفاده می‌شود. مقاومت R_5 برای کالیبره کردن مدار کنتور، با استفاده از یک توان سنج دقیق به عنوان استاندار استفاده می‌شود.

یک دیگر از مدارهای محبوب اندازه گیری توان، تزویج کننده جهتی است که در شکل (۱.۲۲) نشان داده شده است. یک قطعه کوتاه از کابل کواکسیال 50° اهم به عنوان سیم پیچ اولیه یک دور بر روی یک ترانسفورماتور ساخته شده با یک هسته حلقوی و یک سیم پیچ ثانویه از چندین دور سیم پیچ ثانویه القا می‌شود. مقاومت‌های R_1 و R_2 ولتاژ را به طور مساوی بین دو مدار یکسو کننده دیود که از D_1 و D_2 تشکیل شده‌اند و اجزای مرتبط تقسیم می‌کنند.

یک تقسیم کننده ولتاژ متشكل از L_1 ، C_1 ، C_2 و R_3 از ولتاژ خروجی مدار نمونه‌برداری می‌کند. این ولتاژ به هر دو یکسو کننده دیود همراه با ولتاژهای ثانویه ترانسفورماتور اعمال می‌شود. هنگامی که این ولتاژها با هم ترکیب می‌شوند، خروجی‌های یکسو شده متناسب با ولتاژهای پیشرو و منعکس



شکل ۲.۲۲: اندازه‌گیری توان کوپلر جهت‌دار

شده روی خط هستند. فیلترهای پایین‌گذر $R_4 - C_7$ و $R_3 - C_6$ سیگنال‌های تصحیح شده را به جریان مستقیم صاف می‌کنند. نحوه قرار گرفتن سنجشگر (میتر) مانند شکل (۱.۲۲) برای نمایش توان رو به جلو (پیشرو) یا بازتابی استفاده می‌شود.

هر دو مدار را می‌توان برای مدیریت سطوح توان از چند میلی وات تا چندین کیلووات طراحی کرد. هنگامی که از سیگنال‌های سطح پایین استفاده می‌شود، دیودها باید از نوع ژرمانیومی یا حامل گرم با ولتاژ آستانه بایاس کم (0.4V) باشند تا دقت اندازه‌گیری کافی فراهم شود. با طراحی و تنظیم دقیق، این مدارها می‌توانند دقت 90° درصد یا بهتر را ارائه دهند. از آنجایی که مدارها بسیار کوچک هستند، اغلب به همراه متر و سوئیچ در فرستنده یا مدار دیگر تعییه می‌شوند.

مثال ۲-۲۲

اگر توان رو به جلو و توان بازتابی در مدار مشخص باشد، می‌توان SWR را محاسبه کرد. اگر توان پیشرو 380W و توان بازتابش 40W باشد، SWR چقدر است؟

$$\begin{aligned}
 SWR &= \frac{1 + \sqrt{P_R/P_F}}{1 - \sqrt{P_R/P_F}} \\
 &= \frac{1 + \sqrt{40/38}}{1 - \sqrt{40/38}} \\
 &= \frac{1 + 1.0324}{1 - 1.0324} = 1.96
 \end{aligned}$$

بارهای ساختگی

بار ساختگی^۴ مقاومتی است که بهجای آنتن به خط انتقال متصل می‌شود تا توان خروجی فرستنده را جذب کند. هنگامی که توان اندازه‌گیری می‌شود یا سایر آزمایش‌های فرستنده انجام می‌شود، معمولاً مطلوب است که آنتن را جدا کنید تا فرستنده تابش نداشته باشد و با ایستگاه‌های دیگر در همان فرکانس تداخل نداشته باشد. علاوه بر این، اگر فرستنده مشکل دارد یا استانداردهای فرکانس یا انتشار را برآورده نمی‌کند، بهتر است هیچ تشعشعی منتشر نشود. بار ساختگی این نیاز را برآورده می‌کند. بار ساختگی ممکن است مستقیماً به کانکتور خروجی کواکسیال فرستنده متصل شود یا ممکن است توسط یک قطعه کابل کواکسیال کوتاه به آن متصل شود.

بار مقاومتی است که مقدار آن برابر امپدانس خروجی فرستنده است و دارای توان کافی است. برای مثال، یک فرستنده CB دارای امپدانس خروجی ۵۰ اهمی و توانی در حدود ۴ وات است. بار ساختگی مقاومت باید بتواند این مقدار توان یا بیشتر را از بین ببرد. به عنوان مثال، می‌توانید از سه مقاومت ۱۵۰ اهمی، ۲ واتی به صورت موازی برای ایجاد بار $\frac{3}{3+5}$ یا $\frac{150}{150+150}$ یا $3 \times 2 = 6$ وات استفاده کنید. می‌توان از مقاومت‌های کربنی با ترکیب استاندارد استفاده کرد. تولرانس حیاتی نیست و مقاومت‌هایی با تولرانس ۵ یا ۱۰ درصد به خوبی کار می‌کنند.

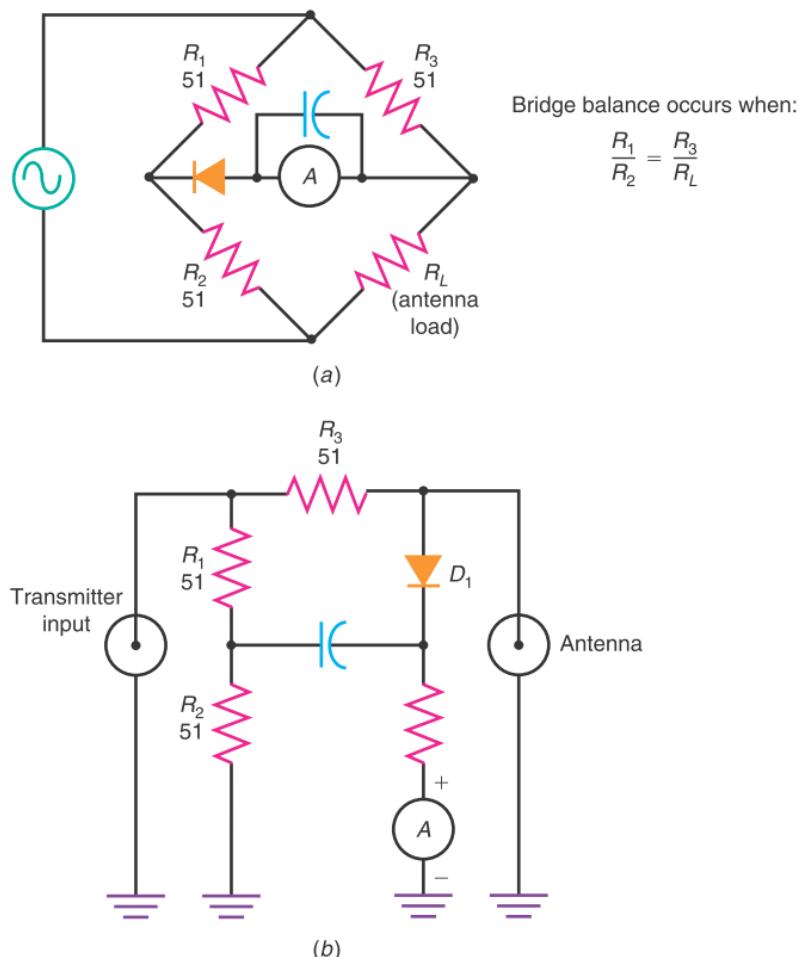
برای فرستنده‌های کم مصرف مانند CB‌ها و رادیوهای آماتور، یک لامپ رشتہ‌ای بار مناسبی ایجاد می‌کند. چراغ پیلوت نوع ۴۷ به طور گستردۀ برای خروجی فرستنده چند وات استفاده می‌شود. یک لامپ معمولی ۷۵ یا ۱۰۰ وات یا بالاتر نیز می‌تواند برای فرستنده‌های با قدرت بالاتر استفاده شود. بهترین بار ساختگی یک واحد تجاری است که برای این منظور طراحی شده است. این واحدها معمولاً برای برحی محدودیت‌های توان بالایی مانند ۲۰۰ وات یا یک کیلو وات طراحی می‌شوند. واحدهای با قدرت بالاتر با یک مقاومت غوطه ور در روغن ساخته می‌شوند تا قابلیت اتصال گرمایشی را بدون سوختن بهبود بخشد. یک واحد معمولی یک مقاومت است که در یک قوطی یک گالن پر از روغن عایق نصب شده است. یک کانکتور کواکسیال در بالا برای اتصال دستگاه به فرستنده استفاده می‌شود. واحدهای دیگر در یک محفظه آلومینیومی با پره‌های حرارتی برای بهبود اتصال گرمایشی نصب شده‌اند. مقاومت‌ها غیر بحرانی هستند، اما باید غیر القایی باشند. مقاومت باید تا حد امکان به مقاومت خالص در فرکانس کاری نزدیک باشد.

سنجهش نسبت موج ایستاده (SWR)

SWR را می‌توان با محاسبه تعیین کرد اگر مقادیر توان پیشرو و منعکس شده مشخص باشند. برخی از سنجهش‌گرهای SWR از مدارهای مونومج یا کوپلر جهتی شرح داده شده در بالا استفاده می‌کنند و سپس محاسبه SWR ارائه شده در مثال ۲-۲۲ را با آمپرهای عملیاتی و آی‌سی‌های ضرب کننده

^۴Dummy Load

آنالوگ اجرا می‌کند. اما شما همچنین می‌توانید SWR را مستقیماً تعیین کنید.



شکل ۳.۲۲: پل سنجش SWR

شکل (۳.۲۲)(الف) یک پل سنج SWR را نشان می‌دهد. پل از مقاومت‌های دقیق، غیر القایی و مقاومت در برابر تابش آنتن تشکیل شده است. در برخی از سنجش‌گرهای برای اندازه‌گیری عدم تعادل پل متصل می‌شود. فرستنده منبع برق ac است.

شکل (۳.۲۲)(ب) مداری را نشان می‌دهد که مرتب شده است به‌طوری که سنجش‌گر و یک طرف پل به‌زمین متصل می‌شوند و در نتیجه تطبیق بهتری با خطوط انتقال کواکسیال نامتعادل ایجاد می‌کند. با استفاده از کانکتورهای کواکسیال برای ورودی فرستنده و آنتن و خط انتقال توجه کنید. سنجش‌گر یک میکروآمپر متر DC پایه است. دیود D_1 RF سیگنال را به جریان مستقیم متناسب یکسو می‌کند. اگر مقاومت تابشی آنتن 5° اهم باشد، پل متعادل شده و قرائت کنتور صفر می‌شود. کنتور برای نمایش 1 SWR کالیبره شده است. اگر مقاومت تابشی آنتن 5° اهم نباشد، پل نامتعادل خواهد بود و سنجش‌گر قرائتی را نشان می‌دهد که متناسب با درجه عدم تعادل است. سنجش‌گر در مقادیر SWR کالیبره شده است.

سیگنال ژنراتور

مولد سیگنال یکی از تجهیزاتی است که اغلب مورد نیاز در سرویس تجهیزات ارتباطی است. همانطور که از نام آن پیداست، یک سیگنال مولد دستگاهی است که سیگنال خروجی یک شکل خاص را در فرکانس خاص و در کاربردهای ارتباطی، معمولاً با نوعی مدولاسیون تولید می‌کند. قلب همه مولدهای سیگنال یک نوسان ساز با فرکانس متغیر است که سیگنالی را تولید می‌کند که معمولاً موج سینوسی است. امواج سینوسی فرکانس صوتی برای آزمایش مدارهای صوتی در تجهیزات ارتباطی مورد نیاز است و امواج سینوسی در محدوده RF از حدود ۵۰۰ کیلوهرتز تا ۳۰ گیگاهرتز برای آزمایش انواع تقویت کننده‌های RF، فیلترها و مدارهای دیگر مورد نیاز است. این بخش یک نمای کلی از رایج‌ترین انواع مولدهای سیگنال مورد استفاده در آزمایش و سرویس‌های ارتباطی را ارائه می‌دهد.

فانکشن ژنراتور : فانکشن ژنراتور (مولد تابع) یک مولد سیگنال است که برای تولید امواج سینوسی، امواج مربعی و امواج مثلثی در محدوده فرکانسی تقریباً ۱٪ تا حدود ۳ مگاهرتز طراحی شده است. با تغییر مقادیر خازن و تغییر جریان شارژ با مقاومت متغیر، می‌توان طیف وسیعی از فرکانس‌ها را تولید کرد. امواج سینوسی، مربعی و مثلثی نیز به طور همزمان در جک‌های خروجی جداگانه در دسترس هستند.

فانکشن ژنراتور یکی از قابل انعطاف‌ترین مولدهای سیگنال موجود است. تمام فرکانس‌های مورد نیاز برای آزمایش صدا را پوشش می‌دهد و سیگنال‌هایی را در محدوده RF پایین ارائه می‌دهد. دقت تنظیم فرکانس برای اکثر اهداف آزمایشی دقیق است. در صورت نیاز می‌توان از فرکانس شمار برای اندازه‌گیری دقیق فرکانس استفاده کرد.

خوب است بدانید که:

فانکشن ژنراتور یکی از منعطف‌ترین ژنراتورهای موجود است. تمام فرکانس‌های مورد نیاز برای آزمایش صدا را پوشش داده و سیگنال‌هایی را در محدوده RF پایین ارائه می‌دهد.

امپانس خروجی فانکشن ژنراتور معمولاً ۵۰ اهم است. جک‌های خروجی کانکتورهای BNC هستند که با کابل کواکسیال ۵۰ یا ۷۵ اهم استفاده می‌شود. دامنه خروجی به‌طور مداوم با یک پتانسیومتر قابل تنظیم است. برخی از ژنراتورهای عملکردی شامل یک تضعیف کننده مقاومتی سوئیچ شده هستند که اجازه می‌دهد ولتاژ خروجی به سطح میلی ولت و میکروولت کاهش یابد.

به‌دلیل هزینه بسیار کم و انعطاف‌پذیری فانکشن ژنراتور، محبوب‌ترین ابزار رومیزی است که برای آزمایش کلی تقویت کننده‌های رادیویی، فیلترها و مدارهای RF فرکانس پایین استفاده می‌شود.

سیگنال ژنراتور RF : دو نوع اصلی از ژنراتورهای سیگنال RF در حال استفاده هستند. نوع اول یک نوع ساده و ارزان است که از یک نوسان ساز فرکانس متغیر برای تولید سیگنال‌های RF در محدوده ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۵۰۰ مگاهرتز استفاده می‌شود. نوع دوم سنتز فرکانس است.

این ژنراتورهای سیگنال RF ساده حاوی یک کنترل سطح خروجی هستند که می‌توان از آن برای تنظیم سیگنال به سطح دلخواه، از چند ولت به چند میلی ولت استفاده کرد. برخی از واحدها دارای تضعیف کننده‌های مرحله‌ای مقاومتی داخلی هستند تا سطح سیگنال را حتی بیشتر کاهش دهند. ژنراتورهای پیچیده‌تر دارای کنترل سطح داخلی یا کنترل بهره خودکار (AGC) هستند. این تضمین می‌کند که سیگنال خروجی در حالی که در یک محدوده فرکانس وسیع تنظیم می‌شود ثابت می‌ماند.

اکثر مولدهای سیگنال ارزان قیمت به سیگنال RF تولید شده اجراه می‌دهند تا دارای مدولاسیون دامنه باشد. به طور معمول، یک اسیلاتور صوتی داخلی با فرکانس ثابت در محدوده $400 \text{ تا } 1000$ هرتز گنجانده شده است. یک کنترل سطح مدولاسیون برای تنظیم مدولاسیون از 0° تا 100° درصد ارائه شده است. برخی از ژنراتورهای RF دارای مدولاتور فرکانس داخلی هستند.

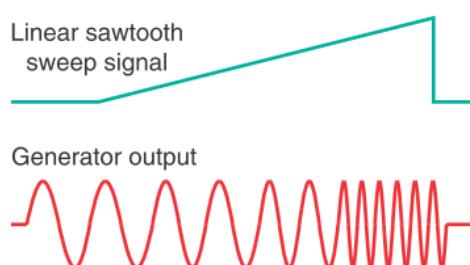
چنین مولدهای سیگنال کم هزینه در آزمایش و عیب‌یابی گیرنده‌های ارتباطی مفید هستند. آنها می‌توانند سیگنال RF را در فرکانس سیگنال برای تزریق به پایانه‌های آنتن گیرنده ارائه دهند. ژنراتور می‌تواند سیگنال‌هایی تولید کند که می‌توانند جایگزین نوسانگرهای محلی شوند یا می‌توانند روی فرکانس‌های میانی برای آزمایش تقویت کننده‌های IF تنظیم شوند.

فرکانس خروجی معمولاً توسط یک صفحه کالیبره شده بزرگ تنظیم می‌شود. دقت کالیبراسیون تنها چند درصد است، اما تنظیمات دقیق‌تری را می‌توان با ناظارت بر خروجی سیگنال روی یک شمارنده فرکانس به دست آورد.

هنگامی که از هر نوع ژنراتور مبتنی بر نوسانگرهای LC یا RC استفاده می‌شود، بهتر است ژنراتور را روشن کنید و بگذارید چند ساعت قبل از استفاده گرم شود. هنگامی که یک ژنراتور برای اولین بار روشن می‌شود، فرکانس خروجی آن به دلیل تغییر در مقادیر خازن، اندوکتانس و مقاومت تغییر می‌کند. هنگامی که مدار تا دمای کار خود گرم شد، این تغییرات متوقف می‌شود یا به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد.

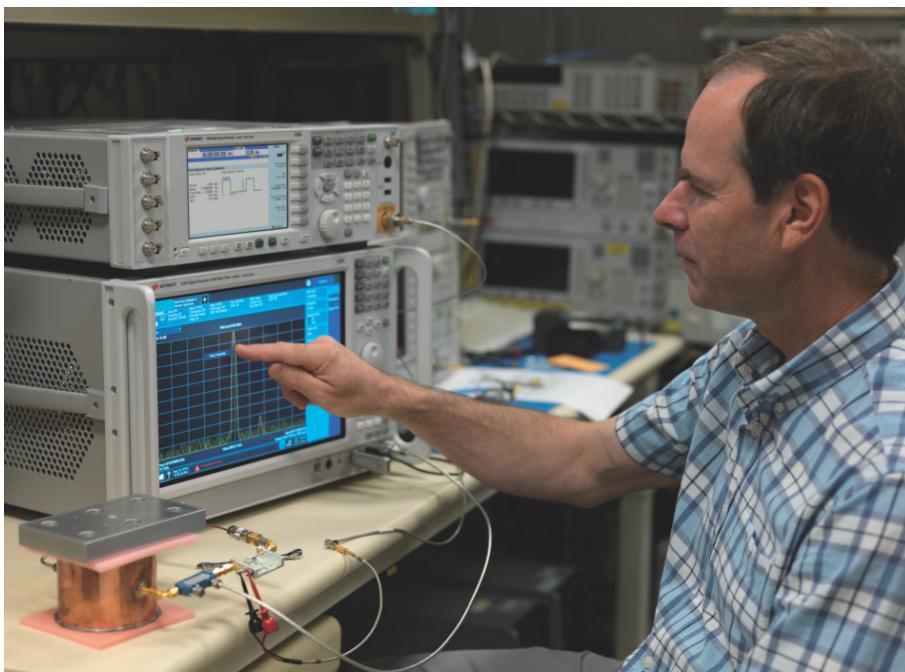
ژنراتورهای جدیدتر از تکنیک‌های سنتز فرکانس استفاده می‌کنند. این ژنراتورها شامل یک یا چند مدار میکسر هستند که به ژنراتور اجراه می‌دهد طیف بسیار وسیعی از فرکانس‌ها را پوشش دهد. ارزش بزرگ یک مولد سیگنال سنتز فرکانس، ثبات فرکانس عالی و دقت تنظیم فرکانس آن است. اکثر مولدهای سیگنال سنتز فرکانس از صفحه کلید پنل جلویی استفاده می‌کنند. فرکانس مورد نظر با صفحه کلید وارد شده و بر روی یک بازخوان دیجیتال نمایش داده می‌شود. مانند سایر مولدهای سیگنال، سطح خروجی کاملاً متغیر است. امپدانس خروجی معمولاً 50Ω اهم است و هر دو اتصال کواکسیال نوع BNC و N مورد نیاز است.

ژنراتورهای سنتز فرکانس برای فرکانس‌های 20° تا 70° گیگاهرتز در دسترس هستند. چنین ژنراتورهایی بسیار گران هستند، اما اگر اندازه‌گیری و آزمایش دقیق لازم باشد ممکن است مورد نیاز باشد.



شکل ۴.۲۲: خروجی مولد روبشی

سویپ ژنراتور (مولد روبشی): ژنراتور روبشی یک مولد سیگنال است که فرکانس خروجی آن می‌تواند به صورت خطی در محدوده خاصی تغییر کند. ژنراتورهای روبشی دارای نوسانگرهایی



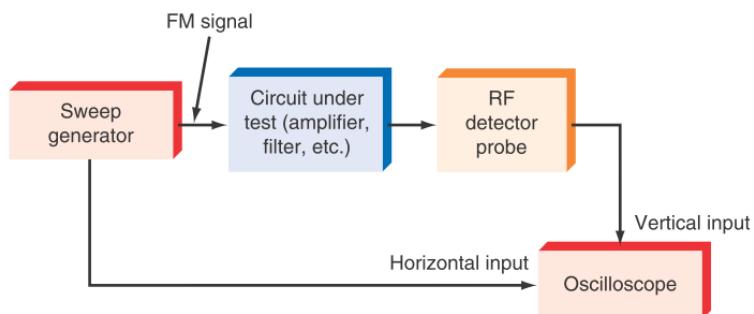
دستگاه تحلیلگر سیگنال Keysight UXA به طراحان این امکان را می‌دهد تا آنچه را که در داخل دستگاه‌شان اتفاق می‌افتد درک کنند و ثابت کنند که اهداف عملکردی آن برآورده شده یا از آن فراتر رفته است.

هستند که می‌توانند با فرکانس مدوله شوند، جایی که یک ولتاژ دندانه اره خطی به عنوان سیگنال مدوله کننده استفاده می‌شود. شکل موج خروجی حاصل یک موج سینوسی با دامنه ثابت است که فرکانس آن از حدی پایین به حد بالایی افزایش می‌یابد (شکل ۴.۲۲).

ژنراتورهای روبشی معمولاً برای ارائه وسیله‌ای با تغییر خودکار فرکانس در یک محدوده باریک برای رسم پاسخ فرکانس فیلتر یا تقویت کننده یا نشان دادن منحنی پاسخ میان گذر مدارهای هماهنگی در تجهیزاتی مانند گیرنده استفاده می‌شوند. ژنراتور روبشی به ورودی مدار متصل است و فرکانس‌های بالا و پایین با تنظیمات روی ژنراتور تعیین می‌شود. سپس ژنراتور به طور خودکار محدوده فرکانس مورد نظر را جاروب می‌کند.

در همان زمان، خروجی مدار مورد آزمایش نظارت می‌شود. دامنه خروجی با توجه به فرکانس، بسته به نوع مدار مورد آزمایش متفاوت خواهد بود. خروجی مدار به یک پروب آشکارساز RF متصل می‌شود. سیگنال حاصل، پوشش سیگنال RF است که با تغییر خروجی مدار مورد آزمایش تعیین می‌شود. سیگنال نمایش داده شده در اسیلوسکوپ یک نمودار دامنه منحنی پاسخ فرکانس است. محور افقی نشان دهنده فرکانس متغیر با زمان است و خروجی نشان دهنده دامنه خروجی مدار در هر یک از فرکانس‌ها است.

شکل (۵.۲۲) تنظیم کلی آزمایش را نشان می‌دهد. جابجایی خطی از ژنراتور روبشی به جای روبش داخلی اسیلوسکوپ استفاده می‌شود تا منحنی پاسخ نمایش داده شده کاملاً با ژنراتور هماهنگ شود.



شکل ۵.۲۲: آزمایش پاسخ فرکانسی با ژنراتور روبشی.

اکثر ژنراتورهای جارویی دارای قابلیت نشانگر هستند. به عنوان مثال، یک یا چند نوسانگر مرجع برای ارائه نشانگرهای فرکانس در نقاط انتخاب شده گنجانده شده است تا منحنی پاسخ به طور فعال تفسیر شود. افزایش نشانگر ممکن است ۱۰۰ کیلوهرتز یا ۱ مگاهرتز باشد. آنها به خروجی پروب آشکارساز RF اضافه می‌شوند (به طور خطی با آنها مخلوط می‌شوند) و سیگنال ترکیبی تقویت شده و به ورودی عمودی اسیلوسکوپ ارسال می‌شود. ژنراتورهای روبشی می‌توانند زمان قابل توجهی را در آزمایش و تنظیم مدارهای هماهنگی پیچیده در گیرندها و سایر تجهیزات صرفه جویی کنند.

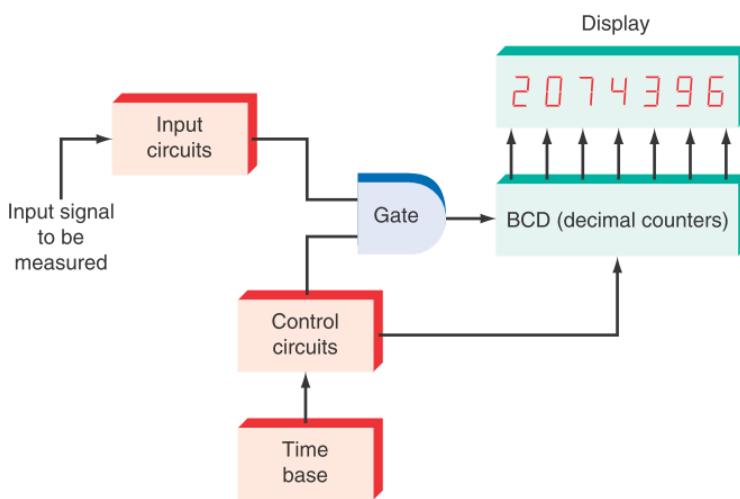
اکثر فانکشن ژنراتورهای دارای قابلیت جابجایی داخلی هستند. اگر قابلیت جارو کردن تعیین شده باشد، اغلب یک جک ورودی ارائه می‌شود تا یک موج دندانه اره خارجی برای اهداف جارو به ژنراتور متصل شود.

مولدهای شکل موج دلخواه : نوع جدیدتر مولد سیگنال، مولد شکل موج دلخواه است. از تکنیک‌های دیجیتال برای تولید تقریباً هر شکل موجی استفاده می‌کند. یک مولد شکل موج دلخواه مقادیر باینری یک شکل موج مورد نظر را در حافظه ذخیره می‌کند. این کلمات باینری به صورت متوالی به یک مبدل دیجیتال به آنالوگ تغذیه می‌شوند که یک تقریب پلکانی از موج مورد نظر را تولید می‌کند. اکثر مولدهای شکل موج دلخواه با امواج استاندارد از پیش برنامه ریزی شده مانند امواج سینوسی، مستطیلی، دندانه اراهی و مثلثی و مدولاسیون دامنه عرضه می‌شوند. این ژنراتورها طوری تنظیم شده‌اند که بتوانید شکل موج را برنامه ریزی کنید. مولد شکل موج دلخواه یک راه سریع و آسان برای تولید تقریباً هر شکل سیگنال ارائه می‌دهد. از آنجایی که از تکنیک‌های نمونه برداری دیجیتال استفاده می‌شود، حد فرکانس بالای خروجی معمولاً زیر ۱۰ گیگاهرتز است.

فرکانس شمار

یکی از پرکاربردترین ابزارهای آزمایش ارتباطی، فرکانس شمار است. فرکانس فرستنده‌ها، نوسان‌سازهای محلی و حامل، سینتی‌سایزرهای فرکانس و هر مدار یا تجهیزات تولید کننده سیگنال دیگری را اندازه‌گیری می‌کند. برای اطمینان از رعایت قوانین و مقررات و جلوگیری از تداخل با سایر سرویس‌ها، لازم است که فرکانس شمار بر روی فرکانس تعیین شده خود کار کند.

فرکانس شمار فرکانس یک سیگنال را در یک بازخوانی اعشاری نشان می‌دهد. کانتراها به عنوان ابزار نیمکتی یا واحدهای قابل حمل با باتری در دسترس هستند. بلوك دیاگرام یک شمارنده فرکانس در شکل (۶.۲۲) نشان داده شده است. تقریباً تمام شمارنده‌های دیجیتالی از شش جزء اصلی تشکیل شده‌اند: مدار ورودی، گیت، شمارنده اعشاری، نمایشگر، مدارهای کنترلی و پایه زمان. در ترکیب‌های



شکل ۶.۲۲: بلوک دیاگرام یک فرکانس شمار.

مختلف، این مدارها به شمارنده اجازه می‌دهند زمان و فرکانس را اندازه‌گیری کند.

اندازه‌گیری فرکانس : فرکانس اندازه‌گیری تعداد رویدادها یا چرخه‌های یک سیگنال است که در یک زمان معین رخ می‌دهد. واحد معمول اندازه‌گیری فرکانس هرتز یا سیکل در ثانیه است. پایه زمان سیگنال بسیار دقیقی تولید می‌کند که برای باز کردن یا فعال کردن دروازه اصلی برای مدت زمان دقیق استفاده می‌شود تا به پالس‌های ورودی اجازه عبور به شمارنده را بدهد. دقت پایه زمانی حیاتی ترین مشخصات شمارنده است. شمارنده تعداد چرخه‌های ورودی را که در بازه ۱ ثانیه‌ای رخ می‌دهد جمع می‌کند. سپس صفحه نمایش فرکانس را بر حسب سیکل در ثانیه یا هرتز نشان می‌دهد. تعداد شمارنده‌های دهه و ارقام نمایشگر نیز وضوح اندازه‌گیری فرکانس را تعیین می‌کند. هرچه تعداد ارقام بیشتر باشد، وضوح بهتری خواهد داشت. اکثر شمارنده‌های ارزان قیمت دارای حداقل نمایشگر پنج رقمی هستند. این وضوح نسبتاً خوبی را در اکثر اندازه‌گیری‌های فرکانس ارائه می‌دهد. برای اندازه‌گیری‌های فرکانس بسیار بالا، وضوح محدودتر است. با این حال، هنوز هم می‌توان با انتخاب بهینه فرکانس پایه زمانی، وضوح خوبی را با حداقل تعداد ارقام به دست آورد.

