فصل ۳

مدولاسیون موج پیوسته (آنالوگ) و انواع آنها

هدف کلی

شناخت مفاهیم مدولاسیون و علل استفادهٔ آن در فرستنده‌های رادیویی

کل زمان اختصاص داده شده به فصل: ۹ ساعت آموزشی

هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل از فراگیرنده انتظار می‌رود که: **زمان پیشنهادی**

۱ــ سیگنال صوتی را شرح دهد..... ۱۰′

۲ــ نحوهٔ انتشار صوت را در هوا توضیح دهد ..... ۱۰′

۳ــ سرعت صوت را توضیح دهد ..... ۵′

۴ــ دلایل استفاده از تقویت کننده را برای انتقال صوت به فواصل دور تشریح کند..... ۱۰′

۵ــ دلایل استفاده نکردن از آمپلی‌فایر و بلندگو را برای انتقال صوت به فواصل خیلی دور (بین دو شهر) شرح دهد. ..... ۱۰′

۶ ــ دلایل استفاده نکردن از روش انتشار صوت به صورت امواج الکترومغناطیس از آنتن را، تشریح کند ..... ۱۵′

۷ــ دلایل استفاده از مدولاسیون را شرح دهد ..... ۲۰′

۸ــ مشخصات سیگنال پیام و سیگنال حامل یا کاریر را با ذکر فرمول آن تشریح کند ..... ۲۰′

۹ــ نحوهٔ انجام عمل مدولاسیون را به‌طور عمومی و کلی تشریح کند ۱۰′

۱۰ــ مدولاسیون را تعریف کند..... ۱۰′

۱۱ــ مدولاسیون AM، FM و PM را تعریف کند و شکل موج آنها را ترسیم کند..... ۴۰′

۱۲ــ معادلهٔ موج AM را بنویسد و مشخصات آن را تشریح کند ... ۲۰′

۱۳ــ شاخص مدولاسیون را در حالات مختلف محاسبه و نتایج آن را بررسی کند..... ۲۰′

۱۴ــ سیگنال‌های با مدولاسیون کمتر از صددرصد، صددرصد و بیشتر از صددرصد را با یکدیگر مقایسه کند..... ۲۰′

۱۵ــ روش محاسبهٔ درصد مدولاسیون را شرح دهد..... ۱۵′

۱۶ــ طیف فرکانسی سیگنال AM را با سیگنال ساده مقایسه کند.... ۱۰′

۱۷ــ طیف فرکانسی AM را در حوزهٔ فرکانس ترسیم کند..... ۱۰′

۱۸ــ طیف فرکانسی سیگنال AM را با استفاده از سیگنال مربعی و سیگنال صوتی شرح دهد. ..... ۱۵′

۱۹ــ فرکانس‌های کناری بالا و پایین را شرح دهد..... ۱۵′

۲۰ــ انواع روش‌های ارسال در مدولاسیون AM (VSB-ISB-SSB-DSB) را شرح دهد ..... ۱۵′

۲۱ــ توان در سیگنال AM را شرح دهد..... ۱۰′

۲۲ــ توان در سیگنال AM را در انواع روش‌های ارسال مقایسه کند.. ۱۰′

۲۳ــ پهنای باند سیگنال AM را شرح دهد و انواع آن را محاسبه کند.. ۱۵′

۲۴ــ باند کناری بالا و پایین را توضیح دهد..... ۱۰′

۲۵ــ محدودهٔ فرکانس رادیویی AM تجاری را توضیح دهد..... ۱۰′

۲۶ــ باند محافظ guard band را شرح دهد ..... ۱۰′

۲۷ــ تعداد ایستگاه‌های رادیویی را، که در یک باند فرکانسی AM تجاری جای می‌گیرد، بدون باند محافظ و با باند محافظ محاسبه کند. .... ۱۵′

۲۸ــ از نرم‌افزارها و فیلم‌های مرتبط برای درک بهتر مفاهیم استفاده کند.