در اکثر شمارنده‌هایی که دارای پایه زمانی قابل انتخاب هستند، موقعیت نقطه اعشار نمایشگر به طور خودکار با تنظیم سیگنال پایه زمانی تنظیم می‌شود. به این ترتیب نمایشگر همیشه فرکانس را بر حسب واحد هرتز، کیلوهertz یا مگاهرتز نشان می‌دهد. برخی از شمارنده‌های پیشرفته‌تر دارای یک ویژگی انتخاب پایه زمانی خودکار به نام تنظیم خودکار هستند. مدارهای تنظیم خودکار ویژه در شمارنده به طور خودکار بهترین فرکانس پایه زمانی را برای حداکثر وضوح اندازه‌گیری بدون افزایش دامنه انتخاب می‌کند. محدوده بیش از حد^۵ حالتی است که زمانی رخ می‌دهد که از قابلیت شمارش شمارنده در طول فاصله شمارش فراتر رود. تعداد شمارندها و ارقام نمایشی، قابلیت شمارش و در نتیجه نقطه فراتر از یک پایه زمانی معین را تعیین می‌کند.

پیش مقیاس سازی : تمام تکنیک‌های اندازه‌گیری فرکانس‌های بالا شامل فرآیندی است که

^۵Overranging

فرکانس بالا را به فرکانس پایین‌تر متناسبی تبدیل می‌کند که می‌تواند با مدارهای شمارش معمولی اندازه‌گیری شود. این تبدیل فرکانس بالا به فرکانس پایین‌تر تبدیل پایین^۴ نامیده می‌شود. پیش مقیاس کردن یک تکنیک تبدیل پایین است که شامل تقسیم فرکانس ورودی بر فاکتوری است که سیگنال حاصل را در محدوده فرکانس معمولی شمارنده قرار می‌دهد. توجه به‌این نکته مهم است که اگرچه پیش مقیاس‌سازی امکان اندازه‌گیری فرکانس‌های بالاتر را می‌دهد، اما بدون معایب نیست، یکی از آنها از دست دادن وضوح است. یک رقم تفکیک پذیری به‌ازای هر دهه پیش مقیاس پذیری از بین می‌رود.

تکنیک پیش مقیاس برای گسترش قابلیت اندازه‌گیری فرکانس شمارنده به‌طور گسترده استفاده می‌شود. پیاده‌سازی آن با آی‌سی‌های مدرن و پرسرعت ساده است. همچنین مقرنون به‌صرفه‌ترین روش افزایش دامنه شمارش است. پیش مقیاس کننده‌ها را می‌توان در پیشخوان تعییه کرد و در صورت لزوم روشن کرد. همچنین، می‌توان از پیش‌اسکیل‌های خارجی، که به‌طور گسترده برای شمارنده‌های کم‌هزینه در دسترس هستند، استفاده کرد. اکثر پیش مقیاس کننده‌ها در محدوده ۲۰۰ مگاهرتز تا ۲۰ گیگاهرتز کار می‌کنند. برای فرکانس‌های بالاتر از ۲۰ گیگاهرتز، باید از تکنیک‌های پیچیده‌تری برای تبدیل پایین استفاده کرد.

آنالایزر طیف (تحلیلگر طیف)

تحلیلگر طیف یکی از کاربردی‌ترین و محبوب‌ترین ابزارهای آزمایش دستگاه‌های ارتباطی است. عملکرد اصلی آن نمایش سیگنال‌های دریافتی در حوزه فرکانس است. اسیلوسکوپ‌ها برای نمایش سیگنال‌ها در حوزه زمان استفاده می‌شوند. مدارهای جارو در اسیلوسکوپ پرتو الکترونی در لامپ اشعه کاتدی (CRT) را در سراسر صفحه به‌صورت افقی منحرف می‌کنند. این نشان دهنده واحدهای زمان است. سیگنال ورودی که باید نمایش داده شود برای انحراف پرتو الکترونی به‌صورت عمودی اعمال می‌شود. بنابراین، سیگنال‌های الکترونیکی که ولتاژ‌هایی هستند که نسبت به زمان رخ می‌دهند، روی صفحه اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شوند.

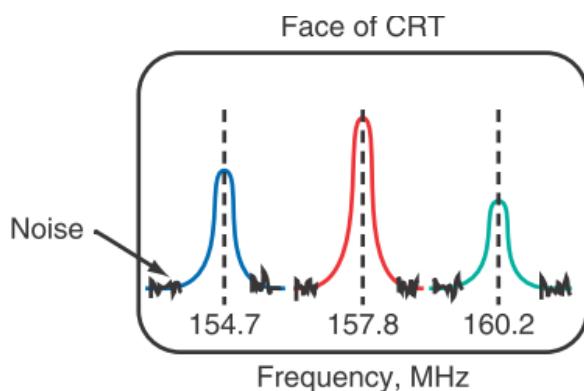
خوب است بدانید که:

شاید پرکاربردترین تحلیلگر طیف RF از نوع سوپرهترووداین باشد.

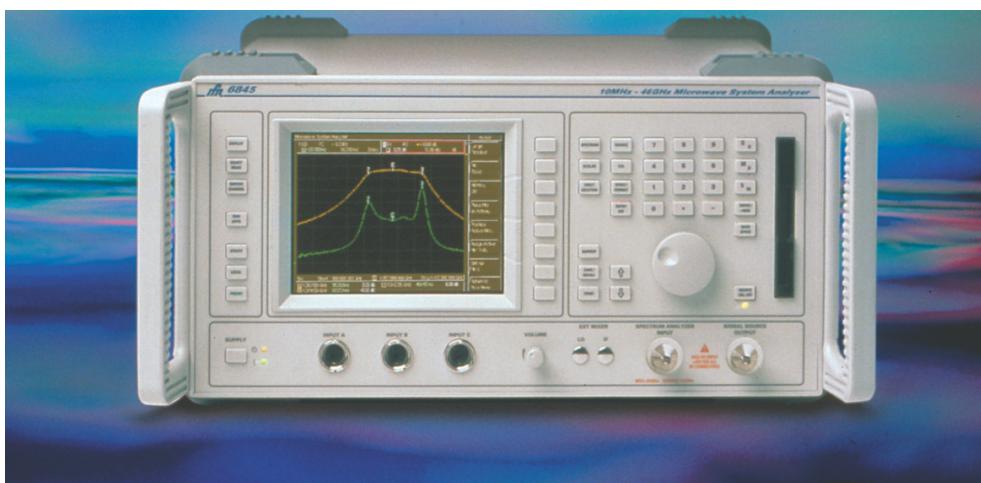
آنالایزر طیف نمایش یک اسیلوسکوپ را با مدارهایی ترکیب می‌کند که سیگنال را به‌اجزای فرکانس منفرد دیکته شده توسط تحلیل فوریه سیگنال تبدیل می‌کند. سیگنال‌های اعمال شده به‌ورودی تحلیلگر طیف به‌صورت خطوط عمودی یا پالس‌های باریک در فرکانس عملکردشان نشان داده می‌شوند.

شکل (۷.۲۲) نمایش یک تحلیلگر طیف را نشان می‌دهد. نمایشگر افقی در واحدهای فرکانس کالیبره می‌شود و قسمت عمودی نمایشگر بر حسب ولتاژ، توان یا دسی‌بل کالیبره می‌شود. صفحه نمایش آنالایزر طیف سه سیگنال را در فرکانس‌های $154\frac{7}{8}$ ، $157\frac{1}{8}$ و $160\frac{2}{2}$ مگاهرتز نشان می‌دهد. ارتفاع عمودی نشان دهنده قدرت نسبی دامنه هر سیگنال است. هر سیگنال ممکن است نشان دهنده حامل یک فرستنده رادیویی باشد. تجزیه و تحلیل طیفی از هر نویز بین سیگنال‌ها نشان داده شده است.

^۴Down Conversion



شکل ۷.۲۲: نمایش فرکانس یک تحلیلگر طیف.



تحلیلگر طیف شرکت Tektronix که فرکانس‌های ۱۴ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد.

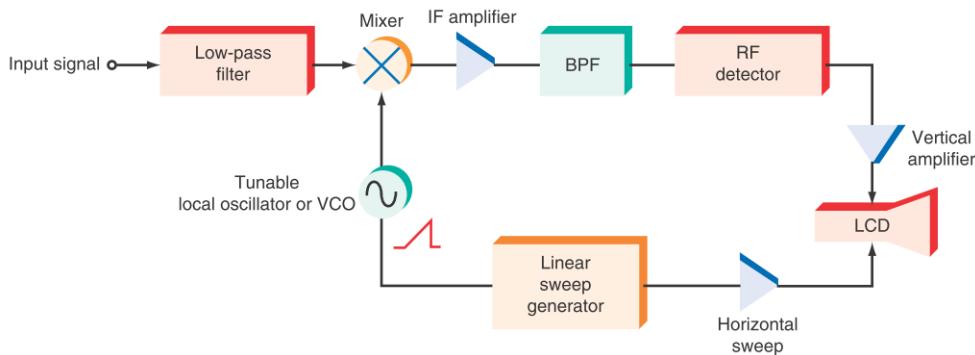
تحلیلگر طیف می‌تواند برای مشاهده یک سیگنال پیچیده از نظر اجزای فرکانس آن استفاده شود. یک گرتیکول روی صفحه CRT اجازه می‌دهد تا فاصله فرکانس بین اجزای فرکانس مجاور تعیین شود. دامنه عمودی مقیاس بر حسب دسی بل کالیبره می‌شود. تحلیلگر طیف در تجزیه و تحلیل سیگنال‌های پیچیده‌ای که ممکن است تجزیه و تحلیل آنها دشوار باشد یا محتوای آنها غیرقابل تشخیص باشد بسیار مفید است.

چهار تکنیک اصلی تحلیل طیف عبارتند از: بانک فیلترها، فیلتر روبشی، سوپرهترووداین طیف روبشی و تبدیل فوریه سریع^۴ (FFT). همه این روش‌ها یک کار را انجام می‌دهند، یعنی سیگنال ورودی را به اجزای فرکانس موج سینوسی جداگانه تجزیه می‌کنند. برای پیاده سازی هر نوع از هر دو روش آنالوگ و دیجیتال استفاده می‌شود. روش‌های سوپرهترووداین و FFT بیشترین استفاده را دارند و در زیر مورد بحث قرار می‌گیرند.

سوپرهترووداین : شاید پرکاربردترین تحلیلگر طیف RF، نوع سوپرهترووداین (شکل ۸.۲۲) باشد.

^۴Fast Fourier Transform (FFT)

این شامل یک قسمت جلویی باند پهن، یک میکسر و یک نوسان ساز محلی قابل تنظیم است. محدوده فرکانس ورودی توسط یک فیلتر پایین گذر در ورودی به مقداری حد بالایی محدود می‌شود. خروجی میکسر تفاوت بین جزء فرکانس سیگنال ورودی و فرکانس نوسان ساز محلی است. این فرکانس میانی (IF) است.



شکل ۸.۲۲: تحلیلگر طیف RF سوپرهتروداین.

با افزایش فرکانس نوسان ساز محلی، خروجی میکسر در IF باقی می‌ماند. هر جزء فرکانس سیگنال ورودی توسط سیگنال نوسان ساز محلی به مقدار IF تبدیل می‌شود. اگر اجزای فرکانس بسیار نزدیک به یکدیگر باشند و پهنهای باند فیلتر باند IF (BPF) گسترده باشد، نمایشگر فقط یک پالس گسترده خواهد بود. باریک کردن پهنهای باند BPF باعث می‌شود تا اجزای با فاصله نزدیک تری شناسایی شوند. اکثر آنالایزرهای طیف دارای چندین محدوده انتخابی قابل تغییر برای IF هستند.

آنالایزرهای طیف در پیکربندی‌های زیادی با مشخصات مختلف موجود هستند و برای نمایش سیگنال‌های تقریباً ۱۰۰ کیلوهرتز تا تقریباً ۷۰ گیگاهرتز طراحی شده‌اند. اکثر آنالایزرهای طیف RF و مایکروویو سوپرهتروداین هستند. آنالایزرهای طیف معمولاً برای ارائه دقت اندازه‌گیری نسبتاً خوبی سیگنال کالیبره می‌شوند. اکثر سیگنال‌ها به عنوان اندازه‌گیری قدرت یا دسیبل نمایش داده می‌شوند، اگرچه برخی از آنالایزورها نمایشگرهای سطح ولتاژ را ارائه می‌دهند. ورودی معمولاً از طریق یک کابل کواکسیال و کانکتور ۵۰ اهم اعمال می‌شود.

تحلیلگر طیف FFT: روش تبدیل فوریه سریع (FFT) تجزیه و تحلیل طیف بر تجزیه و تحلیل ریاضی FFT متمکی است. آنالایزرهای طیف FFT نمایشگری با وضوح بالا ارائه می‌دهند و به طور کلی نسبت به سایر انواع آنالایزر طیف برتری دارند. با این حال، فرکانس بالای سیگنال ورودی به فرکانس‌هایی در محدوده ددها مگاهertz محدود می‌شود.

علاوه بر اندازه‌گیری طیف سیگنال، آنالایزرهای طیف در تشخیص هارمونیک‌ها و سایر سیگنال‌های جعلی تولید شده ناخواسته مفید هستند. از آنالایزرهای طیف می‌توان برای نمایش نسبت سیگنال به نویز نسبی استفاده کرد و برای تجزیه و تحلیل اجزای مدولاسیون و نمایش طیف هارمونیک یک قطار پالس مستطیلی ایده‌آل هستند.

علیرغم قیمت بسیار بالای آنها (معمولًاً ۱۰۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ دلار)، آنالایزرهای طیف به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسیاری از کاربردهای آزمایش و اندازه‌گیری حیاتی، به ویژه در توسعه

تجهیزات RF جدید و انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های نهایی واحدهای تولیدی، نیاز به استفاده از آنها دارند. آنالایزرهای طیف همچنین در این زمینه برای آزمایش سیستم‌های تلویزیون کابلی، سیستم‌های تلفن همراه، شبکه‌های فیبر نوری و سایر سیستم‌های ارتباطی پیچیده استفاده می‌شوند.

نتورک آنالایزر (تحلیلگر شبکه)

تحلیلگر شبکه یک ابزار آزمایشی است که برای تجزیه و تحلیل مدارهای خطی، بیویژه مدارهای RF طراحی شده است. این یک ابزار ترکیبی است که شامل یک مولد موج سینوسی با برد وسیع و یک خروجی CRT است که نه تنها نمودارهای فرکانس را مانند یک تحلیلگر طیف نمایش می‌دهد، بلکه نمودارهای تغییر فاز در مقابل فرکانس را نیز نمایش می‌دهد.

تحلیلگرهای شبکه توسط مهندسان برای تعیین ویژگی‌های عملکردی خاص مداری که در حال طراحی هستند، مانند فیلتر، تقویت‌کننده یا میکسر استفاده می‌شوند. آنها همچنین در تجزیه و تحلیل خطوط انتقال و حتی اجزای جداگانه مفید هستند. تحلیلگر شبکه یک موج سینوسی با فرکانس جابجایی اعمال می‌کند و خروجی مدار را اندازه می‌گیرد. سپس داده‌های اندازه‌گیری به دست آمده برای تولید یک نمایشگر خروجی مانند نمودار دامنه در برابر فرکانس، تغییر فاز در برابر فرکانس یا حتی نمودار مقادیر امپدانس پیچیده در نمایشگر نمودار اسمیت استفاده می‌شود.

تحلیلگرهای شبکه به‌طور کامل عملکرد یا خصوصیات یک مدار را توصیف می‌کنند. این نوع اطلاعات نه تنها برای مهندسانی که مدارها را ایجاد می‌کنند، بلکه برای کسانی که در تولید باید مدار را تولید و آزمایش کنند نیز مفید است. علیرغم هزینه بسیار بالای آنها، این ابزارها به دلیل اطلاعات ارزشمندی که ارائه می‌دهند و مقدار زیادی در طراحی و زمان آزمایش صرفه جویی می‌کنند، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

خوب است بدانید که:

اگرچه آنالایزرهای شبکه گران هستند، اما برای تعیین ویژگی‌های عملکرد اجزا یا مدارهایی که نتایج را در نمایشگر تولید می‌کنند بسیار ارزشمند هستند.

آنالایزر و سیگنال ژنراتور برداری

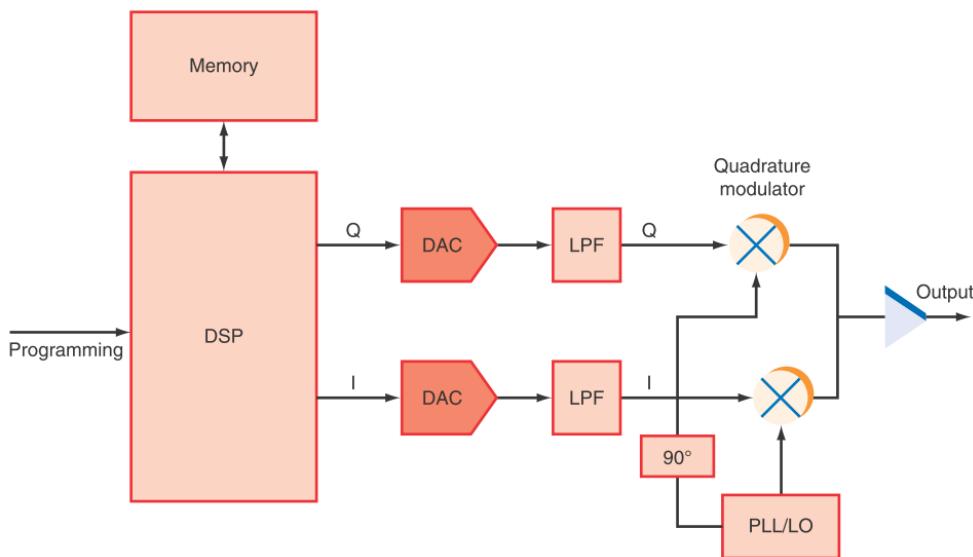
از آنجایی که سیگنال‌های بی‌سیم در طول سال‌ها بسیار پیچیده و متنوع شده‌اند، ایجاد ابزارهای آزمایشی برای تجزیه و تحلیل و تولید این سیگنال‌ها ضروری بوده است. تحلیلگرهای و ژنراتورهای سیگنال برداری آن ابزارها هستند. آن‌ها می‌توانند سیگنال‌های FSK، QAM، QPSK، OFDM، 3G، WiMAX، Wi-Fi، WCDMA و سایر سیگنال‌هایی را که در فناوری‌های بی‌سیم پر کاربرد مانند HSPA، LTE، WCDMA، WCDMA، HSPA، و همچنین استانداردهای رادار و ماهواره‌ای منحصر به‌فرد راچ راچ هستند، ایجاد یا تجزیه و تحلیل کنند.

سیگنال ژنراتور برداری : یک مولد سیگنال برداری^۱ (VSG) نوعی از یک مولد شکل موج دلخواه است. یک مثال ساده شده در شکل (۹.۲۲) نشان داده شده است. سیگنال پیچیده، مانند OFDM، در مدار DSP تولید می‌شود، که اجزای هم فاز^۹ (I) و تربيعی^{۱۰} (Q) را تولید می‌کند. سیگنال‌های I و Q سپس به DAC می‌روند که سیگنال‌های آنالوگ معادل را تولید می‌کنند.

^۱Vector Signal Generator

^۹In Phase (I)

^{۱۰}Quadrature (Q)



شکل ۹.۲۲: بلوک دیاگرام سیگنال ژنراتور برداری

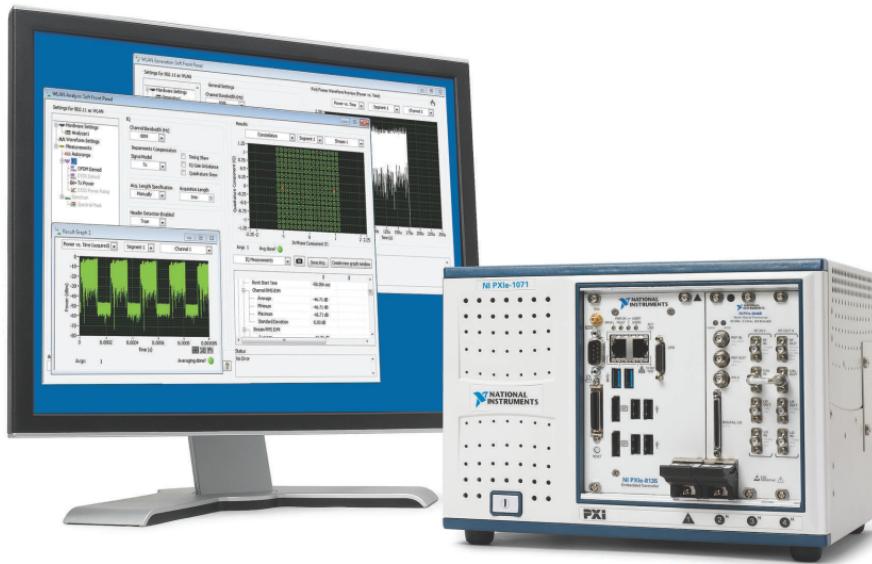
اینها سپس به یک مدولاتور تربیعی به همراه یک سیگنال حامل نهایی از نوسان‌ساز محلی (LO) (LO) ارسال می‌شوند. خروجی مدولاتور معمولاً تقویت و روی یک تضعیف کننده اعمال می‌شود که اجزه می‌دهد سطح سیگنال تنظیم شود. در برخی از ابزارها، سیگنال ممکن است در یک فرکانس میانی پایین‌تر (IF) تولید شود و سپس توسط یک مبدل بالا به فرکانس خروجی بالاتر مورد نظر مخلوط شود.

اکثر VSG‌ها با فرمتهای سیگنال از پیش برنامه ریزی شده برای رایج‌ترین استانداردهای بی‌سیم، مانند 802.11 یا LTE می‌شوند. VSG‌ها همچنین ممکن است برای فرمتهای خاص یا تغییرات استانداردهای موجود توسط کاربر برنامه‌ریزی شوند. یک VSG تجاری در شکل (۱۰.۲۲) نشان داده شده است.

سیگنال آنالایزر برداری : تحلیلگر سیگنال برداری^{۱۱} (VSA) ابزاری است که برای ضبط و ارائه راهی برای جداسازی سیگنال برای مشاهده جزئیات آن طراحی شده است. یک VSA شبیه به یک تحلیلگر طیف است اما دارای گزینه‌های خروجی بیشتری است. VSA در طراحی برای اطمینان از مطابقت مدارهای جدید با استانداردهای مورد نظر مفید است. همچنین در عیب‌یابی برای مکان‌یابی مشکلات و تغییرات استانداردها مفید است. یک VSA معمولاً می‌تواند یک طیف فرکانس، یک نمودار صورت فلکی مدولاسیون، یک کد دیجیتالی یا حتی سیگنال‌های استاندارد دامنه زمانی آنالوگ مانند یک اسیلوسکوپ را نمایش دهد.

شکل (۱۱.۲۲) یک بلوک دیاگرام عمومی از یک VSA را نشان می‌دهد. سیگنال RF مورد تجزیه و تحلیل به تقویت کننده و/یا یک تضعیف کننده که سطح را تنظیم می‌کند تغذیه می‌شود. سیگنال به یک میکسر اعمال می‌شود که سیگنال را به یک IF با پهنای باند خاص تبدیل می‌کند. یک فیلتر باند گذر پهنای باند را تعیین می‌کند و یک فیلتر پایین گذر به عنوان فیلتر ضد آلیاسینگ (هم‌پوشانی)

^{۱۱}Vector Signal Analyzer



شکل ۱۰.۲۲: یک سیگنال برداری مدولار فرستنده گیرنده که حاوی VSA و VSG است.

برای مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) عمل می‌کند. ADC یک نسخه نمونه‌برداری شده از سیگنال را تولید می‌کند که توسط بقیه VSA برای انجام آنالیز آن استفاده می‌شود. داده‌های نمونه‌گیری شده ذخیره می‌شوند و برای پردازش بیشتر مرتب می‌شوند.

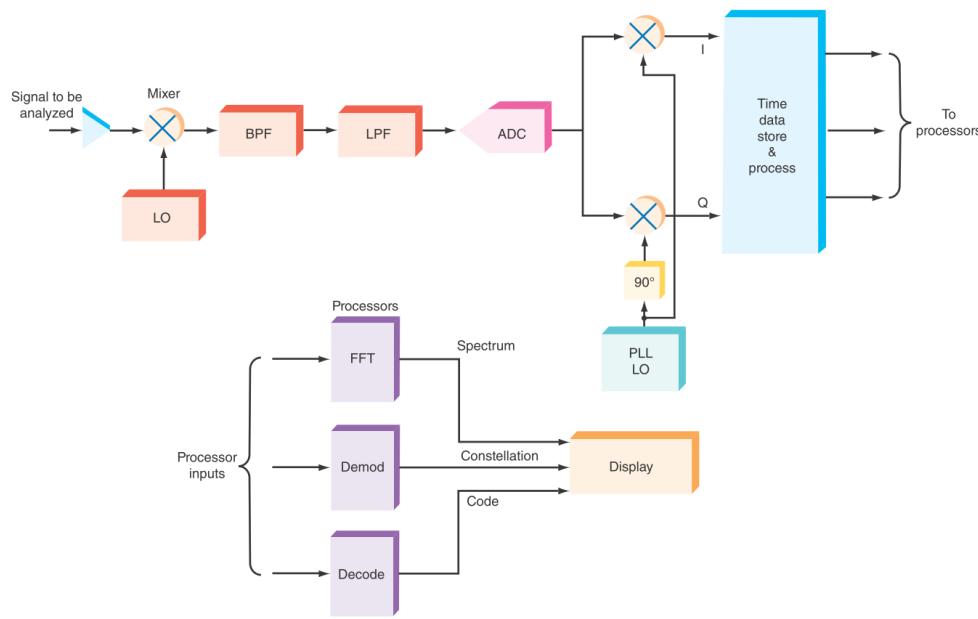
سپس سیگنال ورودی دیجیتالی شده به همراه یک سیگنال نوسانگر محلی به یک دمودولاتور مربعی می‌رود که در آن اجزای I و Q سیگنال بازیابی می‌شوند. سیگنال‌های I و Q در صورت نیاز ذخیره و تصحیح می‌شوند و بسته به خروجی انتخاب شده به یکی از چندین پردازنده ارسال می‌شوند. اگر خروجی طیف فرکانس مورد نظر باشد، سیگنال‌ها به یک پردازشگر تبدیل فوریه سریع (FFT) می‌روند، جایی که اجزای فرکانس سیگنال تعیین می‌شوند و سپس در قالب طیف فرکانس سنتی نمایش داده می‌شوند.

گرینه دیگر دمودولاسیون است که داده‌های خاص را در قالب نمایش نمودار صورت فلکی بازیابی می‌کند. این به ویژه برای سیگنال‌های PSK و QAM مفید است. این نوع خروجی به شما امکان می‌دهد بزرگی بردار خطا (EVM) سیگنال را اندازه‌گیری کنید.

برای تجزیه و تحلیل CDMA، پردازنده می‌تواند کدگذاری منحصر به فرد مرتبط با سیگنال را تولید و نمایش دهد. متناظراً ممکن است یک خروجی استاندارد دامنه زمانی انتخاب شود. برخی از VSA‌ها همچنین می‌توانند سیگنال‌های MIMO را در خود جای دهند.

شکل (۱۰.۲۲) برخی از خروجی‌های معمولی را نشان می‌دهد. شکل (۱۰.۲۲) یک VSA تجاری را نشان می‌دهد. برخی از تولید کنندگان مازول‌های VSA و VSG را با هم بسته‌بندی می‌کنند تا یک فرستنده سیگنال برداری را تشکیل دهند.

امروزه با استفاده از اکثر تجهیزات بی‌سیم از OFDM و سایر اشکال پیشرفته فناوری سیگنال، VSG و VSA به ابزارهای آزمایشی انتخابی برای طراحی، آزمایش ساخت و عیب یابی میدانی تبدیل



شکل ۱۱.۲۲: بلوك دياگرام آنالايizer سيگنال برداری.

شده‌اند.

سنجهش شدت میدان

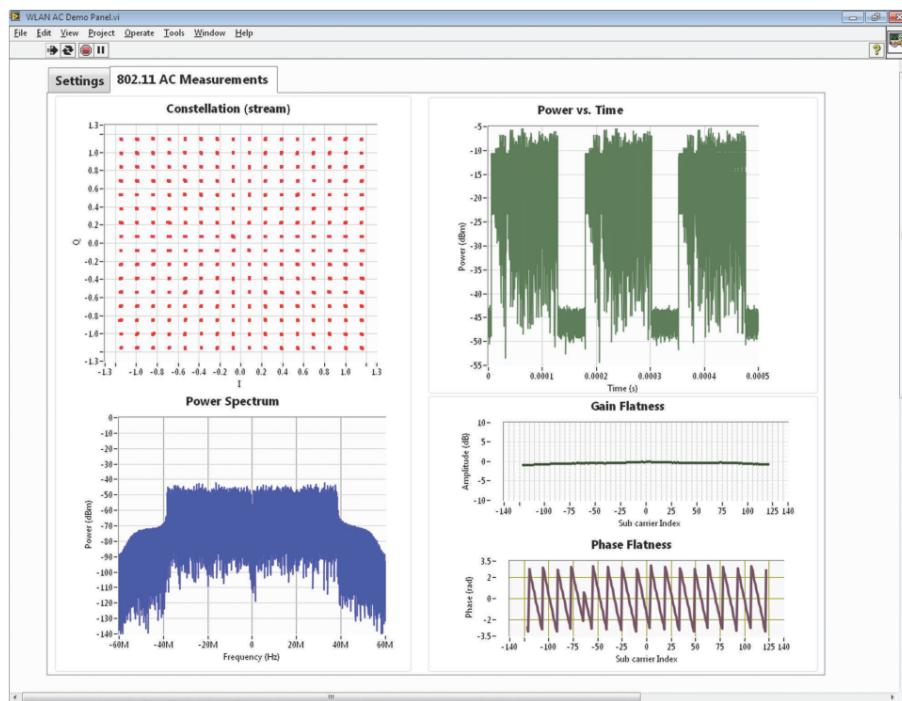
یکی از کم‌هزینه‌ترین تجهیزات آزمایش RF، سنج قدرت میدان (FSM) است، یک دستگاه قابل حمل که برای تشخیص وجود سیگنال‌های RF در نزدیکی آنتن استفاده می‌شود. FSM یک آشکارساز حساس برای انرژی RF است که توسط یک فرستنده به آنتن تابش می‌شود. این یک نشانه نسبی از قدرت امواج الکترومغناطیسی است که به‌متر می‌رسد.

شدت سنج میدان یک آنتن شلاقی عمودی است که معمولاً از نوع تلسکوپی است که به یک آشکارساز دیودی ساده متصل است. آشکارساز دیود دقیقاً مانند مدار یک رادیو کریستالی ساده یا یک پروب آشکارساز است، همانطور که قبلًا توضیح داده شد، اما بدون مدارهای تنظیم شده به طوری که واحد سیگنال‌ها را در هر فرکانسی دریافت کند.

سنج قدرت میدان اندازه‌گیری دقیقی از قدرت سیگنال ارائه نمی‌دهد. در واقع، تنها هدف آن تشخیص وجود یک سیگنال در نزدیکی (در حدود ۱۰۰ فوت یا کمتر) است. هدف آن تعیین این است که آیا یک فرستنده و سیستم آنتن مشخص کار می‌کنند یا خیر. هر چه متر به فرستنده و آنتن نزدیکتر شود، سطح سیگنال بالاتر می‌رود.

یک عملکرد مفید متر، تعیین الگوی تشعشع یک آنتن است. سنج قدرت میدان طوری تنظیم می‌شود که حداقل قرائت را در جهت بیشترین تابش از آنتن بدهد. متر در یک دایره با شعاع ثابت در اطراف آنتن به مدت ۳۶۰ درجه حرکت می‌کند. هر ۵ درجه یا ۱۰ درجه، قدرت میدان از متر گرفته می‌شود. مجموعه خوانش‌های حاصل را می‌توان بر روی کاغذ گراف قطبی ترسیم کرد تا الگوی تابش افقی آنتن را آشکار کند.

انواع دیگر قدرت سنج میدان موجود است. ممکن است یک میتر ساده برای ترکیب یک مدار



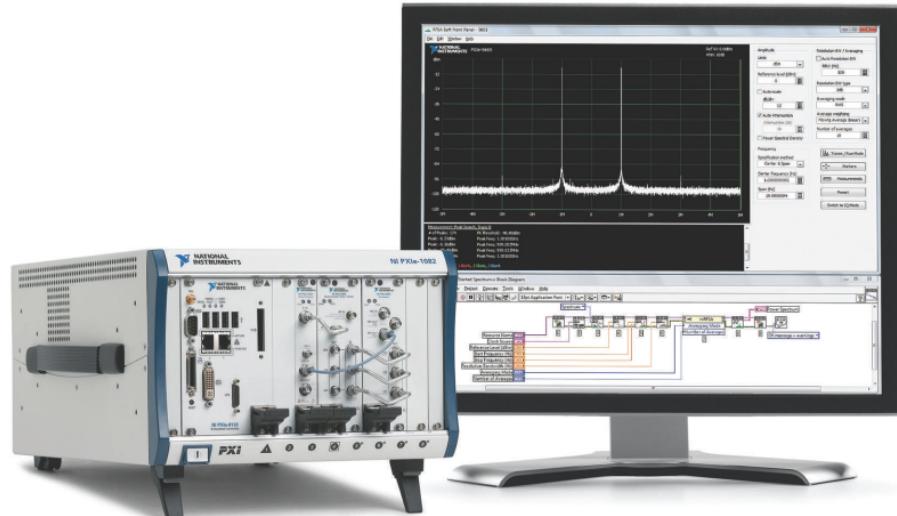
شکل ۱۲.۲۲: گزینه‌های خروجی VSA که معمولاً در دسترس هستند، شامل نمودار صورت فلکی برای QAM، نمودار قدرت در مقابل زمان، نمودار توان در مقابل فرکانس، و نمودارهای مسطحیت فاز یا افزایش است.

تشدید برای تنظیم ورودی به فرکانس فرستنده خاص ساخته شود. این باعث می‌شود که متر حساس‌تر شود. برخی از میترها دارای یک تقویت کننده داخلی هستند تا میتر را در فواصل بیشتر از آنچن حساس‌تر و مفیدتر کند.

یک قدرت سنج میدان مطلق (و نه نسبی) برای اندازه‌گیری دقیق قدرت سیگنال موجود است. قدرت سیگنال تشعشعی معمولاً بر حسب میکروولت بر متر ($\mu\text{V}/\text{m}$) اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار ولتاژی است که سیگنال به آنتنی به طول ۱ متر القا می‌کند. یک میتر قدرت میدان مطلق بر حسب واحد میکروولت بر متر کالیبره می‌شود. اندازه‌گیری سیگنال بسیار دقیق را می‌توان انجام داد.

سایر ابزارهای آزمایش

صدها نوع ابزار آزمایش ارتباطی وجود دارد که اکثر آنها بسیار تخصصی هستند. مواردی که قبلاً در این فصل توضیح داده شد، به علاوه موارد ذکر شده در جدول بالا، رایج ترین هستند، اما بسیاری دیگر از جمله ابزارهای آزمایش ویژه بسیاری وجود دارد که توسط سازندگان تجهیزات برای آزمایش واحدهای تولیدی خود یا خدمات رسانی به تجهیزات مشتریان طراحی شده‌اند.



شکل ۱۳.۲۲: National Instruments PXIe 5665 VSA دارای محدوده فرکانس تا ۳/۶ یا ۱۴ گیگاهرتز با گزینه‌های پهنای باند ۲۵ یا ۵۰ مگاهرتز.

هدف

مدار هماهنگی متغیر با یک نشانگر که نشان می‌دهد چه زمانی مدار هماهنگی به سیگنالی که توسط فرستنده بهنمایشگر(میتر) کوپل شده است تشدید می‌شود. یک نشانه تقریبی از فرکانس ارائه می‌دهد.

ابزاری که معمولاً از نوع پل است که امپدانس یک مدار، یک قطعه یا حتی یک آنتن را در فرکانس‌های RF بهدقت اندازه‌گیری می‌کند.

یک نوسان ساز قابل تنظیم که برای تعیین فرکانس تقریبی تشدید هر مدار رزونانس LC قطع شده استفاده می‌شود. سلف نوسان ساز به‌سلف مدار هماهنگی کوپل و نوسانگر تا زمانی تنظیم می‌شود که بازخورد آن به عنوان انرژی گرفته شده توسط مدار هماهنگی کاهش یابد، که با یک "انحراف" یا کاهش جریان در یک میتر داخلی نشان داده می‌شود. فرکانس تقریبی از یک صفحه کالیبره شده خوانده می‌شود. مدار پل که

توسط یک منبع ولتاژ نویز تصادفی هدایت می‌شود (معمولًا یک دیود زنر با بایاس معکوس که نویز تصادفی "سفید" یا شبه تصادفی "صورتی" تولید می‌کند) که دارای آنتن یا کابل کواکسیال به عنوان یک پایه پل است. برای اندازه‌گیری امپدانس مشخصه آنتن و اندازه‌گیری ضرب سرعت و طول کابل کواکسیال استفاده می‌شود.

ابزار

موج سنج جذبی

امپدانس سنج

نوسان ساز دیپ (Dip)

پل نویز

۲.۲۲ آزمایش‌های رایج در ارتباطات

صدها و حتی هزاران آزمایش مختلف بر روی تجهیزات ارتباطی انجام می‌شود. با این حال، برخی از آزمایش‌های رایج به طور گستردگی بر روی انواع تجهیزات ارتباطی استفاده می‌شود. این بخش متداول‌ترین آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده در سرویس تجهیزات ارتباطی را خلاصه می‌کند. بیشتر آزمایش‌هایی که در اینجا توضیح داده می‌شوند بر تجهیزات استاندارد ارتباط رادیویی، مرکز هستند. آزمایش‌های فرستنده، گیرنده و آنتن، و همچنین آزمایش‌های ویژه مایکروویو، آزمایش‌های کابل فیبر نوری، و آزمایش‌های روی تجهیزات ارتباطی داده‌ها توضیح داده خواهد شد. به خاطر داشته باشید که روش‌های آزمایش شرح داده شده کلی هستند. برای انجام آزمایش‌های خاص، تنظیمات آزمایش توصیه شده توسط سازنده تجهیزات آزمایش را دنبال کنید. همیشه دفترچه راهنمای تجهیزات آزمایش و تجهیزات در حال سرویس را به عنوان مرجع در دسترس داشته باشید.

آزمایش‌های فرستنده

چهار آزمایش اصلی بر روی اکثر فرستنده‌ها انجام می‌شود: آزمایش فرکانس، مدولاسیون، و توان، و آزمایش برای هر جزء سیگنال خروجی نامطلوب مانند هارمونیک‌ها و تشعشعات پارازیتیک (انگلی). این آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها به دلایل مختلفی انجام می‌شود. اولاً، هر تجهیزاتی که سیگنال رادیویی را ساطع می‌کند، توسط قوانین و مقررات کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC)^{۱۲} کنترل می‌شود. برای اینکه یک فرستنده به هدف مورد نظر خود برسد، FCC فرکانس، توان و سایر اندازه‌گیری‌هایی را که تجهیزات باید با آنها مطابقت داشته باشد، مشخص می‌کند. دوم، آزمایش‌ها عموماً زمانی انجام می‌شوند که تجهیزات برای اولین بار نصب می‌شوند تا مطمئن شوند که همه چیز به درستی کار می‌کند. سوم، چنین آزمایشاتی ممکن است برای عیب‌یابی تجهیزات انجام شود. اگر تجهیزات به درستی کار نمی‌کنند، این آزمایش‌ها اولین آزمایش‌هایی هستند که باید برای شناسایی مشکل انجام شوند.

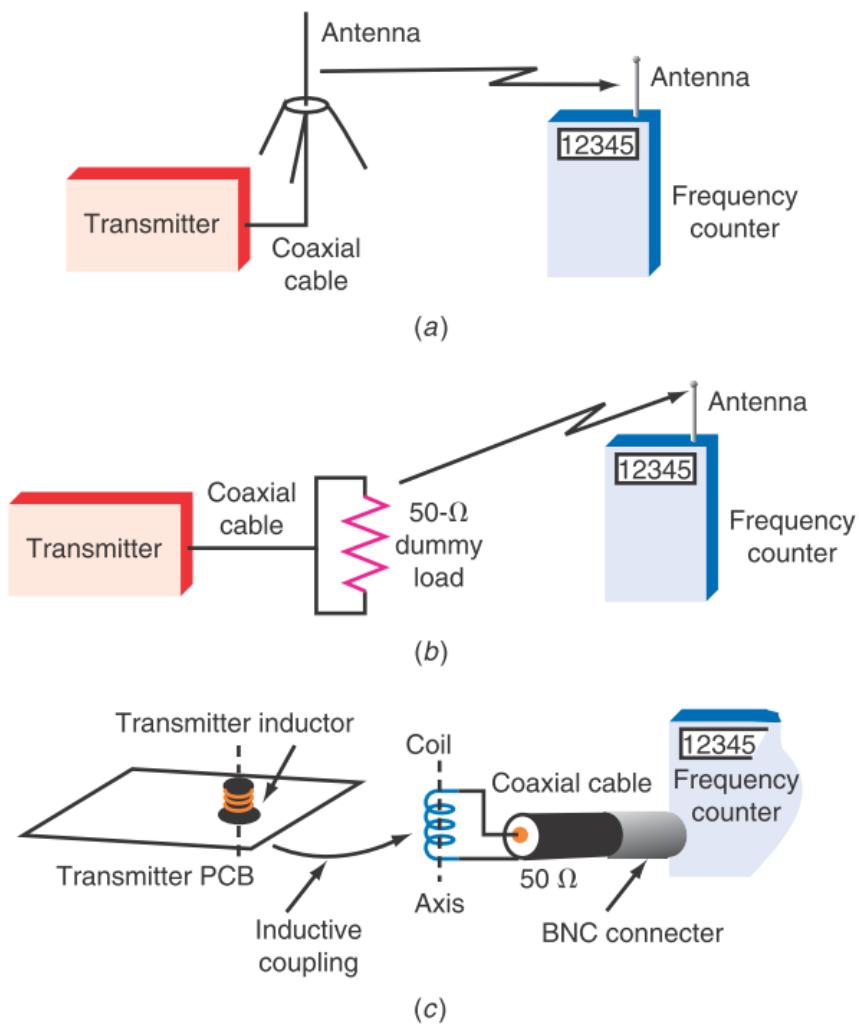
خوب است بدانید که:

برای انجام آزمایش‌های خاص، همیشه از تنظیمات آزمایش توصیه شده توسط سازنده تجهیزات آزمایش پیروی کنید. دفترچه‌های راهنمای تجهیزات آزمایش و تجهیزات در حال سرویس را به عنوان مرجع در دسترس نگه دارید.

اندازه‌گیری فرکانس: صرف نظر از روش تولید حامل، فرکانس فرستنده مهم است. فرستنده باید بر روی فرکانس تعیین شده کار کند تا با مقررات FCC مطابقت داشته باشد و اطمینان حاصل شود که سیگنال می‌تواند توسط گیرنده هماهنگ با آن فرکانس دریافت شود.

خروجی یک فرستنده مستقیماً برای تعیین فرکانس آن اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال ارسالی به طور مستقل دریافت و فرکانس آن بر روی یک فرکانس شمار اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۱۴.۲۲) چندین روش برای دریافت سیگنال را نشان می‌دهد. بسیاری از شمارنده‌های فرکانس طراحی شده برای کارهای ارتباطی دارای آنتنی هستند که سیگنال را مستقیماً از فرستنده دریافت می‌کند [شکل (۱۴.۲۲)(الف)]. فرستنده در حالی که به آنتن معمولی خود وصل است کلید می‌خورد (روشن می‌شود) و آنتن روی شمارنده سیگنال را می‌گیرد و آن را به سیگنالی تبدیل می‌کند که می‌تواند توسط مدار شمارنده اندازه‌گیری شود. هیچ مدولاسیونی نباید اعمال شود، به خصوص اگر از FM استفاده شود.

^{۱۲} Federal Communications Commission (FCC)



شکل ۱۴.۲۲: اندازه‌گیری فرکانس فرستنده.

خروجی فرستنده را می‌توان به یک بار ساختگی متصل کرد [شکل ۱۴.۲۲(ب)]. این تضمین می‌کند که هیچ سیگنالی تابش نمی‌شود، اما اگر شمارنده و آنتن آن در نزدیکی فرستنده قرار گیرند، سیگنال کافی برای اندازه‌گیری فرکانس وجود خواهد داشت.

روش دیگر برای اتصال شمارنده به فرستنده، استفاده از یک سیم پیچ کوچک است، همانطور که در شکل ۱۴.۲۲(ج) نشان داده شده است. یک سیم پیچ کوچک می‌تواند از سیم مسی سفت ساخته شود. سیم مسی لعابی به اندازه سیم ۱۲ AWG یا ۱۴ به صورت حلقه‌ای دو تا چهار دور در می‌آید. انتهای حلقه به یک کابل کواکسیال با یک کانکتور BNC برای اتصال به شمارنده فرکانس متصل می‌شود. حلقه را می‌توان در نزدیکی مدارهای فرستنده قرار داد. این روش پیکاپ زمانی استفاده می‌شود که فرستنده باز شده و مدارهای آن در معرض دید قرار گرفته باشد. برای اکثر فرستنده‌ها، حلقه فقط در مجاورت کلی مدار قرار گرفته است. معمولاً حلقه تشعشعات یکی از القاگرهای مرحله

آخر فرستنده را می‌گیرد. حداکثر کوپلینگ زمانی حاصل می‌شود که محور پیچ‌های حلقه موازی با محور یکی از سلف‌ها در مرحله خروجی اصلی باشد. هنگامی که سیگنال فرستنده به شمارنده کوپل شد، حساسیت شمارنده و شمارنده برای نمایش فرکانس در محدوده مورد نظر تنظیم می‌شود. هر چه تعداد ارقامی که شمارنده می‌تواند نمایش دهد بیشتر باشد، اندازه‌گیری دقیق‌تر است.

به طور معمول این آزمایش بدون مدولاسیون انجام می‌شود. اگر فقط حامل منتقل شود، هر گونه اثرات مدولاسیون را می‌توان نادیده گرفت. مدولاسیون نباید روی فرستنده FM اعمال شود، زیرا فرکانس حامل توسط مدولاسیون تغییر می‌کند و در نتیجه اندازه‌گیری فرکانس نادرست است. اگر کیفیت کریستال‌های امروزی عالی است. بنابراین، عملیات خارج از فرکانس معمول نیست. اگر فرستنده مطابق مشخصات باشد، کریستال را می‌توان جایگزین کرد. در برخی از تجهیزات حیاتی، کریستال ممکن است در کوره باشد. اگر مدارهای کنترل دمای فر به درستی کار نکنند، ممکن است کریستال از فرکانس خارج شده باشد. این امر مستلزم تعمیر مدار فر یا تعویض کل واحد است. اگر منبع سیگنال یک سینتی‌سایزر فرکانس باشد، می‌توان دقت کریستال مرجع را بررسی کرد. اگر مطابق با مشخصات باشد، احتمالاً یک عملیات خارج از فرکانس به دلیل یک مشکل دیجیتالی در حلقه قفل فاز^{۱۳} (PLL) ایجاد شده است. نسبت تقسیم فرکانس نادرست، آشکارساز فاز معیوب، یا نوسانگر کنترل شده با ولتاژ^{۱۴} (VCO) رديابی ضعیف ممکن است مشکل باشد.

آزمایش مدولاسیون : اگر AM در فرستنده استفاده می‌شود، باید درصد مدولاسیون را اندازه‌گیری کنید. بهتر است درصد مدولاسیون را تا حد امکان نزدیک به ۱۰۰ نگه دارید تا از حداکثر توان خروجی اطمینان حاصل کنید و کمتر از ۱۰۰ برای جلوگیری از اعوجاج سیگنال و تشعشعات هارمونیکی. در فرستنده‌های FM یا PM باید انحراف فرکانس را با مدولاسیون اندازه‌گیری کنید. هدف FM حفظ انحراف در محدوده خاص برای جلوگیری از تداخل کانال مجاور است.

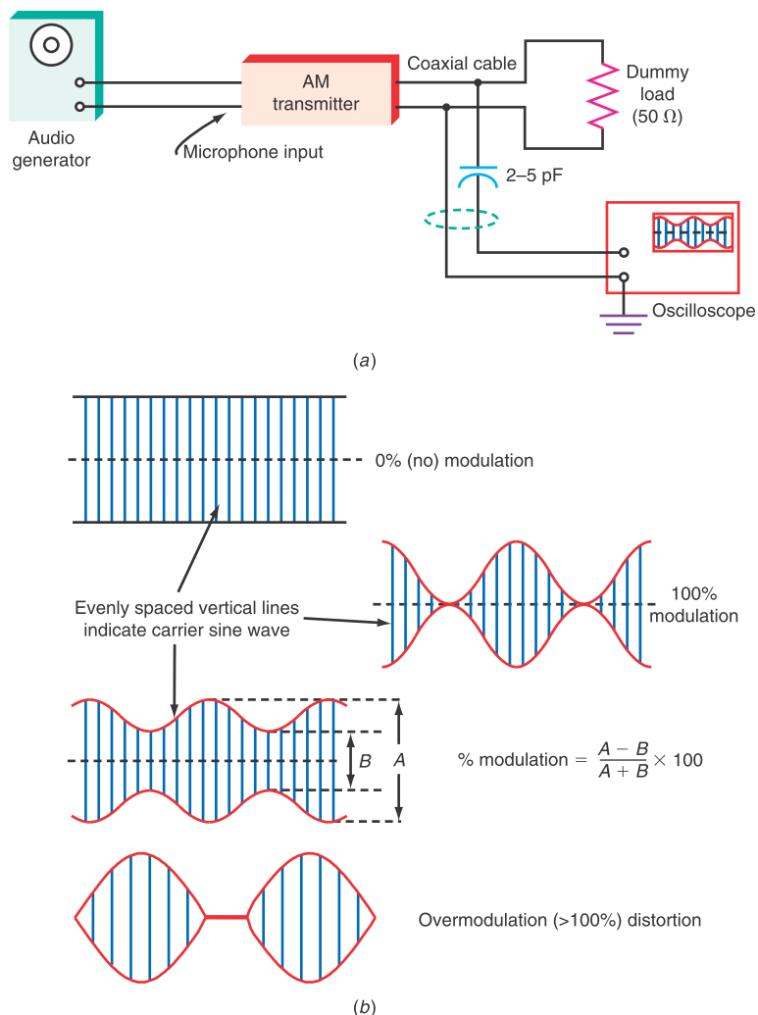
بهترین راه برای اندازه‌گیری AM استفاده از اسیلوسکوپ و نمایش مستقیم سیگنال AM است. برای این کار باید یک اسیلوسکوپ داشته باشید که پهنهای باند تقویت کننده عمودی آن برای پوش فرکانس فرستنده کافی باشد. شکل (۱۵.۲۲)(الف) تنظیمات اولیه آزمایش را نشان می‌دهد. یک ژنراتور سیگنال صوتی برای مدولاسیون دامنه فرستنده استفاده می‌شود. سیگنال صوتی ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز به جای سیگنال میکروفون اعمال می‌شود.

سپس فرستنده کلید زده و اسیلوسکوپ به بار خروجی متصل می‌شود. بهتر است این آزمایش را با یک بار ساختگی انجام دهید تا از تابش سیگنال جلوگیری شود. سپس اسیلوسکوپ برای نمایش سیگنال AM تنظیم می‌شود. صفحه نمایش همانطور که در شکل (۱۵.۲۲)(ب) نشان داده شده است ظاهر می‌شود.

اندازه‌گیری توان : اکثر فرستنده‌ها یک روش تنظیم توصیه شده توسط سازنده برای تنظیم هر مرحله برای تولید حداکثر توان خروجی دارند. در فرستنده‌های قدیمی‌تر، مدارهای هماهنگی بین مراحل باید دقیقاً به ترتیب صحیح تنظیم شوند. در فرستنده‌های حالت جامد مدرن، تنظیمات کمتری وجود دارد، اما در بیشتر موارد برخی تنظیمات در مراحل درایور و ضرب کننده فرکانس و همچنین تنظیمات هماهنگی برای رزونانس در فرکانس کاری تا تقویت کننده نهایی وجود دارد. ممکن است تنظیمات تطبیق امپدانس در تقویت کننده نهایی برای اطمینان از اتصال کامل توان به آتن و وجود

^{۱۳}Phase Locked Loop (PLL)

^{۱۴}Voltage Controlled Oscillator (VCO)

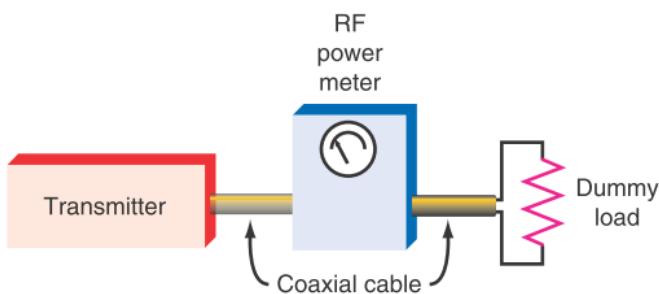


شکل ۱۵.۲۲: اندازه‌گیری AM (الف) تنظیم آزمایش. (ب) شکل موج‌های معمولی.

داشته باشد. فرآیند اساساً تنظیم مدارهای هماهنگی برای رزونانس است. این اندازه‌گیری‌ها عموماً در حین نظرارت بر توان خروجی فرستنده انجام می‌شود.

روش اندازه‌گیری توان خروجی به‌این صورت است که خروجی فرستنده را به یک سنج RF و بار ساختگی، همانطور که در شکل (۱۶.۲۲) نشان داده شده است، متصل می‌کنیم. فرستنده بدون مدولاسیون کلید زده و تنظیماتی در مدار فرستنده انجام می‌شود تا حداکثر توان خروجی را تنظیم کند. با آرایش آزمایشی نشان داده شده، قدرت سنج مقدار توان خروجی را نمایش می‌دهد.

هنگامی که فرستنده به درستی تنظیم شد، می‌توان آن را به آنتن متصل کرد. سپس توان آنتن نشان داده می‌شود. اگر آنتن به درستی با خط انتقال تطبیق داده شود، مقدار توان خروجی برابر با بار ساختگی خواهد بود. در غیر این صورت، اندازه‌گیری SWR باید انجام شود. اکثر پاورمترهای (توان سنج‌ها) مدرن هم توان رو به جلو و هم توان بازتاب را اندازه‌گیری می‌کنند، بنابراین اندازه‌گیری



شکل ۱۶.۲۲: اندازه‌گیری توان.

SWR آسان‌تر است. برای اطمینان از حداکثر توان خروجی با حداقل SWR، ممکن است لازم باشد آنتن یا مدار تطبیق را تنظیم کنید.

هارمونیک‌ها و اندازه‌گیری‌های خروجی جعلی. : یک مشکل رایج در فرستنده‌ها تابش هارمونیک‌های نامطلوب یا سیگنال‌های جعلی است. در حالت ایده‌آل، خروجی فرستنده باید یک سیگنال خالص در فرکانس حامل باشد که فقط آن اجزای باند جانبی تولید شده توسط سیگنال مدوله کننده باشد. با این حال، اکثر فرستنده‌ها مقداری هارمونیک و سیگنال‌های جعلی تولید می‌کنند. فرستنده‌هایی که از تقویت کننده‌های کلاس C، کلاس D و کلاس E استفاده می‌کنند، محتوای هارمونیک بالایی تولید می‌کنند. اگر مدارهای هماهنگی در فرستنده به درستی طراحی شده باشند، Q به اندازه کافی بالا خواهد بود تا سطح محتوای هارمونیکی را به اندازه کافی کاهش دهد. اما همیشه هم به این صورت نیست.

مشکل دیگر این است که سیگنال‌های جعلی دیگر می‌توانند توسط فرستنده‌ها تولید شوند. بهویژه در فرستنده‌های پرقدرت، نوسانات پارازیت می‌تواند رخ دهد. اینها در اثر تحریک مدارهای هماهنگی کوچک ایجاد می‌شوند که اجزای آن اندوکتانس‌ها و خازن‌های سرگردان در مدارها یا ترانزیستورهای و لامپ‌های درگیر هستند. نوسانات پارازیتیک می‌تواند به سطح بالایی برسد و باعث تشعشعات در فرکانس‌های نامطلوب شود.

برای اکثر فرستنده‌ها، FCC حداکثر سطوح تابش هارمونیکی و کاذب را مشخص می‌کند. اعوجاج درون مدولاسیون^{۱۵} در میکسرها و مدارهای غیرخطی نیز سیگنال‌های ناخواسته‌ای تولید می‌کند. به طور معمول این سیگنال‌ها باید حداقل ۳۰ یا ۴۰ دسی‌بل از سیگنال حامل اصلی کمتر باشد. بهترین راه برای اندازه‌گیری هارمونیک‌ها و سیگنال‌های جعلی استفاده از آنالایزر طیف است. خروجی فرستنده با صدای صدا مدوله و خروجی آن مستقیماً بر روی تحلیلگر طیف مشاهده می‌شود. برای این اندازه‌گیری معمولاً بهتر است خروجی فرستنده را به یک بار ساختگی وارد کنید. سپس آنالایزر طیف تنظیم می‌شود تا حامل معمولی و الگوی باند جانبی را نمایش دهد. جستجو برای سیگنال‌های سطح بالا می‌تواند برای خروجی‌های جعلی با تنظیم تحلیلگر طیف در بالا و پایین فرکانس آغاز شود. آنالایزر طیف را می‌توان برای جستجوی سیگنال‌ها در هارمونیک‌های دوم، سوم و بالاتر فرکانس حامل تنظیم کرد. اگر سیگنال‌ها شناسایی شوند، می‌توان آن‌ها را اندازه‌گیری کرد تا اطمینان حاصل شود که قدرت آن‌ها به اندازه کافی کم است تا با مقررات FCC و/یا مشخصات سازنده مطابقت داشته

^{۱۵} Intermodulation distortion

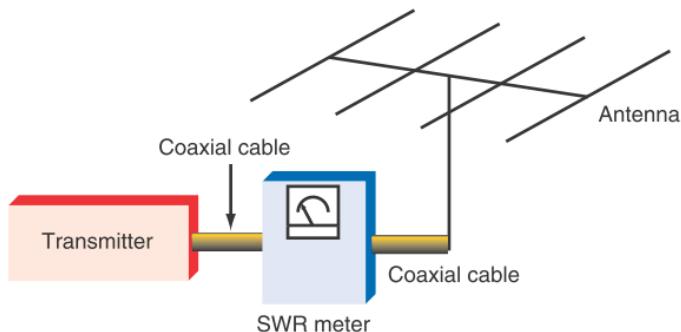
باشد. سپس آنالایزر طیف در محدوده وسیعی تنظیم می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هیچ سیگنال غیرهارمونیک جعلی دیگری وجود ندارد.

ممکن است بتوان با انجام یک تنظیم جزئی تنظیم فرستنده، محتوای خروجی هارمونیکی و جعلی را کاهش داد. در غیر این صورت، برای رعایت مشخصات، اغلب لازم است از فیلترها برای حذف هارمونیک‌های ناخواسته یا سیگنال‌های دیگر استفاده شود.

آزمایش آنتن و خط انتقال

اگر فرستنده درست کار کند و آنتن به درستی طراحی شده باشد، تنها آزمایشی که باید روی خط انتقال و آنتن انجام شود، برای امواج ایستاده (ساکن) است. به‌شما می‌گوید که آیا تنظیمات بیشتری لازم است یا خیر. اگر SWR بالا باشد، معمولاً می‌توانید آنتن را تنظیم کنید تا آن را کاهش دهید. همچنین ممکن است با مشکل خط انتقال مواجه شوید. ممکن است باز یا اتصال کوتاه باشد که در آزمایش SWR به صورت SWR بی‌نهایت نشان داده می‌شود. اما ممکن است مشکلات دیگری مانند کابلی که بین فرستنده و گیرنده قطع شده، اتصال کوتاه یا له شده باشد، وجود داشته باشد. این نوع مشکلات را می‌توان با آزمایش بازتاب سنج حوزه زمان پیدا کرد.

آزمایش SWR : روش آزمایش SWR در شکل (۱۷.۲۲) نشان داده شده است. سنجشگر(میتر) SWR بین خط انتقال و آنتن متصل است. برای تعیین اینکه آیا محل اتصال خاصی مورد نیاز است یا اینکه آیا سایر شرایط باید رعایت شود، با سازنده میتر SWR مشورت کنید. برخی از میترهای SWR ارزان‌تر باید مستقیماً به آنتن یا تعداد مشخصی از نیم طول موج از آنتن به‌فرستنده متصل شوند.



شکل ۱۷.۲۲: اندازه‌گیری SWR

هنگامی که میتر (سنجشگر) به درستی وصل شد، فرستنده را بدون مدولاسیون کلید بزنید. فرستنده باید قبل از تنظیم و برای حداکثر توان خروجی تنظیم شده باشد. SWR را می‌توان مستقیماً از میتر دستگاه خواند. در برخی موارد، میتر اندازه‌گیری‌هایی را برای مقدار نسبی بربخورد یا توان مستقیم (رو به جلو) و بازتاب داده می‌شود یا بر حسب ضریب انعکاس می‌خواند، در این صورت باید SWR را همانطور که قبل اوضیح داده شد محاسبه کنید. سایر میترها مستقیماً در SWR خوانده می‌شوند. حداکثر برد معمولاً ۱ : ۳ است.