۲۹ــ در فرایند اجرای آموزش متناسب با شرایط و محتوا، به آزمون‌های تکوینی، تشخیصی و پایانی پاسخ دهد ..... ۲۵′

۳۰ــ هدف‌های رفتاری در حیطهٔ عاطفی که در فصل اول آمده است را در این فصل نیز رعایت کند .....

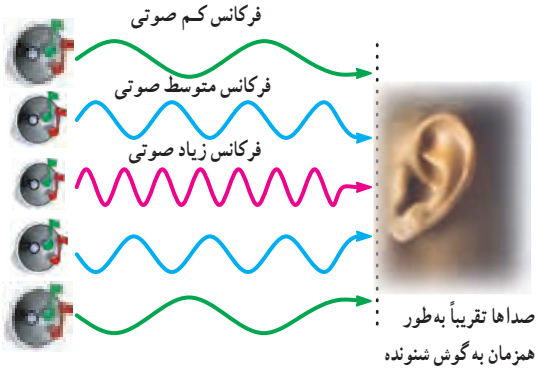
پیشگفتار

همان‌طورکه در فصل اول تشریح شد، برای انتشار صوت به فواصل دور نیاز به شرایط و امکانات ویژه‌ای است. در این فصل به بررسی ماهیت صوت و نحوهٔ انتقال آن به فواصل دور می‌پردازیم. سیگنال حامل، انواع مدولاسیون‌ها،ضریب مدولاسیون، علل استفاده از مدولاسیون، طیف فرکانسی سیگنال AM و پهنای باند سیگنال AM از جمله مباحثی است که مورد بررسی اجمالی قرار خواهند گرفت.

۱ـ۳ـ سیگنال صوتی و نحوهٔ انتقال آن

یکی از مهم‌ترین موج‌هایی که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم امواج صوتی است. از طریق این موج‌ها با هم گفت‌وگو می‌کنیم، یا با به صدا درآوردن بوق اتومبیل، به عابری که از خیابان عبور می‌کند، هشدار می‌دهیم.

امواج صوتی در محدودهٔ فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز قرار دارند. شکل ۱ـ۳ امواج صوتی با فرکانس‌های کم و متوسط و زیاد را نشان می‌دهد که گوش قادر به شنیدن این امواج است.

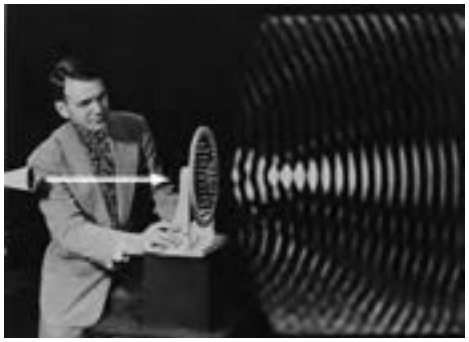


شکل ۱ـ۳ـ امواج صوتی با فرکانس‌های مختلف

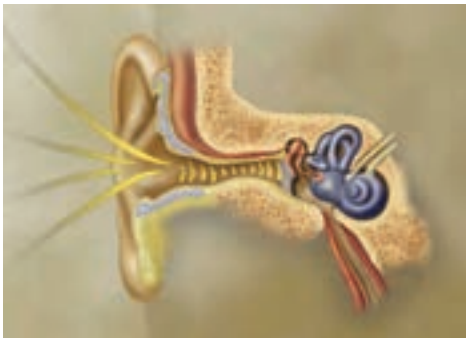
برای انتشار امواج صوتی نیاز به محیطی مادّی مانند هوا داریم. در واقع امواج صوتی ارتعاشات مکانیکی‌اند. این ارتعاشات از طریق ارتعاش ملکول‌های هوا از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل می‌شوند.

نوسان‌های ملکول‌های هوا از طریق حفرهٔ گوش به پردهٔ گوش برخورد می‌کند و صدا شنیده می‌شود. هر قدر شدت صوت بیشتر باشد ارتعاشات قوی‌تر و صدا بلندتر است.