SWR ایده‌آل ۱ : ۱ است، به‌این معنی که تمام توان تولید شده توسط فرستنده توسط بار آنتن جذب می‌شود. با این وجود، حتی در بهترین سیستم‌ها، تطبیق کامل به‌ندرت به‌دست می‌آید. هر گونه عدم تطبیق باعث ایجاد قدرت بازتابی و امواج ایستاده می‌شود. اگر SWR کمتر از ۱ : ۲

باشد، مقدار توانی که از بین می‌رود یا منعکس می‌شود حداقل خواهد بود. روش اولیه برای کاهش SWR، انجام تنظیمات آنتن است، معمولاً به شکل تغییر طول عنصر برای تنظیم دقیق‌تر آنتن با فرکانس کار استفاده از آنتن‌های زیاد این امکان را فراهم می‌آورد که طول آنها را در یک محدوده باریک تنظیم کنید تا SWR را تنظیم کنید. سایر آنتن‌ها اجازه تنظیم را برای تطابق بهتر خط انتقال با عنصر محرك آنتن می‌دهند. این تنظیمات را می‌توان یکی یکی انجام داد و SWR را زیر نظر گرفت.

آزمایش TDR : بازتاب سنجی حوزه زمان^{۱۶} (TDR) یک پالس برای کابل‌ها و خطوط انتقال از همه نوع است. این به طور گسترده در یافتن عیوب در کابل‌های مورد استفاده برای انتقال داده‌های دیجیتالی استفاده می‌شود، اما می‌توان از آن برای خطوط انتقال RF استفاده کرد. (برای جزئیات بیشتر به بخش آزمون‌های ارتباط داده در ادامه این فصل مراجعه کنید).

آزمایش گیرنده‌ها

آزمایش‌های اولیه برای گیرنده‌ها شامل حساسیت و سطح نویز است. هرچه حساسیت گیرنده بیشتر باشد، بهره آن بیشتر می‌شود و کار بهتری در دریافت سیگنال‌های بسیار کوچک انجام می‌دهد. به عنوان بخشی از آزمایش حساسیت، نسبت سیگنال به نویز (S/N) نیز معمولاً به طور غیر مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. توانایی یک گیرنده برای دریافت سیگنال‌های ضعیف به همان اندازه که تابعی از سطح نویز گیرنده است، به همان اندازه از بهره کلی گیرنده است. هر چه سطح نویز کمتر باشد، گیرنده توانایی بیشتری در تشخیص سیگنال‌های ضعیف دارد.

خوب است بدانید که:

توانایی یک گیرنده برای دریافت سیگنال‌های ضعیف به همان اندازه که تابعی از سطح نویز گیرنده است، به اندازه بهره کلی گیرنده است. هر چه سطح نویز کمتر باشد، گیرنده توانایی بیشتری در تشخیص سیگنال‌های ضعیف دارد.

به عنوان بخشی از بررسی حساسیت کلی، برخی از سازندگان گیرنده سطح خروجی صدا را مشخص می‌کنند. از آنجایی که اندازه‌گیری حساسیت گیرنده معمولاً با اندازه‌گیری ولتاژ خروجی بلندگو انجام می‌شود، در صورت تمايل می‌توان توان خروجی را نیز بررسی کرد. در این قسمت برخی از آزمایش‌های متداول انجام شده بر روی گیرنده‌ها شرح داده شده است. اطلاعات عمومی هستند و روش‌های آزمایش واقعی اغلب از سازنده گیرنده‌ای به سازنده دیگر متفاوت است.

تجهیزات موردنیاز

برای اندازه‌گیری حساسیت و نویز، تجهیزات زیر ضروری است:

۱. اسیلوسکوپ دو کاناله. پاسخ فرکانس عمودی خیلی مهم نیست، زیرا سیگنال‌های نویز و فرکانس صوتی را مشاهده خواهید کرد.

۲. سیگنال ژنراتور RF. این ژنراتور سیگنال RF را در فرکانس کاری گیرنده ارائه می‌دهد. باید یک تضعیف کننده خروجی داشته باشد تا بتوان سیگنال‌های کمتر از ۱ میکروولت یا کمتر را تنظیم کرد. اگر ژنراتور تضعیف کننده داخلی یا تنظیمات سطح خروجی نداشته باشد، این ممکن است

^{۱۶}Time domain reflectometry (TDR)

نیاز به یک تضعیف کننده خارجی را نشان دهد. ژنراتور همچنین باید دارای قابلیت مدولاسیون، AM یا FM، بسته به نوع گیرنده مورد آزمایش باشد.

۳. ولتمتر RF. ولتمتر RF برای اندازه‌گیری ولتاژ خروجی ژنراتور RF در برخی آزمایشات مورد نیاز است. برخی از ژنراتورهای RF با کیفیت بالاتر دارای یک ولتمتر RF برای کمک به تنظیم تضعیف کننده خروجی و کنترل سطح هستند.

۴. شمارنده فرکانس. یک فرکانس شمار با قابلیت اندازه‌گیری فرکانس خروجی ژنراتور RF مورد نیاز است.

۵. مولتی‌متر. یک مولتی‌متر با قابلیت اندازه‌گیری سطوح ولتاژ فرکانس صوتی (AF) مورد نیاز است. می‌توان از هر مولتی‌متر آنالوگ یا دیجیتال با قابلیت اندازه‌گیری ac در محدوده AF استفاده کرد.

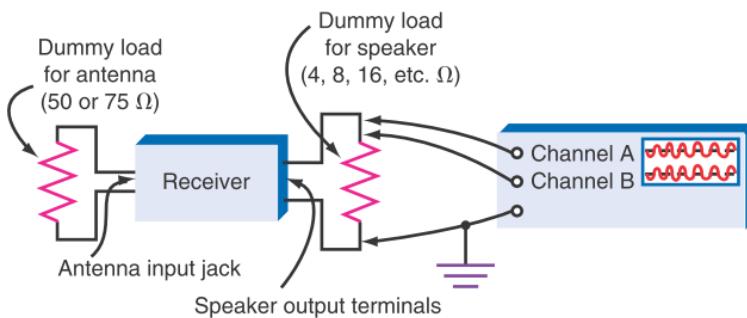
۶. بار ساختگی. یک بار ساختگی برای ورودی آنتن گیرنده برای آزمایش نویز مورد نیاز است. این می‌تواند یک مقاومت ۵۰ ۷۵ Ω اهمی باشد که به کانکتور ورودی کواکسیال مناسب متصل است. یک بار ساختگی برای بلندگو مورد نیاز است. از آنجایی که اکثر آزمایش‌های نویز و حساسیت با حداقل بهره گیرنده از جمله بهره صوتی انجام می‌شوند، اتصال بلندگو عملی یا مطلوب نیست. اکثر گیرندهای ارتباطی دارای توان خروجی صدا از ۲ تا ۱۰ وات هستند که به اندازه کافی بالاست تا سطح سیگنال خروجی را برای راحتی زیاد کند. یک بار ساختگی بلندگو، ۸، ۴ یا ۱۶ Ω، بسته به امپدانس بلندگو، مورد نیاز است. مطمئن شوید که بار ساختگی می‌تواند حداقل توان خروجی صدای گیرنده را تحمل کند. از مقاومت‌های سیم‌پیچ برای این کاربرد استفاده نکنید، زیرا آنها اندوکتانس زیادی دارند. مشخصات گیرنده را هم برای امپدانس و هم برای مشخصات حداقل توان بررسی کنید.

آزمایش نویز: نویز شامل تغییرات تصادفی سیگنال است که توسط گیرنده دریافت یا به دلیل تغییر حرارتی و سایر شرایط داخل مدار گیرنده ایجاد می‌شود. نویز خارجی را نمی‌توان کنترل یا حذف کرد. با این حال، نویز ایجاد شده توسط گیرنده را می‌توان کنترل کرد. در طول طراحی تمام تلاش برای به حداقل رساندن نویز تولید شده در داخل و در نتیجه بهبود توانایی گیرنده در دریافت سیگنال‌های ضعیف انجام می‌شود.

بیشترین نویز تولید شده توسط گیرنده در قسمت جلویی گیرنده، در درجه اول تقویت کننده RF و میکسر رخ می‌دهد. توجه دقیقی به طراحی هر دو این مدارها داده شده است تا حداقل نویز را ایجاد کنند.

از آنجایی که نویز یک سیگنال کاملاً تصادفی است که ترکیبی از سیگنال‌های فرکانس و دامنه متغیر است، اندازه‌گیری آن تا حدودی دشوار است. با این حال، روش زیر به یک روش رایج و محبوب تبدیل شده است که اجرای آن آسان است.

به تنظیمات آزمایش نشان داده شده در شکل (۱۸.۲۲) مراجعه کنید. آنتن از گیرنده خارج و برای جایگزینی آن از یک بار ساختگی با امپدانس صحیح استفاده می‌شود. می‌توان از یک مقاومت ترکیب کردن ۵۰ Ω یا ۷۵ Ω اهم استفاده کرد. ایده این است که از دریافت سیگنال توسط گیرنده با حفظ امپدانس صحیح جلوگیری شود.



شکل ۱۸.۲۲: تنظیم آزمایش نویز.

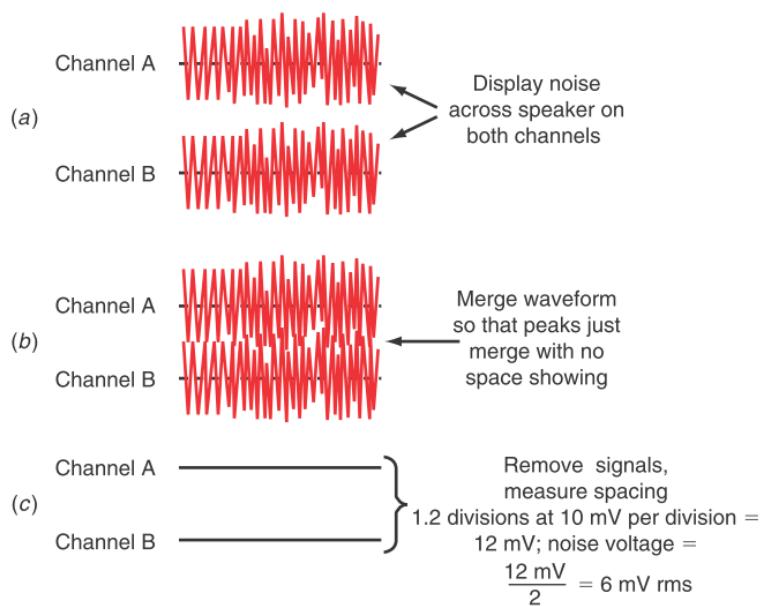
در خروجی گیرنده، بلندگو با یک بار ساختگی جایگزین می‌شود. اکثر بلندگوها امپدانس خروجی ۴ یا ۸ اهم دارند. مشخصات گیرنده را بررسی کنید و مقدار مقاومت مناسب را به جای بلندگو وصل کنید. مطمئن شوید که مقاومت‌های بار ساختگی می‌توانند توان خروجی را تحمل کنند.

خوب است بدانید که:

برای تعیین سطح نویز زمانی که فاصله افقی روی اسیلوسکوپ و حساسیت عمودی مشخص است، فاصله افقی را در حساسیت ضرب کرده و بر ۲ تقسیم کنید.

در نهایت، اسیلوسکوپ دوگانه را در دوسر بار بلندگوی ساختگی وصل کنید. سیگنال یکسان باید در هر دو کانال اسیلوسکوپ نمایش داده شود. سیگنال نمایش داده شده یک نسخه تقویت شده از نویز تولید شده توسط گیرنده و تقویت شده توسط تمام مراحل بین ورودی آنتن و بلندگو خواهد بود. این روش گام به گام را دنبال کنید:

۱. گیرنده را روشن کنید و آن را روی کانالی تنظیم کنید که هیچ سیگنالی دریافت نمی‌شود.
۲. کنترل صدای گیرنده را روی حداکثر تنظیم کنید. اگر گیرنده دارای هر نوع کنترل بهره RF یا IF است، باید آن را نیز روی حداکثر تنظیم خود تنظیم کنید.
۳. ورودی اسیلوسکوپ را برای کانال پایین (کانال B) روی زمین قرار دهید. اکثر اسیلوسکوپ‌ها دارای یک سوئیچ هستند که اجازه می‌دهد ورودی برای اندازه‌گیری ac، اندازه‌گیری dc یا زمین تنظیم شود. زمین ورودی کانال B از نمایش هرگونه سیگنال جلوگیری می‌کند. در این زمان، یک خط افقی مستقیم برای کانال پایین مشاهده خواهد کرد. آن کانال پایین را طوری تنظیم کنید که با یکی از خطوط گراتیکول افقی نزدیک پایین صفحه اسیلوسکوپ هماهنگ شود. این یک مرجع اندازه‌گیری ولتاژ را ارائه می‌دهد.
۴. ورودی کانال B و ورودی کانال A را روی جریان متناوب تنظیم کنید. حساسیت عمودی کانال‌های A و B را طوری تنظیم کنید که در یک محدوده باشند. تنظیمات را طوری انجام دهید که سیگنال چیزی شبیه آنچه در شکل (۱۹.۲۲)(الف) نشان داده شده است، نمایش داده شود. شما باید دقیقاً همان الگوی نویز را در هر دو کانال ببینید.



شکل ۱۹.۲۲: روش اندازه‌گیری نویز.

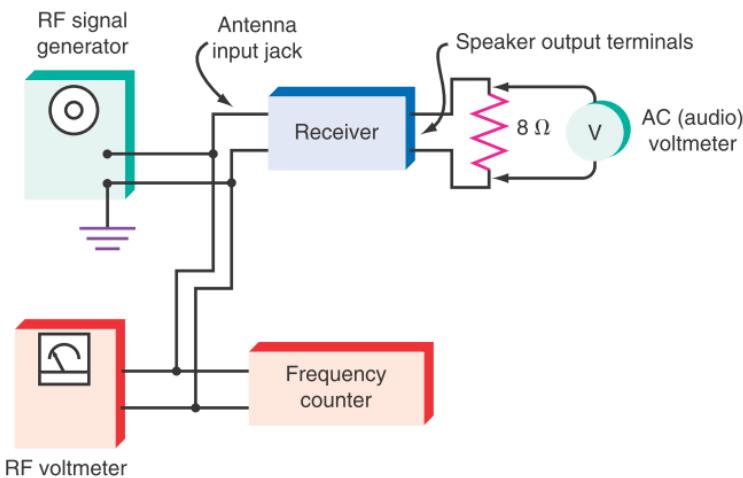
۵. با استفاده از کنترل موقعیت عمودی در کanal بالا یا A، مسیر نویز بالای را به سمت پایین حرکت دهید تا شروع به ادغام با سیگнал نویز در کanal B کند. تنظیم صحیح موقعیت سیگنال نویز کanal A به گونه‌ای است که قله‌های سیگنال‌های بالا و پایین به سختی ادغام می‌شوند. این معمولاً در نقطه‌ای نشان داده می‌شود که هیچ فضای خالی بین ردیابی‌های بالا و پایین وجود ندارد. سیگنال باید چیزی شبیه به آن چیزی باشد که در شکل (۱۹.۲۲)(ب) نشان داده شده است.

۶. حالا هر دو ورودی اسیلوسکوپ را روی زمین قرار دهید و بدین ترتیب از نمایش سیگنال نویز جلوگیری کنید. دو خط افقی مستقیم خواهید دید. فاصله بین دو خط اندازه‌گیری ولتاژ نویز است. مقدار نشان داده شده دو برابر ریشه میانگین ولتاژ نویز مربع (rms)، شکل (۱۹.۲۲)(ج) است.

فرض کنید تنظیماتی که در بالا توضیح داده شد انجام شده است و فاصله بین دو مسیر افقی $1/2$ تقسیم عمودی است. اگر بهره‌های عمودی هر دو کanal روی 10 mV میلی ولت در هر محدوده تقسیم تنظیم شود، خواندن نویز $12 \text{ mV} = 10 \text{ mV} \times 1/2$ است. ولتاژ نویز rms نصف این حد است یا $6 \text{ mV} = 12 \text{ mV}/2$.

آزمایش توان خروجی: گاهی اوقات لازم است که توان کل توان خروجی گیرنده اندازه‌گیری شود. این یک آزمایش کلی خوب از تمام مدارهای گیرنده است. اگر گیرنده بتواند حداکثر توان خروجی مشخص شده سازنده را با یک ورودی سطح سیگنال RF پایین معین به بلندگو تامین کند، گیرنده به درستی کار می‌کند.

تنظیم آزمایش برای آزمایش توان خروجی در شکل (۲۰.۲۲) نشان داده شده است. یک ژنراتور سیگنال RF برای فرکانس صحیح به عنوان منبع سیگنال اولیه استفاده می‌شود. همچنین باید بتوان



شکل ۲۰.۲۲: آزمایش توان خروجی

این ژنراتور را با AM یا FM بسته به نوع گیرنده مدوله کرد.

همچنین اتصال یک شمارنده فرکانس به خروجی سیگنال ژنراتور برای ارائه اندازه‌گیری دقیق فرکانس ورودی گیرنده مطلوب است. اکثر گیرنده‌های ارتباطی بر روی کانال‌های فرکانس خاصی کار می‌کنند. برای اینکه آزمایش معتبر باشد، فرکانس خروجی ژنراتور باید در مرکز کانال فرکانس گیرنده تنظیم شود. این معمولاً از روی مشخصات گیرنده مشخص می‌شود. مولد سیگنال تنظیم و فرکانس با نظارت بر بازخوانی دیجیتالی روی شمارنده فرکانس تنظیم می‌شود.

طمئن شوید که بلندگو را با یک بار مقاومتی با امپدانس برابر با امپدانس بلندگو، مانند ۸ اهم جایگزین کنید. باز بلندگوی ساختگی نیز باید بتواند حداکثر توان نامی خروجی گیرنده را تحمل کند. در نهایت، یک ولتمتر ac را روی بار ساختگی بلندگو وصل کنید.

گیرنده را روشن کنید و کنترل صدارا روی حداکثر تنظیم کنید. اگر گیرنده دارای یک کنترل بهره متغیر RF یا IF است، باید آن را روی حداکثر تنظیم نیز تنظیم کنید. در این زمان، هر ویژگی دیگر گیرنده باید غیرفعال شود. به عنوان مثال، در یک گیرنده FM، خفه کن^{۱۷} باید خاموش یا غیرفعال شود. در یک گیرنده AM، اگر از یک محدود کننده نویز استفاده می‌شود، آن نیز باید خاموش شود. برای شروع آزمون، این روش را دنبال کنید:

۱. سطح خروجی ژنراتور RF را روی یک میلی ولت تنظیم کنید. اگر مولد سیگنال RF دارای یک ولتمتر RF داخلی است، از آن برای انجام این تنظیمات استفاده کنید. در غیر این صورت، همانطور که در شکل (۲۰.۲۲) نشان داده شده است، ممکن است به یک ولتمتر RF خارجی نیاز باشد.

۲. مولد سیگنال را برای مدولاسیون از نوع مناسب تنظیم کنید. اگر از AM استفاده می‌شود، درصد مدولاسیون را برای $\pm 3\%$ تنظیم کنید. اگر از FM استفاده می‌شود، انحراف را برای $\pm 3\%$ کیلوهرتز. در اکثر مولدهای سیگنال، درصد AM و انحراف فرکانس برای FM به صورت یکسان

^{۱۷}Squelch

است. به مشخصات ژنراتور سیگنال مراجعه کنید تا بفهمید این مقادیر چیست.

۳. با تنظیم مناسب همه چیز، ولتاژ ac را در بار ساختگی بلندگو اندازه‌گیری کنید. این یک rms خواندن خواهد بود.

۴. برای تعیین توان خروجی گیرنده، از فرمول پاور استاندارد $P = V^2/R$ استفاده کنید.

فرض کنید ولتاژ rms ۴ ولت را در یک بلندگوی ۸ اهم اندازه‌گیری می‌کنید. توان خروجی خواهد بود

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{4^2}{8} = 2 W$$

یک آزمایش اختیاری مشاهده سیگنال در دوسر بار بلندگو با یک اسیلوسکوپ است. اکثر ژنراتورهای RF سیگنال ورودی را با موج سینوسی 40° هرتز یا ۱ کیلوهرتز مدوله می‌کنند. اگر یک اسیلوسکوپ روی بار بلندگوی ساختگی قرار گیرد، موج سینوسی دیده می‌شود. این نشان می‌دهد که آیا گیرنده در حال اعوجاج است یا خیر. همچنین می‌توان از اسیلوسکوپ به جای ولتمتر صوتی برای اندازه‌گیری ولتاژ در بار بلندگوی ساختگی استفاده کرد. بهیاد داشته باشید که اندازه‌گیری اسیلوسکوپ اوج تا اوج (پیک تا پیک) است. برای محاسبه توان خروجی، مقدار پیک تا پیک باید به ریشه میانگین مربع تبدیل شود.

آزمایش حساسیت صامت ۲۰ دسی‌بل: در بیشتر موارد، حساسیت گیرنده بر حسب حداقل ولتاژ RF در پایانه‌های آنتن بیان می‌شود که سطح توان خروجی صدای خاصی را تولید می‌کند. بیشتر اندازه‌گیری‌ها در اثر نویز نقش دارند.

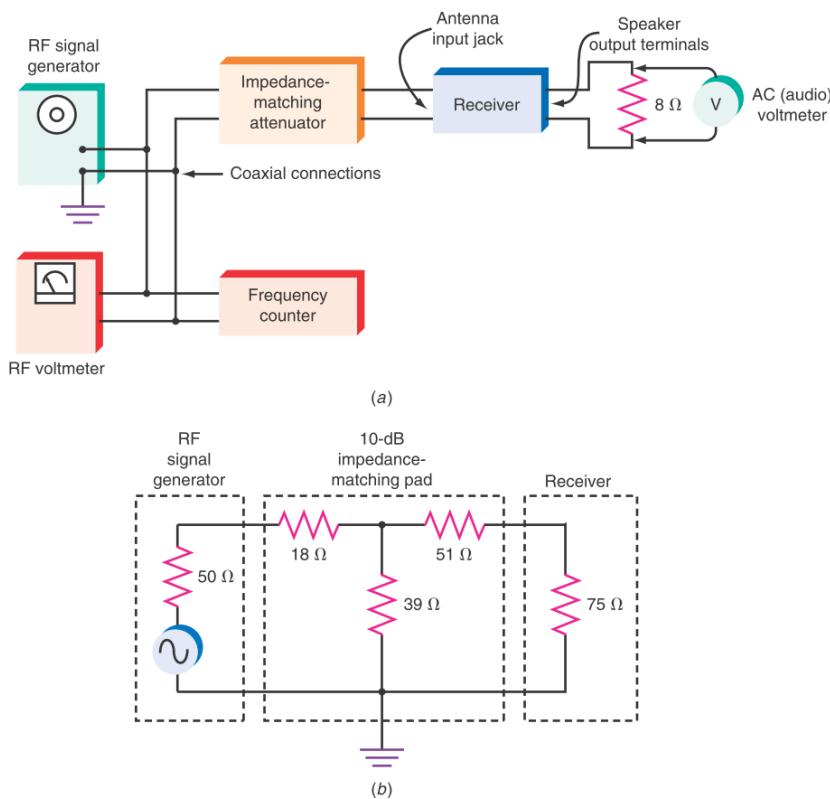
روش اندازه‌گیری حساسیت با توجه به استفاده از AM یا FM تعیین می‌شود. از آنجایی که اکثر تجهیزات ارتباطی رادیویی مدرن از مدولاسیون فرکانس استفاده می‌کنند، اندازه‌گیری حساسیت گیرنده FM نشان داده شده است. دو روش اساسی وجود دارد، صامت^{۱۸} و SINAD. روش صامت میزان سیگنال مورد نیاز برای کاهش نویز خروجی تا ۲۰ دسی‌بل را اندازه‌گیری می‌کند. با افزایش سطح سیگنال، سطح نویز کاهش می‌یابد تا زمانی که محدود کننده‌ها در بخش IF شروع به کار برش خود کنند. وقتی این اتفاق می‌افتد، خروجی گیرنده خاموش می‌شود. یعنی خروجی آن بی صدا است و نویز را خالی می‌کند.

آزمایش SINAD اندازه‌گیری ولتاژ سیگنال ورودی است که حداقل نسبت سیگنال به نویز ۱۲ دسی‌بل را تولید می‌کند. مقدار نویز شامل هر هارمونیک است که توسط مدارهای گیرنده بهدلیل اعوجاج تولید می‌شود.

تنظیم آزمایش برای اندازه‌گیری حساسیت گیرنده در شکل (الف) (۲۱.۲۲) نشان داده شده است. این شامل سیگنال ژنراتور RF، ولتمتر فرکانس، گیرنده مورد آزمایش و یک ولتمتر برای اندازه‌گیری خروجی در سراسر بار ساختگی بلندگو است.

اغلب لازم است یک شبکه تطبیق امپدانس بین پایانه‌های ورودی ژنراتور و آنتن گیرنده فراهم شود. اکثر ژنراتورهای RF دارای امپدانس خروجی $50\ \Omega$ هم هستند. این ممکن است دقیقاً با امپدانس ورودی گیرنده مطابقت داشته باشد. با این حال، برخی امپدانس‌های ورودی گیرنده ممکن است متفاوت باشند. به عنوان مثال، اگر یک گیرنده دارای امپدانس ورودی ۷۵ هم باشد، نوعی تطبیق امپدانس مورد نیاز خواهد بود. این معمولاً توسط یک تضعیف کننده مقاومتی معروف به پد تطبیق

^{۱۸}Quieting



شکل ۲۱.۲۲: (الف) روش صامت اندازه‌گیری حساسیت گیرنده FM. (ب) تضعیف کننده تطبیق امپدانس نوع T.

امپدانس^{۱۹} انجام می‌شود که یک شبکه T مقاومتی است که تطبیق صحیح بین ورودی گیرنده و ژنراتور را فراهم می‌کند. یک پد تطبیق امپدانس معمولی در شکل ۲۱.۲۲(ب) نشان داده شده است. خروجی ژنراتور ۵۰ اهم را با ورودی آنتن گیرنده ۵۰ اهم تطبیق می‌دهد. از آنجا که از مقاومت‌ها استفاده می‌شود، مدار تطبیق امپدانس نیز یک تضعیف کننده است. با مقادیر داده شده در شکل ۲۱.۲۲(ب)، تضعیف سیگنال ۱۰ دسی‌بل است. این باید در تمام اندازه‌گیری‌های مولد سیگنال لحاظ شود تا رقم حساسیت درست به دست آید. مقادیر متفاوتی از مقاومت‌ها را می‌توان برای ایجاد پدی با کیفیت تطبیق امپدانس صحیح اما با مقادیر تضعیف کمتر یا بالاتر استفاده کرد.

برخی از سازندگان یک شبکه ورودی ویژه متشکل از مقاومت‌ها، سلف‌ها و/یا خازن‌ها را برای این یا سایر آزمایش‌های حساسیت مشخص می‌کنند. این شبکه به شبیه‌سازی دقیق آنتن در تجهیزاتی که از آنتن‌های ویژه استفاده می‌کنند کمک می‌کند.

این روش را برای انجام اندازه‌گیری صامت ۲۰ دسی‌بل دنبال کنید:

۱. گیرنده را روشن کنید و آن را روی یک کانال استفاده نشده تنظیم کنید.
۲. مولد سیگنال را خاموش بگذارید تا سیگنالی اعمال نشود.

^{۱۹}Impedance Matching Pad

۳. بهره گیرنده را با هر کنترل بهره RF یا IF، در صورت وجود، روی حداکثر تنظیم کنید.

۴. کنترل صدا گیرنده را طوری تنظیم کنید که مقدار مناسبی از ولتاژ نویز را روی متر متصل به بلندگو بخوانید. اگر بتوانید به آن برسید یک ولت rms مقدار خوبی است. اما اگر نه، هر مقدار مناسب دیگری انجام خواهد شد.

۵. مولد سیگنال را روشن کنید، اما سطح خروجی را روی صفر یا مقدار بسیار پایین تنظیم کنید. فرکانس مولد را در مرکز تنظیمات کanal گیرنده تنظیم کنید. مدولاسیون را خاموش کنید تا ژنراتور فقط حامل را تامین کند.

۶. سطح سیگنال خروجی مولد سیگنال را کمی افزایش دهید و ولتاژ دو طرف بلندگو را مشاهده کنید. با قوی شدن سیگنال حامل به اندازه کافی برای غلبه بر نویز، سطح ولتاژ نویز کاهش می‌یابد. سطح سیگنال را افزایش دهید تا ولتاژ نویز به یک دهم مقدار قبلی خود کاهش یابد.

۷. ولتاژ خروجی ژنراتور را روی ژنراتور متر یا ولتمتر RF خارجی اندازه گیری کنید.

۸. اگر از یک پد تضعیف کننده یا سایر شبکه‌های تطبیق امپدانس استفاده شده است، تلفات ایجاد شده را کم کنید. مقدار حاصل، سطح ولتاژ است که 20 دسی بل خاموشی در گیرنده ایجاد می‌کند.

فرض کنید خروجی ژنراتور 5 میکروولت را اندازه گیری کرده‌اید که باعث کاهش 20 دسی بل نویز می‌شود. این در یک بار 50% اهمی اعمال می‌شود که توان ورودی $= P = V^2/R = (5 \times 10^{-6})^2/50 = 25 \times 10^{-12} \text{ وات}$ را تولید می‌کند. این بیشتر توسط پد تطبیق $10 \text{ دسی بل به سطح یک دهم} W$ کاهش می‌یابد که به سطح ولتاژ در 50% اهم انتقال می‌یابد.

$$V = \sqrt{PR} = \sqrt{0.05 \times 10^{-12} \times 50} = 1.58 \times 10^{-6} = 1.58 \mu V$$

این حساسیت گیرنده است. برای تولید 20 دسی بل صامت در گیرنده به 1.58 میکروولت سیگنال نیاز است.

برای یک گیرنده ارتیاطی خوب، مقدار صامت 20 دسی بل باید کمتر از 1 میکروولت باشد. یک مقدار معمولی در محدوده $0.2 \text{ تا } 0.5 \mu V$ است. هرچه مقدار کمتر باشد، حساسیت بهتر است.
آزمایش انباسته (بلوکی) و رهگیری مرتبه سوم: همانطور که طیف شلوغ‌تر شده است و پیشرفت‌های مدولاسیون سرعت بیشتری را در هر هر تر پهنه‌ای باند مجاز می‌کند، پتانسیل تداخل کanal مجاور به طور قابل توجهی افزایش یافته است. برای اطمینان از حداقل تداخل کanal مجاور، مشخصات گیرنده سخت‌تر شده است. این امر به ویژه در تلفن‌های همراه صادق است. مجموعه کاملی از آزمایش‌ها باید توسط گیرنده گذرانده شود تا مشخصات یک استاندارد تلفن همراه خاص مانند CDMA یا GSM را برآورده کند.