شکل ۲ـ۳ نحوهٔ انتشار صوت را در هوا و شکل ۳ـ۳ نحوهٔ پخش امواج صوتی و برخورد ملکول‌های هوا را به پردهٔ گوش نشان می‌دهد.



شکل ۲ـ۳ـ نحوهٔ انتشار صوت در هوا



شکل ۳ـ۳ـ نحوهٔ برخورد ملکول‌های هوا به پردهٔ گوش انسان

نکتهٔ مهم

توجه داشته باشید که فشردگی ملکول‌های هوا یا باز شدن آنها از یکدیگر سبب انتقال ارتعاشات صوتی به گوش و شنیدن صدا می‌شود. لذا تعیین جهت مثبت یا منفی (نیم سیکل مثبت یا منفی مثلاً یک موج سینوسی) برای فشردگی و باز شدگی فرضی بوده و اثری روی میزان شنوایی ندارد. یعنی بازشدگی یا فشردگی حاصل از یک سیگنال سینوسی یک کیلو هرتزی اثر مشابهی روی گوش انسان می‌گذارد.

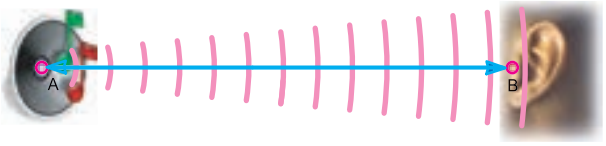
۲ـ۳ـ سرعت صوت

سرعت انتشار امواج در یک محیط به ویژگی‌های محیط انتشار موج بستگی دارد. سرعت صوت نیز به ویژگی‌های فیزیکی محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود وابسته است. صوت علاوه بر گازها در مایعات و جامدات نیز منتشر می‌شود. سرعت صوت درهوا در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد ۳۴۳ متر بر ثانیه و در هوای صفر درجه سانتی‌گراد ۳۳۱ متر بر ثانیه است. سرعت صوت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد ۱۴۹۸ متر برثانیه و در آهن ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه است. در جدول ۱ــ۳ سرعت صوت در هوا و سایر اجسام را مشاهده می‌کنید.

جدول ۱ــ۳ــ سرعت صوت در اجسام مختلف

واحد	سرعت صوت	محیط انتشار صوت
m/sec	۳۳۱	هوای صفر درجه سانتی‌گراد
m/sec	۳۴۳	هوا در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد
m/sec	۱۴۹۸	آب در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد
m/sec	۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰	آهن

اگر سرعت حرکت صوت در هوا را حدود ۳۴۰ متر بر ثانیه در نظر بگیریم، چنان‌چه صوتی در نقطهٔ A تولید شود، پس از یک ثانیه در فاصلهٔ ۳۴۰ متری شنیده می‌شود. در شکل ۴ــ۳ نحوهٔ انتشار صوت در هوا نشان داده شده است.



شکل ۴ــ۳ــ نحوهٔ انتشار صوت در هوا

انتشار صوت در هوا را می‌توان به انتشار امواج در آب تشبیه کرد.

شکل ۵ ــ۳ انتشار امواج را در آب نشان می‌دهد.

طول موج برای امواج صوتی از رابطهٔ $\lambda = \frac{V}{F}$ به‌دست می‌آید. در این رابطه V سرعت سیر صوت است که در هوا حدود ۳۴۰ متر در ثانیه درنظر گرفته می‌شود. F فرکانس صوت برحسب هرتز است.

شکل ۵ــ۳ــ انتشار امواج در آب

مثال ۱ـ۳

برای کمترین و بیشترین فرکانس صوتی (AF) طول موج را محاسبه کنید.