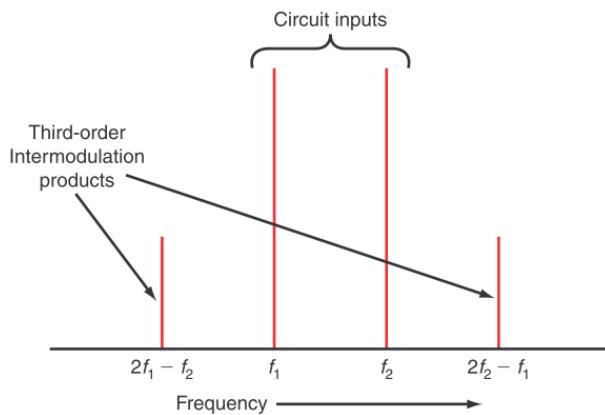
به عنوان مثال، آزمایش مسدود کردن گیرنده است که اندازه گیری‌هایی را انجام می‌دهد تا اطمینان حاصل شود که سیگنال‌های یک کanal مجاور کanal مورد استفاده را مسدود یا حساسیت زدایی نمی‌کند. یک سیگنال بسیار قوی در نزدیکی فرکانس دریافت کننده باعث کاهش بهره گیرنده می‌شود. هر سیگنال کوچکی که دریافت می‌شود، دامنه آن کاهش می‌یابد یا حتی به طور کامل مسدود می‌شود. برخی از خصوصیات نیاز دارند که گیرنده قادر به دریافت سیگنال ضعیف زمانی

باشد که سیگنال کanal مجاور ۶۰ تا ۷۰ دسیبل بیشتر از سطح باشد. توانایی انجام این آزمایش به گزینش پذیری فیلتر گیرنده بستگی دارد.

خوب است بدانید که:

آزمایش رهگیری مرتبه سوم تعیین می‌کند که آیا تلفن همراه سیگنال‌های بزرگ نزدیک را که می‌تواند به اشتباه توسط تلفن همراه به عنوان فرکانس دریافت آن تفسیر شود، فیلتر می‌کند یا خیر.

اما شاید سخت‌ترین آزمایش رهگیری مرتبه سوم باشد که TOI3 یا IP3 تعیین شده است. این آزمایش معیاری برای سنجش خطی بودن تقویت‌کننده‌ها، میکسرها و مدارهای دیگر است. هنگامی که دو سیگنال بهیک مدار اعمال می‌شود، هر گونه غیرخطی بودن در مدار باعث ایجاد اثر اختلاط یا مدولاسیون می‌شود. هرچه سیگنال‌های ورودی بزرگ‌تر باشند، تقویت کننده به احتمال بیشتری بهیک منطقه غیر خطی هدایت می‌شود که در آن اختلاط اتفاق می‌افتد. سیگنال‌های حاصل جمع و تفاوت تولید خواهد شد. برخی از محصولات به‌اصطلاح درون مدولاسیونی^{۲۰} حاصل مشکل ساز هستند زیرا در فرکانس نزدیک یا داخل باند گیرنده رخ می‌دهند و با سیگنال دریافتی تداخل می‌کنند. این گونه سیگنال‌ها، به‌دلیل نزدیک بودن به سیگنال مورد نظر، قابل فیلتر نیستند. این سیگنال‌های درون مدولاسیون باید تا حد امکان در طراحی گیرنده با انتخاب اجزای خطی‌تر یا توجه بیشتر به طرح‌های بایاس و نقاط عملیاتی کاهش یابد.



شکل ۲۲.۲۲: تولید درون مدولاسیون مرتبه سوم.

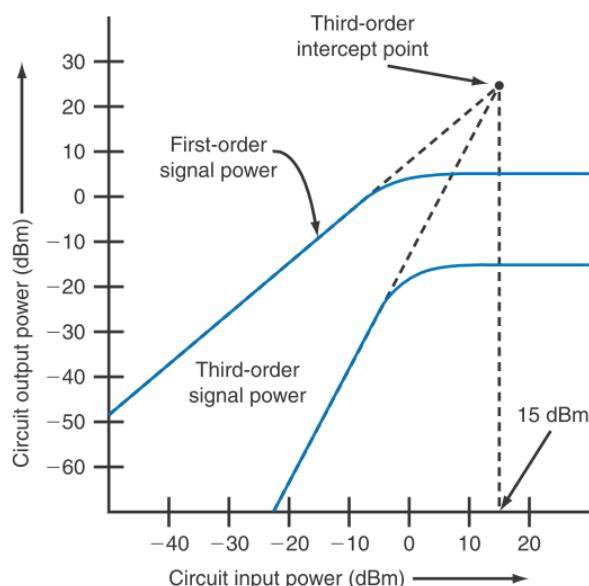
شکل (۲۲.۲۲) دو سیگنال f_1 و f_2 را نشان می‌دهد که در ورودی یک تقویت کننده ظاهر می‌شوند. عمل غیر خطی تقویت کننده طیف وسیعی از مجموع و تفاوت‌ها را ایجاد می‌کند، از جمله مواردی که هارمونیک‌های دوم و سوم دارند. اکثر این محصولات نامطلوب توسط فیلترهای IF گیرنده فیلتر می‌شوند. تولید سیگنال مرتبه سوم بیشترین مشکلات را ایجاد می‌کنند، زیرا به‌احتمال زیاد در باند IF گیرنده قرار می‌گیرند. تولید مرتبه سوم $f_2 \pm 2f_1$ و $2f_2 \pm f_1$ هستند که عبارت‌های $f_2 - 2f_1$ و $2f_2 - f_1$ بیشترین مشکل را ایجاد می‌کنند.

^{۲۰} Intermodulation

خوب است بدانید که:

تولید مرتبه سوم که اغلب با سیگنال تداخل دارند عبارتند از $f_2 - 2f_1$ و $f_1 - 2f_2$.

برای اندازه‌گیری مشکل مرتبه سوم، دو سیگنال قدرت برابر به تقویت کننده یا مدار دیگری که باید آزمایش شود اعمال می‌شود. فاصله فرکانس معمولاً کوچک است و اغلب برابر با فاصله کانال معمولی استفاده می‌شود. قدرت سیگنال‌های ورودی به تدریج افزایش می‌یابد و اندازه‌گیری‌هایی روی خروجی تقویت کننده برای تعیین سطوح سیگنال‌های آزمایشی و محصولات درجه سوم انجام می‌شود. با افزایش سطوح توان سیگنال‌های ورودی، با تغییر مکعب توان ورودی، توان سیگنال مرتبه سوم افزایش می‌یابد. در مقیاس لگاریتمی، نرخ افزایش محصولات درجه سوم سه برابر سیگنال‌های اصلی است.



شکل ۲۳.۲۲: نمودار رهگیری مرتبه سوم تقویت کننده RF

به شکل (۲۳.۲۲) مراجعه کنید. اگر دامنه سیگنال خروجی را در مقابل افزایش قدرت سیگنال ورودی رسم کنید، در نقطه‌ای سطوح توان به حد خود می‌رسد و صاف می‌شود. اگر بخش‌های خطی دو منحنی را گسترش دهید، آنها در نقطه‌ای تئوری بهم می‌رسند که در آن سیگنال‌های مرتبه سوم پایین‌تر در ابتدا با سیگنال‌های ورودی اصلی در دامنه برابر می‌کنند. این نقطه رهگیری مرتبه سوم است. توان ورودی در آن نقطه به عنوان معیاری برای مدولاسیون استفاده می‌شود. در شکل (۲۳.۲۲)، نقطه IP3 در ۱۵ دسی‌بل است. مقادیر معمول IP3 بین ۰ تا ۳۵ dBm هستند. هرچه مقدار IP3 بیشتر باشد، خطی بودن مدار بهتر و محصولات درون مدولاسیون کمتر است.

آزمایش مایکروویو

آزمایش‌های مایکروویو معمولاً مشابه آزمایش‌هایی است که روی فرستنده‌ها و گیرنده‌های استاندارد انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌های فرستنده شامل توان خروجی، انحراف، هارمونیک‌ها و سیگنال‌های

کاذب و همچنین مدولاسیون است. تکنیک‌ها مشابه هستند، اما فقط به استفاده از آن دسته از ابزارهای آزمایشی نیاز دارند که پاسخ فرکانسی آنها در ناحیه مایکروویو مورد نظر باشد. همین امر در مورد اندازه‌گیری گیرنده و آزمایش خط انتقال آتنن نیز صدق می‌کند. رویه‌ها به طور کلی یکسان است، اما تجهیزات متفاوت است. به عنوان مثال، با اندازه‌گیری توان، معمولاً از یک تزویج کننده جهتی به عنوان خروجی فرستنده استفاده می‌شود تا سیگنال را به سطح مناسب برای اندازه‌گیری با قدرت سنج کاهش دهد.

آزمایش ارتباطات داده‌ها

آزمایش‌های تجهیزات ارتباطی داده‌های بی‌سیم اساساً همان آزمایش‌هایی است که برای ارتباطات استاندارد RF در بالا توضیح داده شد. تنها تفاوت در نوع مدولاسیون مورد استفاده برای اعمال سیگنال باینری به حامل است. FSK و بسیاری از انواع آن، همچنین PSK و طیف گسترده، بیشترین استفاده را دارند. انحراف سنجها و مدولاسیون FSK و PSK ویژه برای انجام این اندازه‌گیری‌ها موجود است.

برای کاربردهای ارتباط داده‌ای که در آن سیگنال‌های باینری باند پایه روی کابل‌های کواکسیال و زوج سیم تابیده هستند، مانند شبکه‌های محلی، ممکن است از روش‌های آزمایش مرسوم تری استفاده شود. به عنوان مثال، الگوهای آزمایش دودویی ممکن است در تجهیزات فرستنده آغاز شوند و سیگنال در اسیلوسکوپ در انتهای گیرنده مشاهده شود. سپس می‌توان آزمایش‌های تضعیف سیگنال و شکل موج را انجام داد.

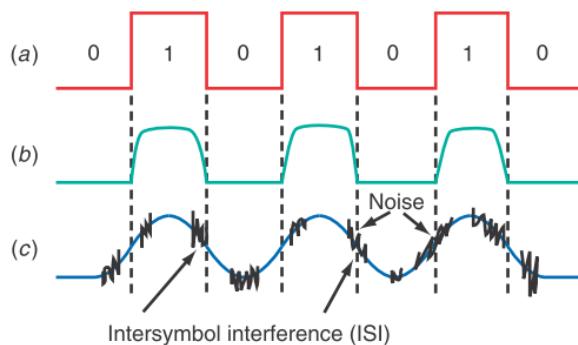
نمودار چشمی: یک روش رایج برای تجزیه و تحلیل کیفیت داده‌های باینری ارسال شده بر روی کابل، نمایش چیزی است که به عنوان نمودار چشمی یک اسیلوسکوپ رایج شناخته می‌شود. نمودار چشم، یا الگو، نمایش تک تک بیت‌ها است که با یکدیگر همپوشانی دارند. خروجی حاصل مانند یک چشم باز به نظر می‌رسد. شکل الگو و درجه "باز بودن" چشم را می‌توان برای تعیین بسیاری از موارد در مورد کیفیت انتقال استفاده کرد.

نمودارهای چشمی برای آزمایش استفاده می‌شوند زیرا نمایش جریان‌های طولانی از بیت‌های سریال تصادفی روی اسیلوسکوپ دشوار است. تصادفی بودن داده‌ها از همگام سازی خوب اسیلوسکوپ با داده‌ها جلوگیری می‌کند و در نتیجه نمایشگر به طور مداوم دچار لرزش و تغییر می‌شود. ارسال همان الگوی بیت‌ها مانند تکرار کد ASCII برای حرف U (تناوب ۱ و ۰) ممکن است به فرآیند همگام‌سازی کمک کند، اما نمایش یک کلمه کامل روی صفحه نمایش معمولاً جزئیات کافی برای تعیین ماهیت آن را ارائه نمی‌کند. علامت نمودار چشمی این مشکلات را حل می‌کند.

خوب است بدانید که:

نمودار چشمی یک راه عالی برای بررسی غیردقیق، سریع و کیفی یک سیگنال است. الگوی چشم در یک نگاه میزان محدودیت پنهانی باند، اعوجاج سیگنال، لرزش و حاشیه نویز را نشان می‌دهد.

شکل (۲۴.۲۲)(الف) یک قطار پالس سریالی از ۰ها و ۱ها باینری متنابوب را نشان می‌دهد که به یک خط انتقال اعمال می‌شود. خط انتقال، اعم از کواکسیال یا زوج سیم تابیده، یک فیلتر پایین گذر است و بنابراین اجزای با فرکانس بالاتر را در قطار پالس حذف یا حداقل تا حد زیادی ضعیف می‌کند. همچنین سیگنال را به تاخیر می‌اندازد. نتیجه این است که سیگنال در انتهای کابل و ورودی به گیرنده گرد و مخدوش می‌شود [شکل (۲۴.۲۲)(ب)].



شکل ۲۴.۲۲: (الف) سیگنال ایدهآل قبل از انتقال. (ب) تضعیف، اعوجاج و تأخیر سیگنال توسط محیط (کابل کواکسیال یا زوج سیم تابیده). (ج) سیگنال بهشدت ضعیف شده با نویز.

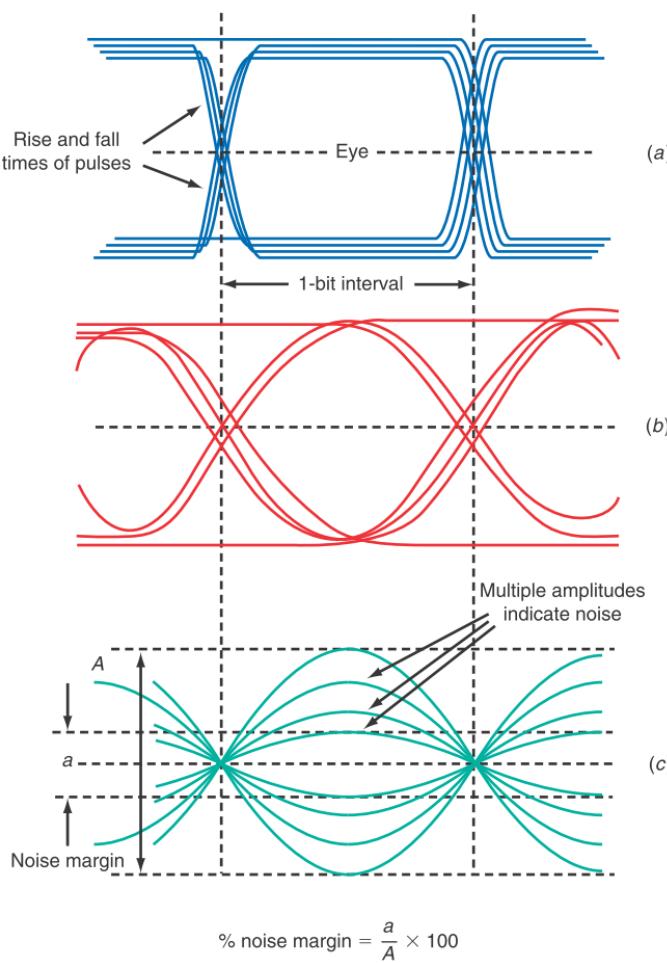
هر چه کابل طولانی تر و یا نرخ بیت بیشتر باشد، اعوجاج بیشتر است. پالس‌ها تمایل دارند در یکدیگر محو شوند و باعث ایجاد تداخل بین نمادی^{۲۱} (ISI) می‌شوند. ISI سطح ولتاز دودویی ۱ و ۰ را با ۱ بیت لکه‌دار یا همپوشانی بهدیگری نزدیک می‌کند. این کار گیرنده را در تشخیص واضح باینری ۱ از باینری ۰ دشوارتر می‌کند. علاوه بر این، نویز معمولاً در طول مسیر انتقال دریافت می‌شود و سیگنال دریافتی را بهنمایش ضعیفی از سیگنال داده اصلی تبدیل می‌کند. گرد کردن بیش از حد سیگنال یا ISI باعث ایجاد خطاهای بیتی می‌شود. شکل (۲۴.۲۲)(ج) یک سیگنال داده بهشدت اعوجاج و نویز را نشان می‌دهد.

الگوی چشمی راهی برای مشاهده سیگنال داده سریالی و تعیین کیفیت آن فراهم می‌کند. برای نمایش نمودار چشمی، بهیک اسیلوسکوپ با پهنهای باند حداقل پنج برابر حداقل نرخ بیت نیاز دارد. به عنوان مثال، اگر نرخ بیت ۱۰ مگابیت در ثانیه باشد، پهنهای باند اسیلوسکوپ باید حداقل 5×10 مگاهرتز یا ۵۰ مگاهرتز باشد. هر چه بالاتر بهتر. اسیلوسکوپ باید جارو کردن را راهاندازی کرده باشد. می‌توان از اسیلوسکوپ آنالوگ معمولی یا دیجیتالی استفاده کرد.

سیگنال دودویی باند پایه را در انتهای کابل و ورودی گیرنده را به ورودی عمودی اعمال کنید. سرعت حرکت اسیلوسکوپ را طوری تنظیم کنید که یک فاصله ۱ بیتی کل عرض افقی صفحه را بگیرد. از کنترل جابجایی متغیر برای تنظیم دقیق نمایشگر استفاده کنید و از کنترل‌های ماشه (تیریگر) برای تثبیت نمایشگر استفاده کنید. نتیجه یک نمودار چشمی است.

چندین الگوی مختلف چشمی در شکل (۲۵.۲۲) نشان داده شده است. خطوط متعدد نشان دهنده تداخل پالس‌هایی است که در طول زمان رخ می‌دهند. دامنه و تغییر فاز آن‌ها اندکی از جارو به جارو تغییر می‌کند و در نتیجه نوع الگوی نشان داده شده را نشان می‌دهد. اگر سیگنال بهشدت گرد، تأخیر یا تحریف نشده باشد، ممکن است همانطور که در شکل (۲۵.۲۲)(الف) نشان داده شده است ظاهر شود. چشم کاملاً باز است و شکل ذوزنقه‌ای دارد. این یک نمایش ترکیبی از زمان‌های صعود و سقوط پالس‌هایی است که روی یکدیگر همپوشانی دارند. هرچه طرفین شب‌دارتر باشند، اعوجاج کمتر است. الگوی چشمی در شکل (۲۵.۲۲)(الف) پهنهای باند وسیع محیط را نشان می‌دهد. در شکل (۲۵.۲۲)(ب)، این الگو بیشتر شبیه یک چشم باز است. پالس‌ها گرد هستند که نشان

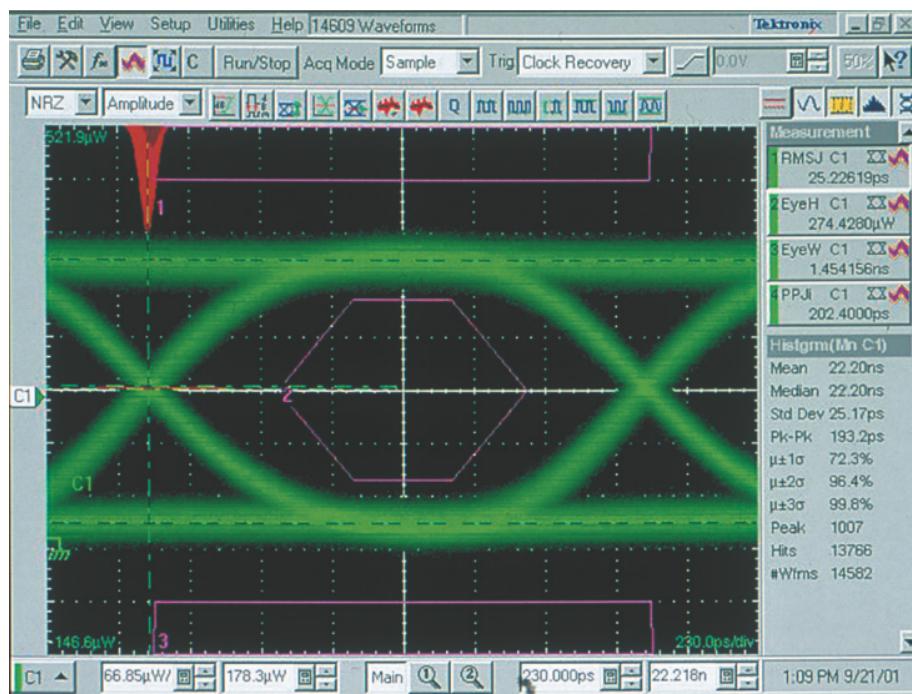
^{۲۱} InterSymbol Interference (ISI)



شکل ۲۵.۲۲: نمودارهای چشمی (الف) پهنهای باند خوب. (ب) پهنهای باند محدود. (ج) محدودیت شدید پهنهای باند همراه با نویز.

می‌دهد پهنهای باند محدود است. در واقع، پالس‌ها به‌شکل یک موج سینوسی نزدیک می‌شوند. الگوی نشان داده شده در شکل (۲۵.۲۲)(ج) محدودیت شدیدتر پهنهای باند را نشان می‌دهد. این امر دامنه پالس‌های گرد را کاهش می‌دهد و در نتیجه الگویی به‌نظر می‌رسد که چشمی در حال بسته شدن است. هر چه چشم بیشتر بسته شود، پهنهای باند باریکتر، اعوجاج بیشتر و تداخل بین نمادی بیشتر می‌شود. تفاوت بین سطوح ۰ و ۱ باینری کمتر است و احتمال اینکه گیرنده سطح را اشتباه تفسیر کند و خطای بیتی ایجاد کند بیشتر است.

در شکل (۲۵.۲۲)(ج) بیشتر توجه کنید که دامنه برخی از ردیابی‌ها با بقیه متفاوت است. این ناشی از نویز است که دامنه سیگنال را تغییر می‌دهد. نویز می‌تواند گیرنده را بیشتر گیج کند و در نتیجه خطاهای بیتی ایجاد کند. مقدار ولتاژ بین پایین‌ترین الگوی بالایی و بالاترین الگوی پایین‌تر همانطور که نشان داده شده است حاشیه نویز نامیده می‌شود. هر چه این مقدار کوچکتر باشد، نویز بیشتر و نرخ خطای بیت بیشتر می‌شود. حاشیه نویز گاهی اوقات بر اساس نسبت سطح حاشیه نویز



یک نمودار چشمی روی یک اسیلوسکوپ که برای آزمایش ارتباط داده‌های نوری بهینه شده است.

در شکل (۲۵.۲۲) (ج) به حداکثر مقدار پیک به پیک چشم A بیان می‌شود.

نمودار چشمی یک روش اندازه‌گیری دقیق نیست. اما این یک راه عالی برای بررسی کیفی سریع سیگنال است. الگوی چشمی در یک نگاه میزان محدودیت پهنه‌ای باند، اعوجاج سیگنال، لرزش و حاشیه نویز را نشان می‌دهد.

مولدهای الگو: یک الگوی مولد دستگاهی است که الگوهای بیت باینری ثابت را به صورت سریالی تولید می‌کند تا به عنوان سیگنال‌های آزمایشی در سیستم‌های ارتباطی داده استفاده شود. مولد الگو ممکن است یک کد اسکی تکرار شونده یا هر جریان دلخواه ۱ و ۰ تولید کند. از مولدهای الگو برای جایگزینی منبع واقعی داده‌ها مانند کامپیوتر استفاده می‌شود. الگوهای خروجی آنها را می‌توان به کدها یا پیام‌های استاندارد تغییر داد یا ممکن است به دنبالهای دلخواه قابل برنامه‌ریزی باشد. یک مولد الگو ممکن است در نرم افزار کامپیوتر فرستنده پیاده سازی شود.

آزمایش‌های نرخ خطای بیت : در انتهای دیگر پیوند، دنباله مولد الگو شناسایی شده و با الگوی واقعی شناخته شده یا پیام ارسال شده مقایسه می‌شود. هر گونه خطأ در مقایسه نشان دهنده خطأ است. ابزاری که الگوی پالس را تشخیص می‌دهد و آن را با هم مقایسه می‌کند، تحلیلگر نرخ خطای بیت^{۲۲} (BER) نامیده می‌شود. این داده‌های ارسالی و دریافتی را به صورت بیت به بیت مقایسه می‌کند تا به خطاهای بیتی اشاره کند. تعداد کل بیت‌های ارسال شده و تعداد خطاهای رخ داده را پیگیری می‌کند و سپس BER را با تقسیم تعداد خطاهای بر تعداد بیت‌های ارسال شده محاسبه می‌کند. آزمایش R BER البته باید الگوی دقیق یا پیام ارسال شده توسط مولد الگو را بداند.

^{۲۲} Bit Error Rate (BER)

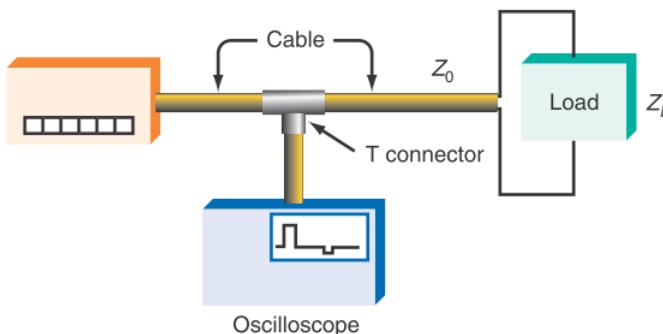
$$BER = \frac{\text{تعداد خطاهای شناسایی شده}}{\text{تعداد خطاهای ارسال شده}} \times 100$$

آزمایش‌های TDR با آنالایزر: ابزارهای ویژه آزمون ارتباط داده نیز موجود است. یک ابزار محبوب، آزمایش ر TDR است که به عنوان LAN متر آنالایزر کابلی نیز شناخته می‌شود. این ابزار، اغلب دستی، به کابل کواکسیال یا زوج سیم تابیده متصل می‌شود و قادر به انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که برخی از آنها عبارتند از:

۱. آزمایش‌های اتصال باز یا اتصال کوتاه و ناهنجاری‌های امپدانس روی کابل‌های کواکسیال یا زوج سیم تابیده.
۲. اندازه‌گیری طول کابل، ظرفیت خازنی و مقاومت حلقه.
۳. اندازه‌گیری تضعیف کابل.
۴. آزمایش‌های سیم کشی نادرست کابل مانند به‌اصطلاح زوج‌های تقسیم شده.^{۲۳}

یک خطای سیم کشی زوج تقسیم شده اغلب زمانی ایجاد می‌شود که یک کابل دارای چندین خط زوج تابیده باشد. یکی از سیم‌های یک زوج تابیده به اشتباه با یک سیم از یک زوج تابیده دیگر تزوج می‌شود.

بسیاری از آزمایش‌ها بر اساس چیزی است که بازتاب‌سنگی دامنه زمانی (TDR) نامیده می‌شود. تکنیک TDR را می‌توان در هر کابل یا خط انتقال، مانند خطوط آتنی یا کابل‌های LAN، برای تعیین SWR، مدارهای اتصال کوتاه و باز، و عدم تطبیق امپدانس مشخصه بین کابل و بار استفاده کرد. حتی می‌تواند فاصله تا مدار کوتاه یا باز یا هر اشکال دیگری را در هر نقطه از خط تعیین کند. اگر امپدانس‌ها تطبیق نداشته باشند، آزمایش TDR بر اساس وجود امواج ایستاده در خط است.



شکل ۲۶.۲۲: راهاندازی آزمایش TDR

فرآیند اصلی TDR اعمال یک پالس مستطیلی به ورودی کابل و نظارت بر سیگنال در ورودی است. تنظیمات آزمایش در شکل (۲۶.۲۲) نشان داده شده است. اگر امپدانس بار تطبیق باشد، پالس

^{۲۳}Split Pairs

توسط بار جذب می‌شود و هیچ بازتابی رخ نمی‌دهد. با این حال، اگر یک مدار اتصال کوتاه یا باز یا عدم تطبیق امپدانس وجود داشته باشد، یک پالس از نقطه عدم تطبیق منعکس می‌شود.

آنالایزرهای پروتکل : پیچیده‌ترین تجهیزات آزمایش ارتباطات داده، تحلیلگر پروتکل است. هدف آن جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های ارسال شده در یک سیستم خاص است. بیشتر سیستم‌های ارتباطی داده‌ها را در قالب‌ها یا بسته‌هایی ارسال می‌کنند که شامل اطلاعات مقدماتی مانند بیت‌ها یا فریم‌های همگام‌سازی، کدهای شروع سرصفحه، آدرس مبدأ و مقصد، و یک بلوک متناهی از داده‌ها و بهدلیل آن کدهای تشخیص خطأ است. یک تحلیلگر پروتکل می‌تواند این فریم‌ها را بگیرد، آنها را تجزیه و تحلیل کند و به‌شما بگوید که آیا سیستم بهدرستی کار می‌کند یا خیر. تحلیلگر پروتکل خاصی را که در حال ضبط است تعیین می‌کند و سپس نشان می‌دهد که آیا داده‌های ارسال شده از پروتکل پیروی می‌کنند یا خطاهایی در انتقال یا قالب‌بندی قاب وجود دارد.

آنالایزرهای پروتکل حاوی میکروکامپیوترهایی هستند که برای شناسایی طیف وسیعی از پروتکلهای ارتباطی داده مانند، Bisync، HDLC، SDLC، Ethernet، SONET، OTN و سایر پروتکلهای شبکه برنامه‌ریزی شده‌اند. این ابزارها معمولاً داده‌ها هزار دلار قیمت دارند و در واقع ممکن است در درجه اول یک کامپیوتر حاوی پروتکل‌ها و نرم افزارهای ذخیره شده باشند که داده‌های دریافتی را می‌خواند و ذخیره و سپس مقایسه و تجزیه و تحلیل می‌کند تا بتواند هرگونه تفاوت یا خطأ را گزارش کند. اکثر آنالایزرهای پروتکل دارای نمایشگر ویدئویی هستند.