برای کمترین فرکانس صوتی

$$\lambda_1 = \frac{V}{F_1} = \frac{۳۴۰ m/sec}{۲۰ HZ} = ۱۷m$$

برای بیشترین فرکانس صوتی

$$\lambda_2 = \frac{V}{F_2} = \frac{۳۴۰ m/sec}{۲۰/۰۰۰ Hz} = ۱۷mm$$

۳ـ۳ـ انتقال صوت به فواصل دور توسط سیم یا کابل

فیزیولوژی حنجرهٔ انسان به گونه‌ای است که نمی‌تواند دامنه حاصل از تارهای صوتی را از حد معیّنی افزایش دهد. این محدودیت باعث می‌شود که برای انتقال صوت به فواصل دور (حدوداً تا ۵۰۰ متری) از دستگاه‌های تقویت‌کننده (آمپلی فایر) استفاده کنند. برای انتقال صوت از دستگاه آمپلی فایر به بلندگو به خط انتقال نیاز داریم. خط انتقالی که برای این منظور به کار می‌رود سیم یا کابل است (شکل ۶ــ۳). استفاده از سیم یا کابل برای انتقال صوت به فواصل دور موجب افت ولتاژ و توان در مسیر می‌شود. از طرف دیگر به دلایل متعدد کاربرد این سیستم مقرون به صرفه نیست و در پاره‌ای از موارد ناممکن است. بدین ترتیب، در صورتی که پیام موردنظر یک سیگنال صوتی باشد نمی‌توان آن را به فواصل خیلی دور (بین دو شهر) منتقل کرد زیرا :

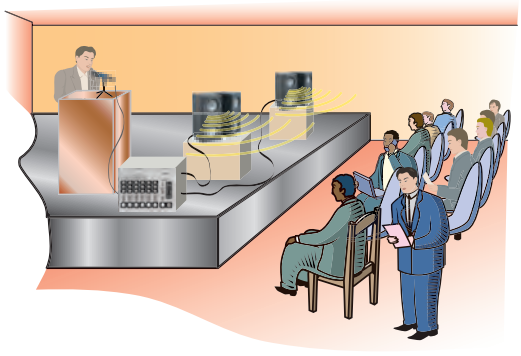
الف ــ تلفات توان و افت ولتاژ زیاد می‌شود.

ب ــ به سبب طولانی بودن کابل، سیستم آسیب‌پذیرتر می‌شود.

ج ــ هزینهٔ نصب و راه‌اندازی، تعمیرات و نگهداری آن زیاد است.

د ــ چون پیام پس از انتقال به وسیلهٔ بلندگو پخش می‌شود برای همه قابل استفاده است و نمی‌تواند محرمانه باشد.

در ضمن اگر صوت به صورت مستقیم در فضا پخش شود موجب آزار مردم می‌شود و آلودگی صوتی را به‌وجود می‌آورد.



شکل ۶ــ۳ــ انتشار صوت از طریق دستگاه تقویت‌کننده، کابل و بلندگو برای فواصل دور

۴ـ۳ـ الگوی پرسش

تشریحی :

۱ــ در صورتی که فرکانس صوت برابر با ۶ کیلوهرتز باشد طول موج آن را حساب کنید.

۲ــ امواج صوتی به چه صورت به گوش انسان می‌رسد؟ شرح دهید.

۳ــ چه عاملی سبب می‌شود صدا را بلندتر بشنویم؟

۴ ــ سرعت صوت تقریباً چه قدر است؟

۵ــ به چه دلیل برای انتقال صوت به فواصل دور باید از آمپلی فایر استفاده کرد؟

۶ ــ چند مثال برای محاسبهٔ طول موج صداهایی با فرکانس مختلف طراحی و آن را حل کنید.

۷ــ چرا نمی‌توان برای انتقال صوت به فواصل خیلی دور (بین دو شهر) از آمپلی فایر و بلندگو استفاده کرد؟ شرح دهید.