دستگاه‌های آزمایش ویژه : با پیچیده‌تر شدن تجهیزات ارتباطی، بهویژه بی‌سیم، توسعه سیستم‌های آزمایشی ویژه برای پروتکلهای خاص ضروری است. به عنوان مثال، مجموعه‌های آزمایش ویژه‌ای برای تلفن‌های همراه، GSM، CDMA، LTE، Wi-Fi، و بلوتوث ایجاد شده است. این مجموعه‌های آزمایش چندین ابزار را در یک محفظه مشترک به همراه یک کامپیوتر برای کنترل ترکیب می‌کنند. ابزارها شامل مولدهای سیگنال (سینتی‌سایزر) هستند که بر روی باندهای فرکانسی مورد نظر به همراه مدولاسیون و پروتکل مناسب برای یک استاندارد معین کار می‌کنند. این قسمت از مجموعه آزمایش اجازه آزمایش گیرنده را می‌دهد. بخش دیگر شامل یک گیرنده کالیبره شده است که برای دریافت هر سیگنال ارسالی تنظیم شده است. یک کامپیوتر داخلی طوری برنامه‌ریزی شده است که توالی دقیقی از آزمایش‌ها را انجام دهد و سپس داده‌ها را ضبط و تجزیه و تحلیل کند. مجموعه‌های آزمایش فرآیند آزمایش را خودکار می‌کنند و واحدهایی (تلفن‌های همراه و غیره) را شناسایی می‌کنند که در آزمون‌ها موفق می‌شوند یا شکست می‌خورند. این سیستم‌های خودکار معمولاً شامل تحلیلگرهای طیف داخلی برای نمایش نتایج هستند.

تجهیزات و اندازه‌گیری آزمایش فیبر نوری

انواع ابزارهای ویژه برای آزمایش و اندازه‌گیری سیستم‌های فیبر نوری موجود است. پرکاربردترین ابزارهای فیبر نوری اسپلایسر خودکار و بازتاب سنج حوزه زمان نوری^{۲۴} (OTDR) هستند.

اسپلایسرهای اتوماتیک : اتصال کابل فیبر نوری یک اتفاق رایج در نصب و نگهداری سیستم‌های فیبر نوری است. این عملیات را می‌توان با ابزارهای دستی مخصوصاً برای برش، پرداخت و اتصال کابل انجام داد. با این حال، با ریزتر شدن ضخامت کابل، اتصال دستی دشوارتر از همیشه شده است. تراز کردن دو سر کابل قبل از اتصال کاملاً دشوار است.

برای غلبه بر این مشکل، یک اسپلایسر مخصوص توسط چندین سازنده ساخته شده است. این روشی را برای تراز کردن خودکار انتهای کابل و اتصال آنها فراهم می‌کند. دو کابلی که قرار است به هم

^{۲۴} Optical Time Domain Reflectometer (OTDR)

متصل شوند با دست جدا شده و جدا می‌شوند و سپس در دستگاه قرار می‌گیرند. یک مکانیسم ویژه دو سر کابل را نزدیک بهم نگه می‌دارد. سپس یک سیستم نوری با منبع نور، لنزها و حسگرهای نور، تراز فیزیکی دو کابل را تشخیص می‌دهد و یک مکانیسم بازخورد سرو و موتور را به گونه‌ای هدایت می‌کند که دو سر کابل کاملاً روی یکدیگر متumer کر شوند. یک صفحه نمایش نوری ارائه شده است تا اپراتور بتواند تراز را از دو جهت در 90° درجه نسبت به یکدیگر مشاهده کند.

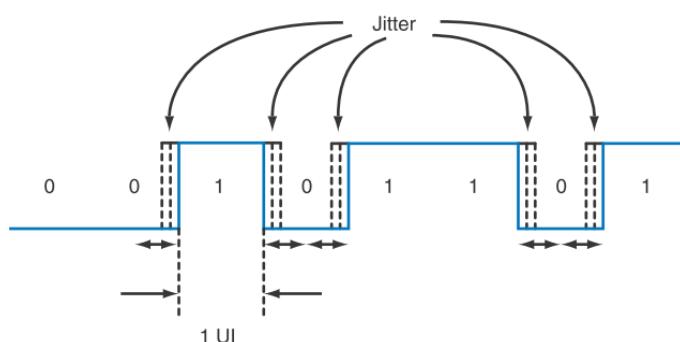
هنگامی که تراز کامل شد، اسپلایسر فعال می‌شود. اسپلایسر یک زوج پروب است که در مرکز اتصال دو سر کابل قرار دارد. با فشار دادن دکمه "اسپلایس" باعث می‌شود که پروب‌ها یک قوس الکتریکی به اندازه کافی داغ کنند تا دو سر کابل شیشه‌ای را بهم متصل کند.

اسپلایسر اتوماتیک بسیار گران است اما باید از آن استفاده کرد زیرا نمی‌توان به صورت بصری و دستی اتصالات خوبی را برای انسان ایجاد کرد. اتصالات دستساز دارای میرایی بالایی هستند، در حالی که کمترین تضعیف بهترین وجه با اسپلایسر خودکار به دست می‌آید.

بازتاب سنج نوری حوزه زمان : ابزار ضروری دیگر برای کار فیبر نوری TDR نوری یا OTDR است. این یک دستگاه اسیلوسکوپ مانند با نمایشگر LCD و یک میکرو کامپیوتر داخلی است.

OTDR به عنوان یک TDR استاندارد عمل می‌کند، زیرا در این مورد، یک پالس نور تولید و آن را به پایین کابل مورد آزمایش می‌فرستد. اگر شکستگی یا نقصی وجود داشته باشد، بازتاب نور وجود دارد، همانطور که در یک خط انتقال الکتریکی انعکاس وجود دارد. انعکاس تشخیص داده می‌شود. مدار داخلی زمان بین پالس‌های ارسالی و معکس شده را اندازه‌گیری کرده تا بتوان محل شکست یا سایر خطاهای را محاسبه و نمایش داد. OTDR همچنین اتصالات، و سایر ناهنجاری‌ها مانند فرورفتگی در کابل را تشخیص می‌دهد. نقص هر یک از این بی‌نظمی‌ها قابل تعیین و نمایش است.

آنالایزر سیگنال نوری : نسل جدیدتری از ابزار آزمایش نوری همه کاره اندازه‌گیری‌های متعددی را انجام می‌دهد. این واحد علاوه بر ارائه اندازه‌گیری OTDR، یک اسیلوسکوپ نمونه‌برداری است که قادر به نمایش سیگنال‌های بیش از 10^6 گیگابیت در ثانیه است. همچنین می‌توان از آن برای نشان دادن الگوهای چشمی، قدرت خروجی نوری و لرزش استفاده کرد.



شکل ۲۷.۲۲: لرزش در سیگنال داده.

جیتر نوعی نویز است که به صورت تغییر زمانی لبه‌های اصلی و انتهایی سیگنال باینری، نشان داده می‌شود، شکل (۲۷.۲۲). به عنوان نوعی تغییر فاز یا فرکانس ظاهر می‌شود که در آن دوره زمانی برای

۱ بیت با سرعتی سریع طولانی یا کوتاه می‌شود. جیتر در یک اسیلوسکوپ به صورت تار شدن انتقال ۰ به ۱ و ۱ به ۰ یک سیگنال باینری نشان داده می‌شود. در نرخ داده‌های پایین‌تر مشکل چندانی وجود ندارد، اما با بالا رفتن نرخ داده‌ها از یک گیگاهرتز، جیتر شایع‌تر می‌شود. در سیستم‌های داده فیبر نوری، جیتر یک مشکل بزرگ است. علاوه بر این، اندازه‌گیری جیتر دشوار است. اکثر شبکه‌های ارتباطی فیبر نوری مانند SONET دارای مشخصات جیتر هستند که باید رعایت شوند. بنابراین، برخی از روش‌های دقیق اندازه‌گیری مورد نیاز است. برخی از آنالایزرهای سیگنال نوری جدیدتر دارای قابلیت اندازه‌گیری لرزش هستند. جیتر معمولاً به صورت درصدی از فاصله واحد (UI) بیان می‌شود. رابط کاربری زمان بیت سیگنال باینری است. به عنوان مثال، اندازه‌گیری لرزش ممکن است ۰.01 UI یا 10 mUI باشد.

خوب است بدانید که:

جیتر(لرزش) نویز است که یک تغییر زمانی در ابتدا و انتهای یک سیگنال باینری است.

۳.۲۲ تکنیک‌های عیب‌یابی

برخی از وظایف اصلی یک متخصص ارتباطات، عیب‌یابی، سرویس و نگهداری تجهیزات ارتباطی است. اکثر تجهیزات ارتباطی نسبتاً قابل اعتماد هستند و نیاز به نگهداری کمی دارند. با این حال، تجهیزات خراب می‌شوند. اکثر تجهیزات ارتباطی الکترونیکی به دلیل فرسودگی و پارگی در حین کار از کار می‌افتد. البته هنوز هم ممکن است تجهیزات در نتیجه نقص قطعات از کار بیفتدند. تجهیزات ممکن است در نهایت به دلیل طراحی ضعیف، فراتر از قابلیت‌های مخصوص یا استفاده نادرست از کار بیفتدند. در هر صورت، شما باید چنین خرابی‌هایی را بیابید و آنها را تعمیر کنید. اینجاست که تکنیک‌های عیب‌یابی ارزشمند هستند. هدف این است که به سرعت مشکل را پیدا، حل و تجهیزات را تا حد امکان اقتصادی به کار بگیرید.

مشاوره خدمات عمومی

یکی از تصمیمات اصلی که باید در برخورد با هر نوع تجهیزات الکترونیکی بگیرید، تعمیر یا عدم تعمیر است. به دلیل ماهیت تجهیزات الکترونیکی امروزه، تعمیر آن ممکن است سریع‌ترین و مقرن به صرفه‌ترین روش نباشد.

فرض کنید که شما یک فرستنده رادیویی معیوب دارید. یکی از گزینه‌های شما این است که دستگاه را برای تعمیر بفرستید. نرخ تعمیرات بسته به تجهیزات، سازنده و سایر عوامل از ۵۰ دلار در ساعت تا بیش از ۱۰۰ دلار در ساعت است. اگر مسئله غامض است، پیدا کردن و تعمیر آن ممکن است چندین ساعت طول بکشد. بسیاری از فرستنده‌های ارتباطی واحد‌های ارزان‌قیمتی هستند که ممکن است برای خرید جدید کمتر از تعمیر هزینه داشته باشند.

دو نوع رویکرد تعمیر وجود دارد: (۱) تعویض مژول‌ها یا (۲) عیب‌یابی در سطح قطعه و جایگزینی اجزای جداگانه. برخی از تجهیزات الکترونیکی در بخش‌ها یا مژول‌ها ساخته می‌شوند. مژول در بیشتر موارد، یک PCB جداگانه است که شامل بخشی از مدار داخل واحد است. چیدمان معمولی ممکن است این باشد که گیرنده روی یک PCB، فرستنده روی دیگری، و منبع تغذیه روی دیگری باشد،

و واحد دیگری مانند تیونر یا سینتی‌سایزر فرکانس نیز جداگانه باشد. یک راه سریع و آسان برای عیب‌یابی و تعمیر یک واحد، تعویض کل مژول معیوب است. اگر شما تولید کننده‌ای هستید که واحدهای خود را به تعداد زیاد برای مشتریان تعمیر می‌کنید، یا اگر سازمان شما تعمیرات زیادی با ماهیت مشابه روی یک برنده یا مدل خاص از تجهیزات انجام می‌دهد، تعمیر در سطح قطعات بهترین رویکرد است.

مشکلات رایج

بسیاری از تعمیرات را می‌توان به سرعت و به راحتی انجام داد زیرا این تعمیرات ناشی از مشکلاتی است که به طور منظم رخ می‌دهد. برخی از رایج‌ترین مشکلات در تجهیزات ارتباطی، خرابی منبع تغذیه، خرابی کابل و کانکتور و مشکلات آنتن است.

منبع تغذیه : تمام تجهیزات توسط نوعی منبع تغذیه می‌شوند. اگر منبع تغذیه کار نکند، تجهیزات کاملاً غیر قابل استفاده است. بنابراین، یکی از اولین کارهایی که باید انجام دهید این است که بررسی کنید که منبع تغذیه کار می‌کند.

اگر دستگاه در یک مکان ثابت استفاده می‌شود و از خطوط برق ac استاندارد کار می‌کند، اولین آزمایش باید برای بررسی برق ac و در دسترس بودن ولتاژ منبع تغذیه dc صحیح باشد. آیا دستگاه به برق وصل است، و اگر اینطور است، آیا برق متناوب به پریز می‌رسد؟ اگر برق ac واقعاً در دسترس است، منبع تغذیه داخل واحد را بررسی کنید. این منابع تغذیه، برق متناوب را به یک یا چند ولتاژ dc برای کارکرد تجهیزات تبدیل می‌کنند. تجهیزات را باز کنید و با استفاده از اطلاعات سرویس سازنده، ولتاژ منبع تغذیه را تعیین کنید. سپس از یک مولتی‌متر برای بررسی اینکه آنها در سطوح صحیح هستند استفاده کنید. اکثر منابع تغذیه این روزها تنظیم شده‌اند، و بنابراین ولتاژها باید بسیار نزدیک به ولتاژهای مشخص شده باشد، حداقل در ± 5 درصد. هر چیزی خارج از این محدوده باید مشکوک باشد. هر ولتاژی که آشکارا کاملاً با مقدار مشخص شده متفاوت است نشان دهنده مشکل منبع تغذیه است.

یکی دیگر از مشکلات رایج منبع تغذیه باتری بد است. با استفاده مداوم، باتری‌ها به سرعت تمام می‌شوند. در صورت استفاده از باتری‌های اولیه، باتری‌ها باید با باتری‌های جدید تعویض شوند. اگر باتری‌های ثانویه یا قابل شارژ حتی پس از مدت‌های کوتاه استفاده پس از شارژ همچنان خراب می‌شوند، به این معنی است که آنها نیز باید تعویض شوند. بیشتر باتری‌های قابل شارژ را می‌توان تنها چند بار شارژ و دشارژ کرد، قبل از اینکه دیگر موثر نباشند.

کابل و اتصالات : شاید رایج‌ترین نقاط خرابی در هر سیستم یا تجهیزات الکترونیکی، قطعات مکانیکی باشد. اتصالات و کابل‌ها مکانیکی هستند و می‌توانند یک حلقه ضعیف در تجهیزات الکترونیکی باشند. هنگامی که تأیید شد که منابع تغذیه در تجهیزات به درستی کار می‌کنند، مرحله بعدی بررسی کابل‌ها و کانکتورها است. با بررسی اینکه کانکتورها به درستی وصل شده‌اند، شروع کنید. یکی دیگر از مشکلات رایج شکستن کابل متصل به کانکتور در داخل است. بیشتر اوقات کابل به طور کامل پاره نمی‌شود، اما ممکن است یک یا چند سیم در کابل شکسته شود در حالی که سیم‌های دیگر متصل می‌مانند.

گاهی اوقات کانکتورها کثیف می‌شوند. حذف کانکتور و تمیز کردن اتصالات اغلب مشکل را حل می‌کند. با این حال، ممکن است برای اطمینان از اتصال فیزیکی قابل اعتماد، تعویض کانکتورها ضروری باشد.

مستندات و اسناد

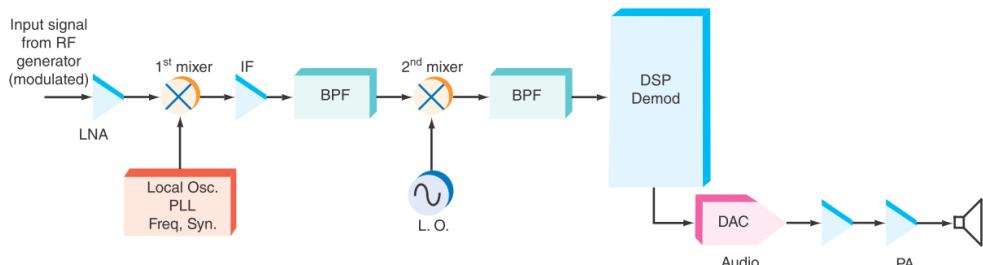
قبل از شروع هرگونه عیب‌یابی دقیق و تعمیر تجهیزات ارتباطی، مطمئن شوید که تمام استناد لازم را دارید. این شامل کتابچه راهنمای کاربر سازنده و هر دفترچه راهنمای خدمات فنی است که می‌توانید تهیه کنید. هیچ چیز به اندازه داشتن تمام اطلاعات فنی قبل از شروع، عیب‌یابی و تعمیر را سریع‌تر نمی‌کند. تولیدکنندگان اغلب به طور منظم مشکلات رایج را شناسایی کرده و روش‌های عیب‌یابی را پیشنهاد می‌کنند. اما شاید مهم‌تر از همه، تولیدکنندگان مشخصات و همچنین داده‌های اندازه‌گیری و روش‌هایی را ارائه می‌کنند که برای عملکرد تجهیزات حیاتی هستند. با داشتن این اطلاعات می‌توانید آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها و تنظیمات لازم را برای اطمینان از مطابقت تجهیزات با مشخصات انجام دهید.

روش‌های عیب‌یابی

دو رویکرد اساسی برای عیب‌یابی فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و سایر تجهیزات وجود دارد: ردیابی سیگنال و تزریق سیگنال. هر دو روش به یک اندازه خوب کار می‌کنند و اغلب ممکن است برای جداسازی یک مشکل دشوار با هم استفاده شوند.

ردیابی سیگنال : یک تکنیک رایج در عیب‌یابی تجهیزات ارتباطی، ردیابی سیگنال نامیده می‌شود. ایده این است که از یک اسیلوسکوپ یا دستگاه تشخیص سیگنال دیگر برای دنبال کردن سیگنال در مراحل مختلف تجهیزات استفاده شود. تا زمانی که سیگنال وجود داشته باشد و دامنه مناسبی داشته باشد، مدارها خوب هستند. نقطه‌ای که سیگنال را در تجهیزات از دست می‌دهید یا در آن سیگنال دیگر با مشخصات مطابقت ندارد، محل مشکل است.

برای انجام ردیابی سیگنال در فرستنده، به نوعی ابزار ناظارت یا اندازه‌گیری نیاز دارید: یک ولت‌متر یا اسیلوسکوپ RF، یک پروب آشکارساز RF روی اسیلوسکوپ، یک آنالایزر طیف، و قدرت سنج و فرکانس شمار.



شکل ۲۸.۲۲: گیرنده ارتباطی عمومی.

شکل (۲۸.۲۲) بلوک دیاگرام یک گیرنده ارتباطی با تبدیل دوگانه است. برای عیب‌یابی این گیرنده، به یک ژنراتور سیگنال RF برای تامین ورودی سطح پایین به پایانه‌های آنتن نیاز دارید. ورودی را با سیگنال صوتی مدوله کنید. سپس با استفاده از یک اسیلوسکوپ، آنالایزر طیف یا ابزار دیگر، سیگنال را در مراحل مختلف گیرنده دنبال کنید. این روش فرض می‌کند که منابع تغذیه کار و تمام مدارهای دیگر ولتاژ dc صحیح را دریافت می‌کنند.

به عنوان اولین قدم، خروجی نوسان ساز محلی یا سینتی‌سایزر فرکانس را آزمایش کرده تا بررسی کنید که سیگنالی به‌اولین میکسر می‌رسد. اگر سیگنال ورودی از RF LNA ورودی عبور می‌کند، خروجی میکسر را بررسی کنید تا مطمئن شوید IF صحیح به‌دست آمده است. سپس سیگنال را

از طریق فیلترهای IF یا مراحل تقویت کننده IF به میکسر دوم ردیابی کنید. مطمئن شوید که نوسان‌ساز محلی سیگنالی را به میکسر دوم می‌دهد. سپس آزمایش کنید تا ببینید آیا IF دوم صحیح در خروجی میکسر ظاهر می‌شود یا خیر.

دمدولاتور ممکن است یک DSP در یک گیرنده مدرن باشد. در اینجا تنها کاری که می‌توانید انجام دهید این است که یک خروجی دیجیتالی و یک خروجی از هر DAC را آزمایش کنید. اگر مراحل صوتی درگیر است، در مرحله بعد آنها را آزمایش کنید. اگر سیگنال ورودی RF را با سیگنال صوتی مدوله کرده باشید، ممکن است خروجی را از بلندگو بشنوید. در غیر این صورت سیگنال صوتی را از طریق هر مرحله تقویت کننده صدا و قدرت ردیابی کنید.

اگر با مشکلی مواجه شدید، احتمالاً مشکل از ترانزیستور یا آی‌سی بد است. قطعات فعال مانند ترانزیستورها و آی‌سی‌ها بیشتر از اجزای غیرفعال مانند مقاومت‌ها، خازن‌ها و سلف‌ها یا ترانسفورماتورها خراب می‌شوند. شما باید ولتاژهای بایاس را بررسی کنید تا مشخص کنید که درست هستند. اما اگر آنها هستند و مدار هنوز کار نمی‌کند، معمولاً یک ترانزیستور باز یا اتصال کوتاه وجود دارد.

سایر اجزا نیز ممکن است خراب شوند. خازن‌ها بیشتر از هر نوع دیگر جز دستگاه‌های نیمه‌هادی خراب می‌شوند. مقاومت‌ها کمتر از کار می‌افتدند اما می‌توانند باز شوند یا مقدارشان تغییر کند. سلف‌ها به ندرت از کار می‌افتدند. اجزای ظرفی و حساس مانند فیلترهای کریستالی، سرامیکی و SAW نیز ممکن است بشکنند. هنگامی که مشکل را در یک قطعه خاص جدا کردید، برق را خاموش کنید، قطعه مشکوک را جایگزین کنید و آزمایشات را تکرار کنید. آزمایش را تا زمانی که گیرنده کار کند ادامه دهید.

تزریق سیگنال : تزریق سیگنال تا حدودی شبیه به ردیابی سیگنال است. معمولاً با گیرنده استفاده می‌شود. فرآیند استفاده از ژنراتورهای سیگنال با فرکانس خروجی صحیح برای تزریق سیگنال به مراحل مختلف گیرنده و بررسی پاسخ خروجی مناسب است که معمولاً سیگنال صحیح در بلندگو وجود دارد.

تزریق سیگنال بر عکس ردیابی سیگنال است، زیرا از بلندگو یا سایر خروجی‌ها شروع می‌شود و از طریق گیرنده از خروجی تا آنتن به عقب عمل می‌کند. اگر خروجی صدا باشد، تزریق سیگنال با آزمایش تقویت کننده قدرت خروجی صدا آغاز می‌شود. شما یک موج سینوسی یک کیلوهرتز را از یک نوسان‌ساز صوتی یا فانکشن ژنراتور به ورودی تقویت کننده تزریق می‌کنید. اطلاعات مستندات گیرنده را با توجه به اینکه چه مقدار سیگنال باید در خروجی‌های هر مرحله وجود داشته باشد، دنبال کنید. اگر سیگنال صوتی شنیده شود، بلندگو و تقویت کننده توان سالم هستند. سپس سیگنال صوتی را به هر مرحله تقویت کننده صوتی دیگر به خروجی مدار دمدولاتور تزریق کنید.

تزریق بعدی در ورودی تقویت کننده IF یا میکسر دوم انجام می‌شود. مولد سیگنال RF را با مدولاسیون صوتی مناسب روی IF تنظیم کنید. شما باید آهنگ صوتی را در بلندگو بشنوید. اگر این کار را نکردید، طبقه نوسان‌ساز محلی و IF را بررسی کنید. از دمدولاتور غافل نشوید. به خاطر داشته باشید که ممکن است واقعاً نتوانید به ورودی و خروجی برخی مدارها دسترسی پیدا کنید زیرا ممکن است در داخل یک آی‌سی قرار داشته باشند. در این صورت، می‌توانید در حین نظارت بر خروجی، تزریق را به ورودی آی‌سی محدود کنید. اگر خروجی دریافت نکردید آی‌سی را تعویض کنید.

سپس، سیگنال هر IF بالاتر را با مدولاسیون در ورودی به‌اولین میکسر تزریق کنید. شما باید صدا را بشنوید. اما اگر این کار را نکردید، اولین طبقه IF و نوسانگر محلی را بررسی و آزمایش کنید. در نهایت تقویت کننده RF را با یک سیگنال در فرکانس دریافت آزمایش کنید.

خوب است بدانید که:

آزمایش محصولات ارتباطی با مجموعه آزمایش‌های ویژه‌ای انجام می‌شود که مطابق با مشخصات و ویژگی‌های استاندارد ارتباطی طراحی شده‌اند. محصولاتی که به‌این روش آزمایش می‌شوند شامل مواردی مانند تلفن‌های همراه، فرستنده‌های LAN بی‌سیم و سیستم‌های فیبر نوری هستند.

عیب‌یابی مدرن : اگرچه ردیابی سیگنال و تزریق سیگنال روش‌های عیب‌یابی معتبری هستند، اما زمانی که برای یک دستگاه ارتباطی مدرن اعمال می‌شوند، دشوارتر از همیشه هستند. به عنوان مثال می‌توان به تلفن‌های همراه و گیرنده‌های LAN بی‌سیم یا کارت‌های خط در یک روترا اشاره کرد. این دستگاه‌ها تنها از یک یا چند آسی سی برای پیاده‌سازی کل زنجیره سیگنال استفاده می‌کنند. دسترسی به مدارهای داخلی تراشه‌ها ممکن نیست، و اگر نگوییم دشوارتر، روش‌هایی که قبل از توضیح داده شد غیرممکن می‌شود. این تکنیک‌ها در چنین دستگاه‌های بسیار یکپارچه استفاده محدودی دارند، اگرچه اصول هنوز معتبر هستند.

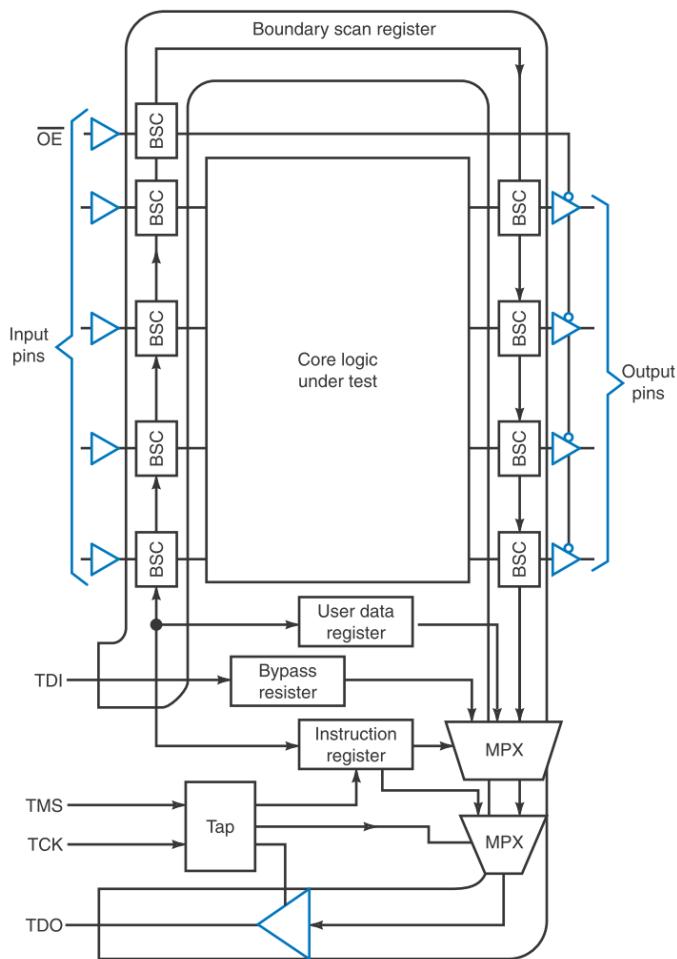
اسکن (روش) مرزی و استاندارد JTAG : تجهیزات شبکه و ارتباطات مدرن عمدتاً از آسی‌های دیجیتالی ساخته شده‌اند. اینها دستگاه‌های در مقیاس بزرگ هستند که برای نصب سطحی روی برد مدار چاپی (PCB) ساخته شده‌اند. دسترسی به پین‌های روی آسی دشوار است و گاهی اوقات ممکن نیست، بنابراین ردیابی سیگنال یا تزریق در عیب‌یابی بی‌ارزش می‌شود. با درک این موضوع، طراحان آسی سی در نهایت راهی برای آزمایش نه تنها تراشه پس از ساخت و بسته‌بندی، بلکه برای آزمایش تجهیزات ساخته شده با این تراشه‌ها نیز کشف کردن. این روش اسکن مرزی نامیده می‌شود.

هدف از اسکن مرزی ارائه راهی برای مشاهده نقاط آزمایش داخل تراشه است که معمولاً در دسترس نیستند و مشاهده سیگنال‌ها در پین‌های آسی که به دلیل نصب سطح روی PCB غیرقابل دسترس هستند. راهی برای اعمال سیگنال‌های آزمایشی به نقاط انتخاب شده در مدار و سپس نظارت بر نتایج ارائه می‌دهد. شکل (۲۹.۲۲) مدار اسکن مرزی را نشان می‌دهد که در بسیاری از آسی‌های پیچیده تعبیه شده است. مدار منطقی که باید آزمایش شود در مرکز قرار دارد و به آن منطق هسته می‌گویند. اطراف هسته یک سری سلول‌های اسکن مرزی (BSC) قرار دارد. هر BSC از یک زوج فلیپ فلاپ و چند مالتی‌پلکس تشکیل شده است که می‌توانند ورودی‌ها را دریافت کرده و آنها را ذخیره کنند یا در هنگام بازجویی محتوای آنها را خروجی کنند. فلیپ فلاپ‌های BSC نیز برای تشکیل یک شیفت رجیستر بزرگ، رجیستر اسکن مرزی، متصل می‌شوند. این رجیستر واحد ذخیره‌سازی اولیه برای ورودی و خروجی داده‌ها را فراهم می‌کند. ورودی و خروجی سریالی هستند. داده‌های سریالی را می‌توان از طریق خط TDI به صورت سریالی خواند. یک سیگنال ساعت خارجی TCK و یک سیگنال انتخاب حالت آزمایش (TMS)^{۲۵} سرعت داده سریال را از طریق کنترل پورت دسترسی آزمایشی^{۲۶} (TAP) کنترل می‌کند. عملکرد مدار اسکن مرزی توسط یک دستورالعمل کد دودویی که به صورت سریال وارد و تعیین می‌شود.

برای خواندن داده‌ها در نقاط نظارت داخلی، مدارهای اسکن مرزی یک دستورالعمل سریال به نام

^{۲۵}Test Mode Select (TMS)

^{۲۶}Test Access Port (TAP)



شکل ۲۹.۲۲: مدار اسکن مرزی در آی‌سی تعبیه شده است.

INTEST تغذیه می‌شوند. این در رجیستر دستورالعمل ذخیره شده و رمزگشایی می‌شود. سپس مدارهای داخلی توسط منطق برای خواندن داده‌ها از منطق هسته و ذخیره آن در BSC‌ها شکل می‌گیرند. سپس داده‌های موجود در رجیستر اسکن مرزی به خارج منتقل شده و به صورت سریالی خوانده می‌شود. این داده‌های سریالی معمولاً به کامپیوتری فرستاده می‌شوند که در آن برنامه از آن برای تعیین درستی نتایج استفاده می‌کند.

دستورالعمل‌های دیگری نیز ممکن است برای کنترل عملکردهای مختلف وارد شود. یک دستورالعمل SAMPLE/PRELOAD برای تنظیم منطق هسته به حالت دلخواه قبل از اجرای آزمایش استفاده می‌شود. دستورالعمل CLAMP همچنین می‌تواند برای تنظیم سطوح منطقی هسته به برخی از الگوهای از پیش تعیین شده استفاده شود. دستور RUNBIST باعث می‌شود که یک خودآزمایی داخلی از پیش تعیین شده (BIST) اجرا شود.

مدار اسکن مرزی و عملکرد آن توسط موسسه مهندسین برق و الکترونیک (IEEE) استاندارد شده است و به عنوان استاندارد ۱۱۴۹.۱ گروه اقدام آزمایش مشترک (JTAG) تعیین شده است. اکثر آسی‌های پیچیده بزرگ اکنون دارای یک رابط JTAG و مدار داخلی هستند. برای آزمایش تراشه استفاده می‌شود. سپس ممکن است توسط سازنده تجهیزات به عنوان راهی برای اجرای یک برنامه آزمایشی بزرگتر برای تجهیزات استفاده شود. از آنجایی که یک کامپیوتر برای استفاده از رابط JTAG برنامه ریزی شده است، اکثر آزمایش‌ها و عیب‌یابی‌ها می‌توانند خودکار باشند. یک مهندس یا تکنسین در واقع می‌تواند جلوی کامپیوتر بنشیند، نرم افزار آزمایش را اجرا کند و تجهیزات را تمرین و آزمایش کند و نتایج را زیر نظر بگیرد.

۴.۲۲ آزمایش تداخل الکترومغناطیسی

یک مشکل رو به رشد در ارتباطات الکترونیکی تداخل الکترومغناطیسی^{۲۷} (EMI) است. همچنین در سالهای قبل به عنوان تداخل فرکانس رادیویی^{۲۸} (RFI) و تداخل تلویزیونی^{۲۹} (TVI) شناخته می‌شد، در حال حاضر EMI به عنوان هرگونه تداخل در یک دستگاه ارتباطی توسط هر وسیله الکترونیکی دیگری تعریف می‌شود. از آنجایی که همه مدارها و تجهیزات الکترونیکی نوعی EMI را ساطع می‌کنند، به طور بالقوه منابع تداخل با دستگاه‌های ارتباطی حساس مانند تلفن‌های همراه، تلفن‌های بی‌سیم، دستگاه‌های رادیویی و تلویزیونی، پیجراها و شبکه‌های محلی بی‌سیم هستند. با افزایش تعداد کامپیوترها و با استفاده بیشتر از تلفن‌های همراه و سایر دستگاه‌های بی‌سیم، مشکل EMI به یک مشکل بزرگ تبدیل شده است. مشکل به حدی است که FCC استانداردهای تداخلی را ایجاد کرده است که باید توسط همه دستگاه‌های الکترونیکی رعایت شود. قبل از اینکه هر تجهیزات الکترونیکی بفروش و مورد استفاده قرار گیرد، باید توسط FCC مورد آزمایش و تایید قرار گیرد تا اطمینان حاصل شود که تشعشعات بیش از حد مجاز منتشر نمی‌شود. چنین قوانین و مقررات سختگیرانه‌ای طراحی و ساخت را دشوارتر کرده و قیمت تمام شده محصولات الکترونیکی را افزایش داده است. اما نتیجه، مشکلات تداخل کمتر بین محصولات الکترونیکی و کاهش اختلال در استفاده از آنها بوده است.

امروزه بخش بزرگی از کار یک تکنسین یا مهندس ارتباطات، آزمایش EMI و به حداقل رساندن EMI در محصولات است. این بخش به طور خلاصه EMI، منابع آن، تکنیک‌های رایج برای کاهش EMI و روش‌های آزمایش EMI را توضیح می‌دهد.

منابع تداخل الکترومغناطیسی

هر فرستنده رادیویی منبع EMI است. اگرچه فرستنده‌ها به فرکانس یا باند خاصی اختصاص داده می‌شوند، اما به دلیل هارمونیک‌ها، محصولات درون مدولاسیون یا سیگنال‌های جعلی که تولید می‌کنند، می‌توانند تداخل ایجاد کنند.

گیرنده‌ها نیز منبع EMI هستند. یک نوسان‌ساز محلی یا سینتی‌سایزر فرکانس سیگنال‌های سطح پایینی تولید می‌کند که اگر به حداقل نرسد، می‌تواند با تجهیزات مجاور تداخل ایجاد کند.

^{۲۷}Electromagnetic Interference

^{۲۸}Radio Frequency Interference (RFI)

^{۲۹} TV Interference (TVI)

خوب است بدانید که:

نوسانگر محلی یک گیرنده می‌تواند منبع تداخل الکترومغناطیسی باشد.

تقریباً تمام دستگاه‌های الکترونیکی دیگر نیز می‌توانند EMI تولید کنند. شاید بدترین متخلفان کامپیووترها باشند. کامپیووترها حاوی میلیون‌ها مدار منطقی هستند که با نرخ‌های بیش از ۲ گیگاهرتز خاموش و روشن می‌شوند. به دلیل پالس‌های کوتاه با زمان‌های صعود و سقوط سریع که تولید می‌شوند، این مدارها به طور طبیعی تعداد زیادی هارمونیک تولید می‌کنند. مشکل به قدری شدید است که سازندگان کامپیووتر باید برخی از سخت‌ترین قوانین کاهش FCC EMI را رعایت کنند. سازندگان کامپیووتر از هر ترفندی کاهشی استفاده می‌کنند تا سطح تشعشع را به مشخصات FCC برسانند.

البته، هر تجهیزات الکترونیکی که از یک میکروکنترلر تعییه شده استفاده می‌کند، که امروزه تقریباً هر دستگاه الکترونیکی است، منبع بالقوه EMI است.

یکی دیگر از منابع اصلی EMI سوئیچینگ منابع تغذیه است. بیش از ۸۰ درصد از تمام منابع تغذیه مورد استفاده امروزه از نوع سوئیچینگ هستند و این درصد در حال افزایش است. منابع تغذیه‌ای که از تنظیم‌کننده‌های سوئیچینگ استفاده می‌کنند، سطوح بسیار بالایی از انرژی پالس تولید می‌کنند و هارمونیک‌های با دامنه بالا را ساطع می‌کنند. اینورترها (مبدل‌های dc به ac) در منابع تغذیه اضطراری (UPS) و مبدل‌های dc-to-dc نیز از روشن‌های سوئیچینگ استفاده و بنابراین هارمونیک و تشعشع تولید می‌کنند.

خط برق ۶۰ هرتز یکی دیگر از منابع تداخل است. پالس‌های گذرا الکتریکی ناشی از خاموش یا روشن شدن موتورهای پرقدرت و سایر تجهیزات می‌تواند عملکرد کامپیووتر را مختل کند یا نوعی نویز برای تجهیزات ارتباطی ایجاد کند. فقط سیم‌های مغناطیسی و الکتریکی بزرگ تولید شده توسط خطوط برق همه جا حاضر می‌تواند باعث هوم در تقویت‌کننده‌های استریو، نویز در تجهیزات حساس پزشکی و تداخل در گیرنده‌های ارتباطی شود.

شکل دیگری از EMI تخلیه الکترواستاتیک^{۳۰} (ESD) است. این تخلیه یک میدان الکتریکی ساکن بزرگ است. رعد و برق مثال کاملی است. پالس عظیم جریان تولید شده توسط رعد و برق، تعداد زیادی هارمونیک تولید می‌کند که به صورت نویز در گیرنده‌های رادیویی نشان داده می‌شود. هر جایی که تخلیه استاتیکی رخ می‌دهد می‌تواند ESD را تولید کند که نه تنها می‌تواند مدارهای مجتمع و ترانزیستورها را از بین ببرد بلکه می‌تواند پالس‌هایی ایجاد کند که خود را به صورت نویز در گیرنده نشان می‌دهد.

کاهش تداخل الکترومغناطیسی

سه روش اصلی برای کاهش سطح EMI عبارتند از: زمین، محافظ و فیلتر کردن. همه این روش‌ها در طراحی تجهیزات جدید و همچنین در کاهش EMI در برنامه‌هایی که تجهیزات از قبل مستقر شده‌اند، استفاده می‌شوند. در اینجا خلاصه‌ای کوتاه از تکنیک‌هایی که اغلب استفاده می‌شود آورده شده است.

زمین کردن : زمین الکتریکی ضعیف اغلب باعث EMI می‌شود. همانطور که می‌دانید، زمین نقطه مرجع مشترک برای اکثر، اگر نه همه، ولتاژهای یک مدار است. این زمین به اشکال مختلف فیزیکی

^{۳۰} Electrostatic Discharge (ESD)

ظاهر می‌شود. ممکن است یک شاسی یا قفسه فلزی، اسکلت فلزی یک ساختمان یا لوله‌های آب باشد. بهترین زمین، زمینی است که زمانی ایجاد می‌شود که یک میله مسی بلند به داخل زمین رانده شود. در داخل تجهیزات، زمین بر روی PCB هایی که قطعات روی آنها سوار شده‌اند، تشکیل می‌شود. زمین معمولاً یک نوار مسی پهن یا در برخی موارد یک صفحه زمین مسی پهن است که در یک طرف PCB تشکیل شده است.

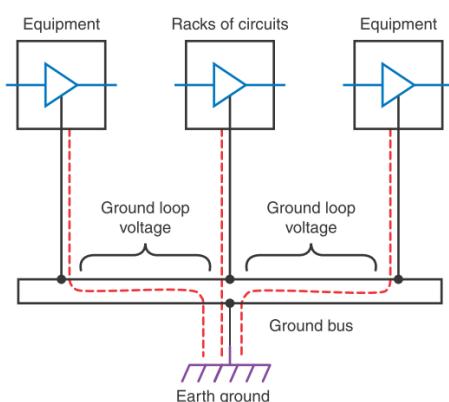
در طراحی تجهیزات، بهویژه مدارهای RF، زمین یک نکته کلیدی است. در شکل دهی، مسیریابی و اتصال به آن دقت زیادی می‌شود. اتصالات کوتاه، عریض و بسیار کم مقاومت بهترین هستند. در تجهیزاتی که هم از مدارهای آنالوگ (خطی) و هم از مدارهای دیجیتال استفاده می‌کنند، معمولاً برای هر نوع مدار، مسیرهای اتصال زمین جداگانه تشکیل می‌شود. این کمک می‌کند تا تداخل مدارهای آنالوگ حساس توسط مدارهای دیجیتالی نویز تر به حداقل برسد. البته دو سیستم زمین در نهایت به هم متصل می‌شوند، اما فقط در یک نقطه از تجهیزات.

زمین‌های مدار در تجهیزات سر جای خود هستند و قابل تغییر نیستند. اما ممکن است اتصالات زمین قطعات مختلف تجهیزات در یک سیستم باعث ایجاد نوعی EMI شود. بسیاری از اوقات، EMI را می‌توان با آزمایش ساده با ترتیبات مختلف زمین حذف یا تا حد زیادی کاهش داد. اینها چند دستورالعمل مفید هستند:

۱. اگر یک قطعه از تجهیزات زمین ندارد، یکی اضافه کنید. اتصال به یک زمین مشترک بزرگ ترجیح داده می‌شود، به خصوص اتصالی که به زمین متصل است.

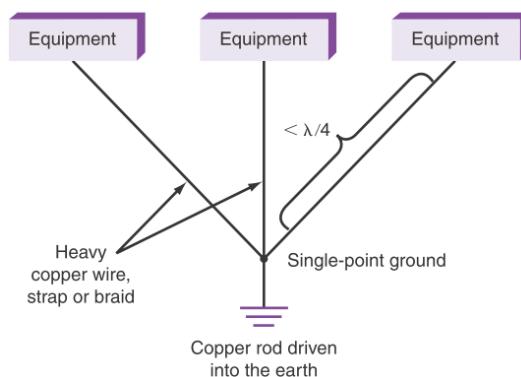
۲. اتصالات زمین همیشه باید تا حد امکان کوتاه نگه داشته شوند. سیم‌های زمین نباید بیشتر از $\frac{\lambda}{4}$ در بالاترین فرکانس عملیاتی باشند.

۳. کابل‌های زمین باید بزرگ و دارای مقاومت کم باشند. سیم مسی رشته‌ای با اندازه بزرگتر از AWG 10 ترجیح داده می‌شود. اگر زمین جریان زیادی داشته باشد، اندازه باید بیشتر باشد. قیطان مسی به پهنه‌ای عملی نیز اتصال زمین خوبی ایجاد می‌کند.



شکل ۳۰.۲۲: زمین‌ها اتصال کوتاه کاملی نیستند، به خصوص در فرکانس‌های بالا، جایی که اثر پوسته باعث افزایش مقاومت می‌شود و اجازه تشکیل حلقه‌های زمین را می‌دهد.

۴. اگر چندین قطعه از تجهیزات درگیر باشد و سیگنال‌ها از یک واحد به واحد دیگر منتقل شوند، ممکن است حلقه‌های زمین وجود داشته باشد. یک حلقه زمین زمانی تشکیل می‌شود که چندین مدار یا قطعات تجهیزات به یک زمین مشترک اما در نقاط مختلف متصل شوند. شکل (۳۰.۲۲). عبور جریان در اتصال زمین می‌تواند باعث افت ولتاژ در قسمتی از زمین شود. سپس این ولتاژ به صورت سری ظاهر می‌شود و سیگنال‌های بسیار کوچک در ورودی مدارها یا تجهیزات دیگر باعث تداخل می‌شوند. حلقه‌های زمین با اتصال تمام مدارها یا تجهیزات به یک نقطه از زمین مشترک حذف می‌شوند. شکل (۳۱.۲۲).



شکل ۳۱.۲۲: زمین‌های تک نقطه‌ای بهترین هستند زیرا تشکیل حلقه‌های زمین را به حداقل می‌رساند.

۵. EMI اغلب به دلیل اتصال نادرست شیلددهای کابل کواکسیال ایجاد می‌شود. قیطان محافظ ممکن است در یکی از رابطهای شکسته یا باز شود. در برخی کاربردها، به جای اتصال به دو سر کابل، تنها یک سر محافظ را به زمین متصل می‌کند، EMI را کاهش می‌دهد. این در مورد هر سیم محافظ نیز صادق است. آزمایش با محافظ کابل و زمین اغلب می‌تواند EMI را کاهش دهد.

۶. به یاد داشته باشید که تمام اتصالات برق ac دارای یک زمین مرتبط با آنها هستند. در اتصالات ac دو سیمه، سیم خنثی در نقطه ورودی جریان متناوب به زمین متصل می‌شود. در سیستم‌های سه سیم، سیم سوم نیز زمین است که عمدها برای اهداف ایمنی استفاده می‌شود. با این حال، عدم وجود زمین سوم نیز می‌تواند باعث تداخل شود. افزودن سیم زمین سوم اغلب مشکلات EMI را حل می‌کند.

محافظ (شیلدینگ) : شیلدینگ فرآیند احاطه مدارهای ساطع کننده EMI یا مدارهای گیرنده حساس با محافظه فلزی برای جلوگیری از تشعشع یا دریافت سیگنال است. اغلب، فقط قرار دادن یک صفحه فلزی بین مدارها یا قطعات تجهیزات برای جلوگیری از تشعشع برای کاهش یا حذف EMI کافی است. این فلز هرگونه سیگنال تشعشعی را منعکس می‌کند و در واقع می‌تواند بخشی از انرژی تابیده شده را جذب کند.

تقریباً تمام تجهیزات ارتباطی با استفاده گسترده از محافظ ساخته می‌شوند. اسیلاتورها و سینتی‌سایزرهای فرکانس تقریباً همیشه در یک قوطی یا محافظه محافظ بسته‌بندی می‌شوند. طبقات فرستنده یا گیرنده تکی اغلب با صفحات مسدود کننده یا محافظه‌های کاملاً اطراف آنها از یکدیگر

محافظت می‌شوند. منبع تغذیه سوئیچینگ همیشه در محفظه خود محافظت می‌شود. فقط به یاد داشته باشید که هنگام استفاده از محافظ، سوراخ‌های تهویه معمولاً برای آزاد کردن گرمای تولید شده توسط مدارهای محافظت شده ضروری هستند. این سوراخ‌ها باید تا حد امکان کوچک باشند. اگر قطر سوراخ‌ها نزدیک به $\lambda/2$ سیگنال‌های مورد استفاده باشد، سوراخ‌ها می‌توانند به عنوان آنتن شیاری عمل کنند و سیگنال‌ها را به طور مؤثرتری تابش کنند. طراحی اولیه خوب از این مشکل جلوگیری می‌کند.

در برخی موارد، سیگنال‌های RF از محفظه‌های محافظی که در آن پانل‌های فلزی مختلف به هم می‌رسند، نشت می‌کند. سپر پیوسته موثرترین است، اما بیشتر جعبه‌های محافظ باید یک یا دو پانل قابل جابجایی داشته باشند تا امکان مونتاژ و دسترسی به تعییر را فراهم کنند. اگر پانل‌ها به طور ایمن با یک کنتاکت با مقاومت کم تزویج نشوند، RF از دهانه نشت می‌کند. اتصال ایمن پانل‌ها با پیچ‌های متعدد و اطمینان از اینکه فلز کثیف یا اکسید نشده است، این مشکل را حل می‌کند. در غیر این صورت، مهر و موم‌های فلزی انعطاف‌پذیر ویژه‌ای برای اتصال به محفظه‌ها و پانل‌هایی که باید با یکدیگر تزویج شوند، طراحی شده‌اند. این مهر و موم نشت را از بین می‌برد.

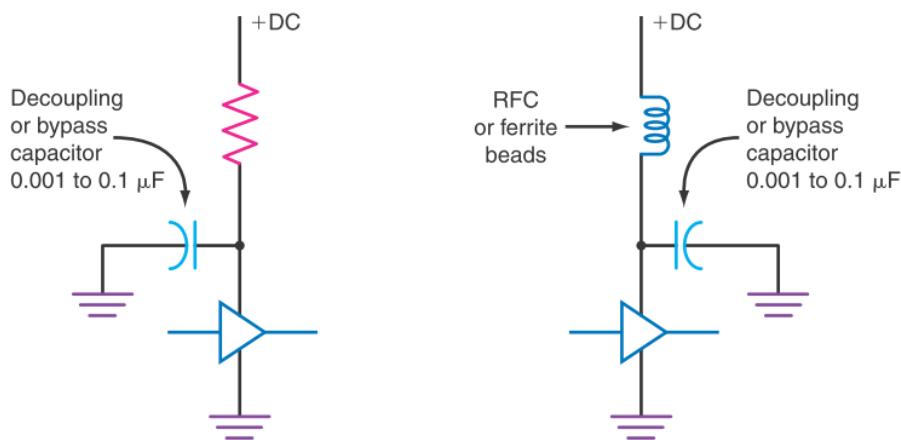
در نهایت، EMI تابشی را می‌توان در یک سیستم بزرگتر با حرکت دادن تجهیزات به اطراف کاهش داد. با قرار دادن واحدهای مختلف دورتر از هم، می‌توان مشکل را از بین برد یا حداقل آن را به حداقل رساند. به یاد داشته باشید که قدرت سیگنال تشعشعی با محدود فاصله بین مدارهای فرستنده و گیرنده متفاوت است. حتی کمی فاصله تنها چیزی است که ممکن است برای کاهش تداخل تا حد قابل قبولی لازم باشد.

فیلتر کردن : روش سوم کاهش EMI فیلتر کردن است. فیلترها به سیگنال‌های مورد نظر اجازه عبور می‌دهند و سیگنال‌های نامطلوب به میزان قابل توجیهی کاهش می‌دهد. فیلترها کمک چندانی به رفع مشکلات تشعشع یا تزویج سیگنال نمی‌کنند، اما آنها روشنی بسیار مؤثر برای مقابله با EMI هدایت شده هستند، تداخلی که از یک مدار یا قطعه‌ای از تجهیزات به وسیله هدایت فیزیکی واقعی از طریق کابل یا اتصال دیگر منتقل می‌شود. برخی از انواع فیلترهای مورد استفاده در کاهش EMI عبارتند از:

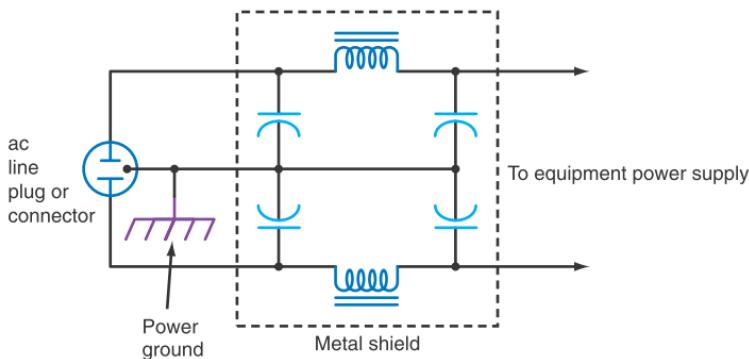
۱. مدارهای با پس و جداکننده یا اجزای مورد استفاده در خطوط منبع تغذیه dc داخل تجهیزات. مدارهای جداسازی معمولی در شکل (۳۲.۲۲) نشان داده شده است. به جای استفاده از یک سلف فیزیکی (معمولًاً به نام چوک فرکانس رادیویی^{۳۱} یا RFC) به صورت سری با خط dc، دانه‌های فربیت استوانه‌ای کوچکی را می‌توان روی یک هادی سیم قرار داد تا یک اندوکتانس کوچک ایجاد کند. این مهره‌ها به طور گسترده در تجهیزات با فرکانس بالا استفاده می‌شود. خازن‌های با پس باید امپدانس بسیار پایینی داشته باشند، حتی برای سیگنال‌های RF. یعنی باید از خازن‌های سرامیکی یا میکا استفاده کرد. هر خازن پلاستیکی دی‌الکتریک یا الکتروولیتی که برای جداسازی استفاده می‌شود باید با سرامیک یا میکائی موادی همراه باشد تا فیلتر در فرکانس‌های بالاتر مؤثر باشد.

۲. فیلترهای بالا یا پایین گذر مورد استفاده در ورودی و خروجی تجهیزات. یک مثال رایج فیلتر پایین گذر است که در خروجی اکثر فرستنده‌ها برای کاهش هارمونیک در خروجی قرار می‌گیرد.

^{۳۱} Radio Frequency Choke, (RFC)



شکل ۳۲.۲۲: فیلترهای بالا یا پایین گذر مورد استفاده در ورودی و خروجی تجهیزات. یک مثال رایج فیلتر پایین گذر است که در خروجی اکثر فرستنده‌ها برای کاهش هارمونیک در خروجی قرار می‌گیرد.

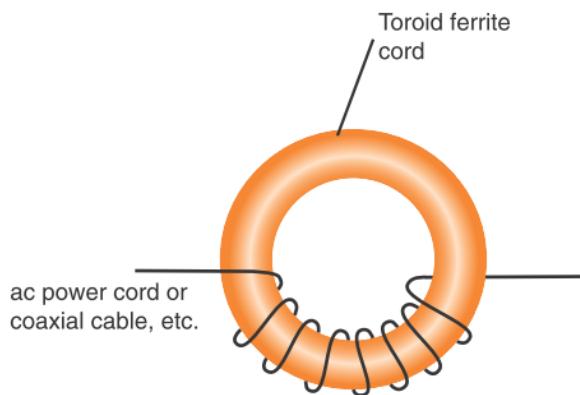


شکل ۳۳.۲۲: فیلتر خط برق جریان متناوب به دو صورت کار می‌کند و سیگنال‌های فرکانس بالا در ورودی و خروجی حذف می‌کند.

۳. فیلترهای خطوط برق ac اینها فیلترهای پایین گذر هستند که در ورودی ac به منبع تغذیه تجهیزات قرار می‌گیرند تا هر گونه اجزای فرکانس بالا را که ممکن است به تجهیزات متصل به خط برق مشترک عبور یا خارج شود، حذف کنند. شکل (۳۳.۲۲) یک فیلتر معمولی خط برق ac را نشان می‌دهد که اکنون تقریباً در همه انواع تجهیزات الکترونیکی، به ویژه کامپیوترها و هر تجهیزاتی با استفاده از تقویت کننده‌های حساس با بهره بالا (پیشکی، صدای استریو، تجهیزات اندازه‌گیری صنعتی، گیرندهای ارتباطی و غیره) تعبیه شده است.

۴. فیلتر روی کابل‌ها. همانطور که در شکل (۳۴.۲۲) نشان داده شده است، با پیچاندن چندین دور کابل به دور یک هسته حلقوی، سیگنال‌های تداخلی تولید شده توسط کوپلینگ القابی یا خازنی را می‌توان کاهش داد. هر سیگنال حالت مشترک ^{۲۲} ولتاژهایی را به هسته القاء می‌کند، جایی که

^{۲۲}Common Mode Signal



شکل ۳۴.۲۲: یک هسته حلقوی سیگنال‌های حالت مشترک دریافت شده توسط تابش یا از طریق تزویج خازنی یا القابی را حذف می‌کند.

آنها حذف می‌شوند. این روش روی سیم‌های برق متناوب یا هر کابل حامل سیگنال کار می‌کند.

اندازه‌گیری تداخل الکترومغناطیسی

قوانين و مقررات مربوط به EMI در کد مقررات فدرال، عنوان ۴۷، بخش‌های ۱۵ و ۱۸ آمده است. هر کسی که در زمینه ارتباطات کار می‌کند باید کپی‌هایی از کد داشته باشد که می‌تواند از دفتر چاپ دولتی دریافت شود. اساساً این دستورالعمل‌ها حداکثر سطوح قدرت سیگنال مجاز برای انواع خاصی از تجهیزات را بیان می‌کنند. سطوح پذیرفته شده تابش بسته به نوع تجهیزات، محیطی که در آن استفاده می‌شود و محدوده فرکانس به طور قابل توجهی متفاوت است. FCC همچنین بین رادیاتورهای عمدى مانند شبکه‌های محلی بی‌سیم و سایر واحدهای بی‌سیم و رادیاتورهای غیرعمدى مانند کامپیوترها تمایز قائل می‌شود.

خوب است بدانید که:

تشعشع با دستگاه سنجش شدت میدان بر حسب واحد میکروولت بر متر ($\mu V/m$) اندازه‌گیری می‌شود.

تشعشع با یک میدان سنج اندازه‌گیری می‌شود. ممکن است یک دستگاه ساده، همانطور که قبل از این فصل توضیح داده شد، یا یک گیرنده ارتباط پهن باند حساس با یک آنتن مدرج باشد. در هر صورت، واحد اندازه‌گیری میکروولت بر متر ($\mu V/m$) است. این مقدار سیگنال دریافتی است که توسط آنتنی به طول یک متر در فاصله مشخصی دریافت می‌شود.

مقررات FCC را برای کامپیوتر در نظر بگیرید. EMI هدایت شده نباید از محدوده فرکانس 450 کیلوهرتز تا 30 مگاهرتز در خط برق ac تجاوز کند. انتشار تشعشعی ممکن است از یک سطح شدت میدان مشخص در یک فاصله معین برای محدوده فرکانس مشخص تجاوز نکند. فاصله اندازه‌گیری 3



ماژول‌های دو پورت PXI VNA Keysight در یک ایستگاه آزمایشی، ویژگی‌های قدرتمند دستگاه را بدون افزایش ارتفاع یا ردپای سیستم امکان‌پذیر می‌سازد.

یا 1° فوت است. در 1° فوت شدت سیگنال دریافتی نباید بیشتر از مقادیر زیر باشد

- $100 \mu V/m$ و $88 MHz$
- $150 \mu V/m$ و $88 MHz$
- $200 \mu V/m$ و $96 MHz$
- $500 \mu V/m$ بیش از 96°

چندین تولیدکننده سیستم‌های آزمایشی کامل EMI را می‌سازند که اندازه‌گیری شدت میدان پیشرفته یا گیرنده‌های ویژه با آنتن‌های همسان است که برای «درک کردن» EMI استفاده می‌شوند. برخی از واحدها دارای پروب‌های جانبی القایی یا خازنی هستند که برای دریافت میدان‌های مغناطیسی یا الکتریکی تابشی از تجهیزات طراحی شده‌اند. این کاوشگرها برای یافتن نشت تشعشع در محافظه‌های محافظ، اتصالات یا کابل‌ها خوب هستند. آنتن‌ها جهت‌دار هستند به‌طوری که می‌توان آنها را در اطراف یک منطقه یا یک قطعه اسکن کرد تا منبع تشعشع و فرکانس آن را مشخص کند. هنگامی که ماهیت تابش مشخص شد، می‌توان مراحل زمین، محافظ یا فیلتر کردن را برای از بین بردن آن انجام داد.

سؤالات:

۱. مهمترین مشخصات ولت‌متر ac برای اندازه‌گیری ولتاژ فرکانس رادیویی چیست؟
۲. اسیلوسکوپ دیجیتالی چیست؟ بخش‌های اصلی یک DSO را نام ببرید و نحوه عملکرد آنها را توضیح دهید.
۳. چه نوع مقاومت‌هایی باید در یک بار ساختگی استفاده شود؟
۴. دو نوع متداول سنجش SWR را نام ببرید.

۵. دو مدار رایج اندازه‌گیری توان را نام ببرید.
۶. نشان دهید که چگونه می‌توان SWR را از اندازه‌گیری‌های توان تعیین کرد.
۷. نام ژنراتور همه کارهای که امواج سینوسی، مربعی و مثلثی ایجاد می‌کند چیست؟
۸. سطح خروجی یک ژنراتور RF چگونه کنترل می‌شود؟
۹. امپدانس خروجی معمولی یک ژنراتور RF چیست؟
۱۰. هنگام اتصال وسایل اندازه‌گیری به تجهیزات مورد آزمایش چه احتیاط ایی را باید رعایت کنید و چه دستورالعمل‌هایی را باید رعایت کنید؟ چرا باید اجازه دهید یک ژنراتور RF قبل از استفاده از آن گرم شود؟
۱۱. ژنراتور روبشی چیست و چگونه کار می‌کند؟
۱۲. دو کاربرد برای یک مولد روبشی نام ببرید.
۱۳. خروجی مدار مورد آزمایش با ژنراتور روبشی چگونه شناسایی و نمایش داده می‌شود؟
۱۴. شش بخش اصلی یک فرکانس شمار را نام ببرید.
۱۵. نحوه عملکرد یک سیگنال ژنراتور برداری را توضیح دهید.
۱۶. تحلیلگر شبکه چیست؟ چگونه استفاده می‌شود؟
۱۷. در خروجی یک آنالایزر طیف چه چیزی نمایش داده می‌شود؟ توضیح دهید.
۱۸. عملکرد میدان سنج را بیان کنید. مدارش چیه؟
۱۹. چهار آزمایش متداول فرستنده را نام ببرید.
۲۰. تحلیلگر سیگنال برداری چیست؟ دو خروجی رایج را نام ببرید.
۲۱. چه نوع ابزار آزمایشی برای تشخیص وجود هارمونیک‌ها و تشعشuat کاذب از فرستنده بهتر است؟
۲۲. به طور کلی، در کارکرد عادی نباید از چه سطحی از SWR تجاوز کرد؟
۲۳. SINAD به چه معناست؟
۲۴. آزمایش انسداد گیرنده چه چیزی را مشخص می‌کند؟
۲۵. آزمایش رهگیری مرتبه سوم در گیرنده چه چیزی را اندازه‌گیری می‌کند؟
۲۶. الگوی چشم چه چیزی را نشان می‌دهد؟
۲۷. "چشم بسته" معمولاً در مورد محیط یا مدار مورد آزمایش چه چیزی را نشان می‌دهد؟
۲۸. توضیح دهید که چگونه یک جریان بیت باینری بیش از حد نویز در یک نمودار چشمی ظاهر می‌شود.

۲۹. برای آزمایش نرخ خطای بیت از چه نوع ابزاری استفاده می‌شود؟
۳۰. فرآیند اساسی آزمایش نرخ خطای بیت را شرح دهید.
۳۱. تحلیلگر پروتکل چیست؟ چگونه نتایج خود را نشان می‌دهد؟
۳۲. احتمال خرابی چه نوع قطعاتی در تجهیزات ارتباطی بیشتر است؟
۳۳. قبل از شروع هرگونه عیب‌یابی، ابتدا چه مدارهایی باید آزمایش شوند؟
۳۴. علاوه بر تجهیزات آزمایش مناسب، قبل از اقدام به سرویس یا عیب‌یابی هر نوع تجهیزات ارتباطی چه چیزهایی باید در دسترس داشته باشید؟
۳۵. دو راه که ممکن است آنتن معیوب باشد را نام ببرید.
۳۶. دو نوع اساسی روش عیب‌یابی مورد استفاده در تجهیزات ارتباطی را نام ببرید. کدام یک بیشتر در گیرنده‌ها استفاده می‌شود؟ فرستنده‌ها؟
۳۷. برای انجام دو روش عیب‌یابی ارائه شده در بالا به چه ابزار آزمایشی نیاز است؟
۳۸. چهار اندازه‌گیری که اغلب در سیستم‌های فیبر نوری انجام می‌شود را نام ببرید.
۳۹. جیتر در چه نوع تجهیزاتی و در چه محدوده فرکانسی مشکل دارد؟
۴۰. جیتر چیست؟
۴۱. واحد رایج برای اندازه‌گیری جیتر چیست؟
۴۲. چرا آی‌سی‌های مقیاس بزرگ با تزریق سیگنال و ردیابی آزمایش می‌شوند؟
۴۳. نام مدار داخلی تعبیه شده در بسیاری از آی‌سی‌های مقیاس بزرگ برای اهداف آزمایشی چیست؟
۴۴. داده‌های آزمایش توسط چه مداری وارد یا قابل دسترسی است؟
۴۵. چگونه داده‌ها با مدارهای آزمایش داخلی وارد و نظارت می‌شوند؟
۴۶. چه چیزی عملکرد مدارهای آزمایش را کنترل می‌کند؟
۴۷. استاندارد این روش آزمایش را نام ببرید.
۴۸. EMI را تعریف کنید.
۴۹. چه کسی کنترل EMI را اجباری می‌کند؟
۵۰. گیرنده‌ها چگونه می‌توانند منبع EMI باشند؟
۵۱. چگونه یک منبع تغذیه می‌تواند منبع EMI باشد؟
۵۲. نقش خط برق ac ۶۰ هرتز در EMI را توضیح دهید.

۵۳. سه راه انتقال EMI را نام ببرید.
۵۴. رایج‌ترین منبع EMI چیست؟
۵۵. سه تکنیک مورد استفاده برای کاهش EMI را فهرست کنید.
۵۶. زمین در PCB چیست؟
۵۷. بهترین نوع زمین چیست؟
۵۸. حلقه زمین چیست؟ چه چیزی باعث آن می‌شود؟
۵۹. مشکلات حلقه زمین چگونه برطرف می‌شوند؟
۶۰. الزامات هادی برای یک زمین خوب را بیان کنید.
۶۱. چگونه محافظت (شیلدینگ) EMI را به حداقل می‌رساند؟
۶۲. برای جلوگیری از نشت تشعشع از یک شیلد چه باید کرد؟
۶۳. تاثیر مدارهای جداکننده منبع تغذیه بر EMI چیست؟
۶۴. چه چیزی را می‌توان به جای RFC در مدار جداسازی استفاده کرد؟
۶۵. توضیح دهید که فیلترهای خطوط برق ac چه کار می‌کنند.
۶۶. هسته حلقوی به طور موثر با چه نوع تداخلی برخورد می‌کند؟
۶۷. قوانین و مقررات EMI را در کجا می‌توان یافت؟
۶۸. دو نوع تجهیزات آزمایش تشعشع EMI را نام ببرید.
۶۹. واحد اندازه‌گیری پایه برای EMI تابشی چیست؟ چه مفهومی دارد؟
۷۰. چه اجزایی در یک سیستم آزمایش EMI به شما امکان می‌دهد منبع تشعشع را مشخص کنید؟

مسائل:

۱. نظریه عملکرد یک مولد شکل موج دلخواه را توضیح دهید. محدودیت اصلی آن چیست؟
۲. عملکرد یک تحلیلگر طیف سوپرہتروداین را توضیح دهید. چه چیزی وضوح آنالایزر را تعیین می‌کند؟
۳. آزمایش نویز بر روی گیرنده انجام می‌شود. نویز کجا اندازه‌گیری می‌شود؟ فاصله بین دو خط افقی در صفحه اسیلوپ $2/3$ تقسیم است. کالیبراسیون حساسیت عمودی 20 میلی ولت در هر تقسیم است. سطح نویز چقدر است؟ (از روشی که در متن توضیح داده شده است استفاده کنید).
۴. در شکل (۲۸.۲۲)، خروجی میکسر دوم وجود ندارد. چه قطعاتی به احتمال زیاد معیوب هستند؟

۵. یک فرستنده رادیویی کوچک ۵ وات توان مستقیم اما ۱ وات توان معکوس تولید می‌کند. SWR چقدر است؟

مسائل چالش برانگیز:

۱. دو مزیت DSO‌ها نسبت به اسیلوسکوپ‌های آنالوگ را بیان کنید.

۲. اگر SWR خیلی زیاد باشد چگونه می‌توان پایین آورد؟

۳. یک تلفن همراه دستی به ارزش تقریبی ۲۰۰ دلار، قیمت خرده‌فروشی مصرف‌کننده است. هنگامی که خدمات تلفن همراه برای اولین بار آغاز شد، رایگان دریافت شد. این کار نمی‌کند. تماس با فروشنده نشان می‌دهد که این مدل قابل تعمیر است، اما نرخ کار ۱۰۰ دلار در ساعت است و اکثر تعمیرات به حداقل ۲ ساعت برای تعمیر نیاز دارد. هزینه قطعات اضافی است. آیا باید تلفن را تعمیر کنید یا باید یک تلفن جدید بخرید؟ دلایل خود را برای تصمیم‌گیری که می‌گیرید بیان کنید.

۴. سه مثال از نحوه تولید EMI و تجهیزات الکترونیکی که ممکن است با آنها تداخل داشته باشد را لوازم خانگی ارائه دهید.

۵. احتمال تداخل رادیوهای CB، رادیوهای خانواده FM و تجهیزات رادیویی آماتور با سایر تجهیزات الکترونیکی خانگی را بیان کنید.

۶. آیا سیستم JTAG می‌تواند مدارهای آنالوگ/RF را آزمایش کند؟

كتاب نامه

- [1] D.J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, (Pearson, San Francisco, 2008)
- [2] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, New York, 1999)
- [3] B. Mahon, How Maxwell's equations came to light. Nat. Photonics 9, 2–4 (2015)
- [4] L. Mandel, E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge University Press,Cambridge, 1995)
- [5] B. Richards, E. Wolf, Electromagnetic simulation in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A 253, 358 (1959)
- [6] L. Novotny, B. Hecht, *Principles of Nano-Optics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2012)
- [7] J. Dongarra, F. Sullivan, Guest editors introduction to the top 10 algorithms. Comput. Sci. Eng. 2, 22 (2000)
- [8] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, Numerical Recipes in C++:*The Art of Scientific Computing*, 2nd edn. (Cambridge University Press, Cambridge, 2002)
- [9] P.H. Jones, O.M. Marago, G. Volpe, Optical Tweezers (Cambridge University Press, Cambridge, 2015)
- [10] A. Gennerich (ed.), *Optical Tweezers* (Springer, Berlin, 2017)
- [11] O.M. Marago, P.H. Jones, P.G. Gucciardi, G. Volpe, A.C. Ferrari, Optical trapping and manipulation of nanostructures. Nat. Nanotechnol. 8, 807 (2013)
- [12] S. Chu, Nobel lecture: the manipulation of neutral particles. Rev. Mod. Phys. 70, 685–706 (1998)

- [13] F.M. Fazal, S.M. Block, Optical tweezers study life under tension. *Nat. Photonics* 5, 318 (2011)
- [14] R.N.C. Pfeifer, T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop, Colloquium: momentum of an electromagnetic wave in dielectric media. *Rev. Mod. Phys.* 79, 1197–1216 (2007)
- [15] S.M. Barnett, Resolution of the Abraham-Minkowski dilemma. *Phys. Rev. Lett.* 104, 070401 (2010)
- [16] A.M. Yao, M.J. Padgett, Orbital angular momentum: origins, behavior, and applications. *Adv.Optics Photonics* 3, 161–204 (2011)
- [17] M.J. Padgett, Orbital angular momentum 25 years on. *Opt. Express* 25, 11265 (2017)
- [18] K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander, Simultaneous trapping of low-index and high-index nanoparticles observed with an optical-vortex trap. *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 533 (1999)
- [19] L. Challis, F. Sheard, The Green of the Green functions. *Phy. Today* 41 (2003)
- [20] W.C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media* (IEEE Press, Piscataway, 1995)
- [21] J.A. Stratton, L.J. Chu, Diffraction theory of electromagnetic waves. *Phys. Rev.* 56, 99–107 (1939)
- [22] E. Abbe, Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. *Archiv Mikroskop Anat.* 9, 413 (1873)
- [23] B. Hecht, B. Sick, U.P. Wild, V. Deckert, R. Zenobi, O.J.F. Martin, D.W. Pohl, Scanning nearfield optical microscopy with aperture probes: fundamentals and applications. *J. Chem. Phys.* 112, 7761 (2000)
- [24] M.A. Paesler, P.J. Moyer, *Near-Field Optics: Theory, Instrumentation, and Applications* (Wiley, New York, 1996)
- [25] H.A. Bethe, Theory of diffraction by small holes. *Phys. Rev.* 66, 163 (1944)
- [26] C.J. Bouwkamp, On Bethe's theory of diffraction by small holes. *Philips Res. Rep.* 5, 321 (1950)
- [27] H.F. Hess, E. Betzig, T.D. Harris, L.N. Pfeiffer, K.W. West, Near-field spectroscopy of the quantum constituents of a luminescent system. *Science* 264, 1740 (1994)

- [28] E. Betzig, G.H. Patterson, R. Sougrat, O.W. Lindwasser, S. Olenych, J.S. Bonifacino, M.W. Davidson, J. Lippincott-Schwartz, H.F. Hess, Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution. *Science*313, 1642–1645 (2006)
- [29] M.J. Rust, M. Bates, X. Zhuang, Sub diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM). *Nat. Methods*3, 793–796 (2006)
- [30] S.W. Hell, J. Wichmann, Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy. *Op. Lett.*19, 780–782 (1994)
- [31] P. Tinnefeld, C. Eggeling, S.W. Hell (eds.), *Far-Field Optical Nanoscopy* (Springer, Berlin, 2015)
- [32] R.E. Thompson, D.R. Larson, W.W. Webb, Precise nanometer localization analysis for individual fluorescent probes. *Biophys. J.*82, 2775–2783 (2002)
- [33] F. Göttfert, C.A. Wurm, V. Mueller, S. Berning, V.C. Cordes, A. Honigmann, S.W. Hell, Coaligned dual-channel STED nanoscopy and molecular diffusion analysis at 20 nm resolution. *Biophys. J.*105, L01–L03 (2013)
- [34] P.B. Johnson, R.W. Christy, Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B*6, 4370 (1972)
- [35] E.D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*(Academic, San Diego, 1985)
- [36] N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, *Solid State Physics*(Saunders, Fort Worth, 1976)
- [37] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim, The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.*81, 109 (2009)
- [38] F.J. Garcia de Abajo, Graphene plasmonics: challenges and opportunities. *ACS Photonics*1, 135 (2014)
- [39] B. Wunsch, T. Stauber, F. Sols, F. Guinea, Dynamical polarization of graphene at finite doping. *New J. Phys.*8, 318 (2006)
- [40] E.H. Hwang, S. Das Sarma, Dielectric function, screening, and plasmons in 2d graphene. *Phys. Rev. B*75, 205418 (2007)
- [41] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, Magnetism from conductors, and enhanced non-linear phenomena. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*47, 2075 (1999)

- [42] C.M. Soukoulis, M. Wegener, Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials. *Nat. Photonics* 5, 523 (2011)
- [43] R.J. Potton, Reciprocity in optics. *Rep. Prog. Phys.* 67, 717 (2004)
- [44] H. Atwater, The promise of plasmonics. *Sci. Am.* 296(4), 56 (2007)
- [45] J. Heber, News feature: surfing the wave. *Nature* 461, 720 (2009)
- [46] A. Otto, Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection. *Z. Phys.* 216(4), 398–410 (1968)
- [47] E. Kretschmann, Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen. *Z. Phys.* 241, 313 (1971)
- [48] T.W. Ebbesen, H.J. Lezec, H.F. Ghaemi, T. Thio, P.A. Wolff, Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature* 391, 667–669 (1998)
- [49] S. Xiao, X. Zhu, B.-H. Li, N.A. Mortensen, Graphene-plasmon polaritons: from fundamental properties to potential applications. *Front. Phys.* 11, 117801 (2016).
- [50] J. Chen, M. Badioli, P. Alonso-Gonzalez, S. Thongrattanasiri, F. Huth, J. Osmond, M. Spasenovic, A. Centeno, A. Pesquera, P. Godignon, A. Z. Elorza, N. Camara, F.J. Garcia de Abajo, R. Hillenbrand, F. Koppens, Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons. *Nature* 487, 77 (2012)
- [51] Z. Fei, A.S. Rodin, G.O. Andreev, W. Bao, A.S. McLeod, M. Wagner, L.M. Zhang, Z. Zhao, G. Dominguez M. Thiemens, M.M. Fogler, A.H. Castro Neto, C.N. Lau, F. Keilmann, D.N. Basov, Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging. *Nature* 487, 82 (2012)
- [52] M.A. Cooper, Optical biosensors in drug discovery. *Nat. Rev. Drug Discov.* 1, 515 (2002)
- [53] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov. Phys. Uspekhi* 56, 509 (1964)
- [54] J.B. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)
- [55] K.Y. Bliokh, Y.P. Bliokh, V. Freilikher, S. Savel'ev, F. Nori, Colloquium: unusual resonators: plasmonics, metamaterials, and random media. *Rev. Mod. Phys.* 80, 1201–1213 (2008)

- [56] J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith, Controlling electromagnetic fields. *Science* 312, 1780 (2006)
- [57] U. Leonhardt, Optical conformal mapping. *Science* 312, 1777 (2006)
- [58] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr, D.R. Smith, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science* 314, 977 (2006)
- [59] N. Fang, H. Lee, C. Sun, X. Zhang, Subdiffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science* 308, 534 (2005)
- [60] C.F. Bohren, D.R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light* (Wiley, New York, 1983)
- [61] F.J. García de Abajo, J. Aizpurua, Numerical simulation of electron energy loss near inhomogeneous dielectrics. *Phys. Rev. B* 56, 15873 (1997)
- [62] G. Boudarham, M. Kociak, Modal decompositions of the local electromagnetic density of states and spatially resolved electron energy loss probability in terms of geometric modes. *Phys. Rev. B* 85, 245447 (2012)
- [63] F.-P. Schmidt, H. Ditlbacher, U. Hohenester, A. Hohenau, F. Hofer, J.R. Krenn, Dark plasmonic breathing modes in silver nanodisks. *Nano Lett.* 12, 5780 (2012)
- [64] M.I. Stockman, Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future. *Opt. Express* 19, 22029 (2011)
- [65] I.D. Mayergoyz, D.R. Fredkin, Z. Zhang, Electrostatic (plasmon) resonances in nanoparticles. *Phys. Rev. B* 72, 155412 (2005)
- [66] P. Zijlstra, P.M. Paulo, M. Orrit, Optical detection of single non-absorbing molecules using the surface plasmon resonance of a gold nanorod. *Nat. Nanotechnol.* 7, 379 (2012)
- [67] J. Becker, A. Trügler, A. Jakab, U. Hohenester, C. Sönnichsen, The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing. *Plasmonics* 5, 161 (2010)
- [68] E. Prodan, C. Radloff, N.J. Halas, P. Nordlander, Hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures. *Science* 302, 419 (2003)
- [69] A. Aubry, D. Yuan Lei, A.I. Fernandez-Dominguez, Y. Sonnefraud, S.A. Maier, J.B. Pendry, Plasmonic light-harvesting devices over the whole visible spectrum. *Nano Lett.* 10, 2574 (2010)

- [70] R.C. McPhedran, W.T. Perrins, Electrostatic and optical resonances of cylinder pairs. *Appl. Phys.* 24, 311 (1981)
- [71] A. Aubry, D. Yuan Lei, S.A. Maier, J.B. Pendry, Conformal transformation applied to plasmonics beyond the quasistatic limit. *Phys. Rev. B* 82, 205109 (2010)
- [72] D.Y. Lei, A. Aubry, S.A. Maier, J.B. Pendry, Broadband nano-focusing of light using kissing nanowires. *New. J. Phys.* 12, 093030 (2010)
- [73] W. Zhu, R. Esteban, A.G. Borisov, J.J. Baumberg, P. Nordlander, H.J. Lezec, J. Aizpurua, K.B. Crozier, Quantum mechanical effects in plasmonic structures with subnanometre gaps. *Nat. Commun.* 7, 11495 (2016)
- [74] G. Mie, Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Ann. Phys.* 330, 377 (1908) 654 References
- [75] Y. Chang, R. Harrington, A surface formulation for characteristic modes of material bodies. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 25(6), 789–795 (1977)
- [76] A.J. Poggio, E.K. Miller, Chapter 4: integral equation solutions of three-dimensional scattering problems, in *Computer Techniques for Electromagnetics*, ed. by R. Mittra. International Series of Monographs in Electrical Engineering (Pergamon, 1973), pp. 159–264
- [77] T.K. Wu, L.L. Tsai, Scattering from arbitrarily-shaped lossy dielectric bodies of revolution. *Radio Sci.* 12(5), 709–718 (1977)
- [78] P.T. Leung, S.Y. Liu, K. Young, Completeness and orthogonality of quasinormal modes in leaky optical cavities. *Phys. Rev. A* 49, 3057 (1994)
- [79] C. Sauvan, J.P. Hugonin, I.S. Maksymov, P. Lalanne, Theory of the spontaneous optical emission of nanosize photonic and plasmon resonators. *Phys. Rev. Lett.* 110, 237401 (2013)
- [80] F. Ouyang, M. Isaacson, Surface plasmon excitation of objects with arbitrary shape and dielectric constant. *Philos. Mag. B* 60, 481 (1989)
- [81] J. Petersen, J. Volz, A. Rauschenbeutel, Chiral nanophotonic waveguide interface based on spin-orbit interaction of light. *Science* 346, 67 (2014)
- [82] E.M. Purcell, H.C. Torry, R.V. Pound, Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. *Phys. Rev.* 69, 37 (1946)

- [83] R. Carminati, J.J. Greffet, C. Henkel, J.M. Vigoureux, Radiative and non-radiative decay of a single molecule close to a metallic nanoparticle. Opt. Commun. 216, 368 (2006)
- [84] P. Anger, P. Bharadwaj, L. Novotny, Enhancement and quenching of single-molecule fluorescence. Phys. Rev. Lett. 96, 113002 (2006)
- [85] A. Hörl, G. Haberfehlner, A. Trügler, F. Schmidt, U. Hohenester, G. Kothleitner, Tomographic reconstruction of the photonic environment of plasmonic nanoparticles. Nat. Commun. 8, 37 (2017)
- [86] K. Joulain, R. Carminati, J.-P. Mulet, J.-J. Greffet, Definition and measurement of the local density of electromagnetic states close to an interface. Phys. Rev. B 68, 245405 (2003)
- [87] K.H. Drexhage, Influence of a dielectric interface on fluorescence decay time. J. Lumin. 12, 693 (1970)
- [88] R.R. Chance, A. Prock, R. Silbey, *Molecular Fluorescence and Energy Transfer Near Interface*, vol. 37 (Wiley, New York, 1978).
- [89] E.C. Le Ru, P.G. Etchegoin, *Principles of Surface Enhanced Raman Spectroscopy* (Elsevier, Amsterdam, 2009)
- [90] S. Nie, S.R. Emory, Probing single molecules and single nanoparticles by surface enhanced raman scattering. Science 275, 1102 (1997)
- [91] M. Fleischmann, P.J. Hendra, A.J. McQuillan, Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode. Chem. Phys. Lett. 26, 163 (1974)
- [92] K. Kneipp, M. Moskovits, M. Kneipp (eds.), *Surface Enhanced Raman Scattering* (Springer, Berlin, 2008)
- [93] T. Förster, Energiewanderung und Fluoreszenz. Naturwissenschaften 33, 166 (1946)
- [94] P. Andrew, W.L. Barnes, Energy transfer across a metal film mediated by surface plasmon polaritons. Science 306, 1002 (2004)
- [95] J.I. Gersten, A. Nitzan, Accelerated energy transfer between molecules near a solid particle. Chem. Phys. Lett. 104, 31 (1984)
- [96] C. Cherqui, N. Thakkar, G. Li, J.P. Camden, D.J. Masiello, Characterizing localized surface plasmons using electron energy-loss spectroscopy. Annu. Rev. Phys. Chem. 67, 331 (2015)

- [97] C.J. Powell, J.B. Swan, Origin of the characteristic electron energy losses in aluminum. *Phys. Rev.* 115, 869 (1959)
- [98] M. Bosman, V.J. Keast, M. Watanabe, A.I. Maaroof, M.B. Cortie, Mapping surface plasmons at the nanometre scale with an electron beam. *Nanotechnology* 18, 165505 (2007)
- [99] J. Nelayah, M. Kociak, O. Stephan, F.J. García de Abajo, M. Tence, L. Henrard, D. Taverna, I. Pastoriza-Santos, L. M. Liz-Martin, C. Colliex, Mapping surface plasmons on a single metallic nanoparticle. *Nat. Phys.* 3, 348 (2007)
- [100] F.J. García de Abajo, Optical excitations in electron microscopy. *Rev. Mod. Phys.* 82, 209 (2010) References 655
- [101] C. Colliex, M. Kociak, O. Stephan, Electron energy loss spectroscopy imaging of surface plasmons at the nanoscale. *Ultramicroscopy* 162, A1 (2016)
- [102] U.S. Inan, R.A. Marshall, *Numerical Electromagnetics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2011)
- [103] A. Taflove, S.C. Hagness, *Computational electrodynamics* (Artech House, Boston, 2005)
- [104] K.S. Yee, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 14, 302 (1966)
- [105] A. Taflove, M.E. Browdin, Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 23, 623 (1975)
- [106] A. Taflove, M.E. Browdin, Computation of the electromagnetic fields and induced temperatures within a model of the microwave-irradiated human eye. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 23, 888 (1975)
- [107] J. Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Comput. Phys.* 114, 185 (1994)
- [108] R. Fuchs, S.H. Liu, Sum rule for the polarizability of small particles. *Phys. Rev. B* 14, 5521 (1976)
- [109] F.J. García de Abajo, A. Howie, Retarded field calculation of electron energy loss in inhomogeneous dielectrics. *Phys. Rev. B* 65, 115418 (2002)

- [110] U. Hohenester, A. Trügler, MNPBEM—a Matlab Toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles. *Comp. Phys. Commun.* 183, 370 (2012)
- [111] A.M. Kern, O.J.F. Martin, Surface integral formulation for 3D simulations of plasmonic and high permittivity nanostructures. *J. Opt. Soc. Am. A* 26, 732 (2009)
- [112] P. Arcioni, M. Bressan, L. Perregrini, On the evaluation of the double surface integrals arising in the application of the boundary integral method to 3d problems. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 45, 436 (1997)
- [113] D.J. Taylor, Accurate and efficient numerical integration of weakly singulars integrals in Galerkin EFIE solutions. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 51, 2543 (2003)
- [114] S. Sarraf, E. Lopez, G. Rios Rodriguez, J. D'Elia, Validation of a Galerkin technique on a boundary integral equation for creeping flow around a torus. *Comp. Appl. Math.* 33, 63 (2014)
- [115] J.S. Hesthaven, T. Warburton, High-order/spectral methods on unstructured grids I. timedomain solution of Maxwell's equations. *J. Comput. Phys.* 181, 186 (2002)
- [116] J.S. Hesthaven, High-order accurate methods in time-domain computational electromagnetics: a review. *Adv. Imaging Electron Phys.* 127, 59–123 (2003)
- [117] J.C. Nedelec, Mixed finite elements in R3. *Numer. Math.* 35, 315 (1980)
- [118] K. Busch, M. König, J. Niegemann, Discontinuous Galerkin method in nanophotonics. *Laser Photonics Rev.* 5, 773–809 (2011)
- [119] M. Paulus, P. Gay-Balmaz, O.J.F. Martin, Accurate and efficient computation of the Green's tensor for stratified media. *Phys. Rev. E* 62, 5797 (2000)
- [120] J.J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics* (Addison, Reading, 1994)
- [121] Y.S. Kim, P.T. Leung, T.F. George, Classical decay rates for molecules in the presence of a spherical surface: A complete treatment. *Surf. Sci.* 195, 1 (1988)
- [122] J. Gersten, A. Nitzan, Radiative properties of solvated molecules in dielectric clusters and small particles. *J. Chem. Phys.* 95, 686 (1991)

نمايه

- دیودهای ساطع کننده نور، ۹۶۰
روزنه عددی، ۹۴۷
زاویه بحرانی، ۹۴۶
سرویس جهانی مخابرات سیار، ۱۰۲۱
سیستم جهانی ارتباطات سیار، ۱۰۱۴
شبکه شخصی، ۱۰۶۵
شبکه نوری غیرفعال، ۹۸۳
شبکه‌های شخصی کوتاه برد، ۱۰۳۶
شناسایی فرکانس رادیویی، ۱۰۷۸

فبری-پرو، ۹۶۲
فتودیود، ۹۶۸
فتودیود بهمنی، ۹۷۰
فضای سفید تلویزیون، ۱۰۸۸
 فوق العاده پهن‌باند، ۱۰۸۴

فیبر تک مودی، ۹۵۲
فیبر ناخالص شده با اربیوم، ۹۷۹
فیبر نوری، ۹۴۵
ماشین به ماشین، ۱۰۸۸
مالتی پلکس تقسیم طول موج، ۹۸۰
مدولاتور الکترو جذبی، ۹۶۷
مدولاتور ماخ زندر، ۹۶۷
مدولاتورهای الکتروپتیکال، ۹۶۷
مولد سیگنال برداری، ۱۱۱۳
نایکوئیست، ۱۰۱۴
نرخ خطای بیت، ۱۱۳۸
نسل پنجم، ۱۰۳۶
نقطه به نقطه، ۱۰۷۱
همدوس(منسجم)، ۹۴۰
واحد شبکه نوری، ۹۸۵

اتحادیه بین المللی مخابرات، ۹۸۱
اثر پلتیر، ۹۶۴
اثر پوکل، ۹۶۷
ارتباطات میدان نزدیک، ۱۰۸۳
اعکاس داخلی کامل، ۹۴۶
ایستگاههای پایه، ۱۰۳۹
اینترنت اشیا، ۱۰۸۸
بار ساختگی، ۱۱۰۳
باز خورد توزیع شده، ۹۶۳
بودجه توان، ۹۷۶
تبدیل فوریه سریع، ۱۰۲۸، ۱۱۱۱
تحلیلگر سیگنال برداری، ۱۱۱۴
تحلیلیه الکترواستاتیک، ۱۱۴۹
داخل الکترومغناطیسی، ۱۱۴۸، ۱۰۹۸
داخل بین نمادی، ۱۱۳۶، ۱۰۲۹
داخل تلویزیونی، ۱۱۴۸
داخل فرکانس رادیویی، ۱۱۴۸
توری موجبر آرایه‌ای، ۹۸۱
تمام طولانی مدت، ۱۰۱۲
جبران پاشندگی الکترونیکی، ۹۷۲، ۹۵۲
جدب، ۹۵۵
حلقه قفل فاز، ۱۱۲۱
درایور لیزر، ۹۷۳
درهم‌سازی، ۱۰۲۸
دسترسی چندگانه با تقسیم کد، ۱۰۰۵
دسترسی چندگانه تقسیم زمانی، ۱۰۰۵
دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس، ۱۰۰۵
دوبلکس کردن تقسیم زمان، ۱۰۰۹
دوبلکس کردن تقسیم فرکانس، ۱۰۰۹
دیود لیزر تزریقی، ۹۶۲

- واحد ضرب کننده ساعت، ۹۷۳
 وای فای؛ وفاداری بی سیم، ۱۰۵۴
 وکودر، ۱۰۱۴
 پاسخ ضربه محدود، ۹۵۳
 پاشندگی، ۹۵۰، ۹۵۵
 پاشندگی مود قطبش، ۹۵۲
 پایانه شبکه نوری، ۹۸۵
 پراکنندگی، ۹۵۵
 پهنهای باند مودی موثر، ۹۵۴
 پیام کوتاه(پیامک)، ۱۰۱۹
 پیشوند چرخه‌ای، ۱۰۲۹
- چند نرخی تطبیقی، ۱۰۳۲
 چند ورودی چند خروجی، ۱۰۲۹
 چوک فرکانس رادیویی، ۱۱۵۲
 چیرپ، ۹۶۷
 کدهای والش، ۱۰۱۶
 کلیدزنی تغییر دامنه، ۹۴۱
 کلیدهای روشن خاموش، ۹۴۱
 کولار، ۹۴۹