صحیح یا غلط

۸ــ صوت برای انتشار به محیط مادی نیاز دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

چهار گزینه‌ای

۹ ــ طول موج صوت با سرعت ۳۴۰ m/sec و فرکانس ۸/۵KHZ چند سانتی‌متر است؟

۱) ۴ ۲) ۴۰

۳) ۰/۴ ۴) ۰/۰۰۴

۵ ـ۳ـ انتقال سیگنال صوتی به فواصل دور توسط امواج الکترومغناطیسی

به نظر می‌رسد که ساده‌ترین روش برای انتقال سیگنال‌های صوتی به فواصل دور تبدیل آن به امواج الکترومغناطیس و انتشار آن از طریق آنتن باشد.

در صورتی که بتوانیم امواج صوتی را مانند شکل ۷ــ۳ به امواج الکترومغناطیسی تبدیل کنیم و آن را در فضا انتشار دهیم، به دلایل زیر امکان انتقال صوت به مسافت‌های دور به صورت امواج الکترومغناطیسی امکان‌پذیر نیست.

شکل ۷ــ۳ــ تبدیل امواج صوتی به امواج الکترومغناطیسی

خوب گوش دادن یک هنر است، سعی کنید خوب گوش دهید تا مطالب درسی را به آسانی یاد بگیرید.

الف ــ فرکانس امواج صوتی کم و طول موج آنها بسیار زیاد است، بنابراین پس از تبدیل این امواج به امواج الکترومغناطیسی، انتشار آنها از آنتن بسیار سخت و تقریباً غیرممکن است. مثال ۲ــ۳ بیان‌گر این مسئله است.

ب ــ درصورتی که انتشار امواج صوتی از آنتن ممکن باشد، برای انتشار نیاز به آنتن بسیار بلند است.

در مثال ۲ــ۳ طول آنتن $\frac{\lambda}{۴}$ برای امواج صوتی الکترومغناطیسی در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز محاسبه شده است.

مثال ۲ـ۳

در صورتی که بخواهیم سیگنال صوتی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز را با استفاده از آنتن $\frac{\lambda}{۴}$ منتشر کنیم، طول آنتن چه قدر می‌شود؟

پاسخ:

امواج الکترومغناطیسی که از آنتن $\frac{\lambda}{۴}$ پخش می‌شوند دارای سرعت سیری حدوداً برابر با سرعت نورند. بنابراین از رابطهٔ $\lambda = \frac{C}{F}$ استفاده می‌کنیم.

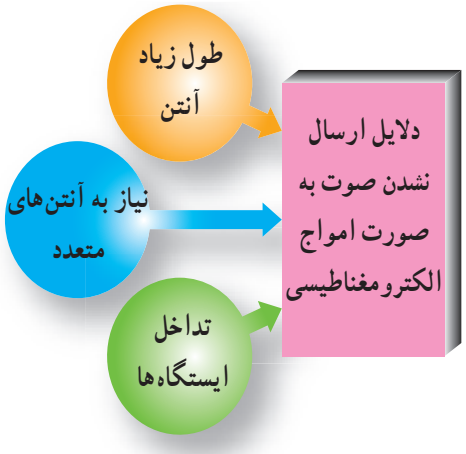
$$\text{طول موج} = \lambda = \frac{C}{F} = \frac{۳۰۰۰۰۰\text{km/s}}{۲۰۰۰۰\text{Hz}} = ۱۵\text{km} = ۱۵۰۰۰\text{m}$$

$$\text{طول آنتن} = La = \frac{\lambda}{۴} = \frac{۱۵۰۰۰}{۴} = ۳۷۵۰ \text{ متر}$$

مهار کردن و نگهداری آنتنی به بلندی ۳۷۵۰ متر تقریباً ناممکن است.

ج ــ با فرض این‌که بتوان آنتن بلند را مورد استفاده قرار داد، به دلیل این که صوت، ترکیبی از فرکانس‌های مختلف است، نیاز به آنتن‌های متعدد با طول‌های متفاوت دارد. مثلاً برای فرکانس ۲۰ کیلوهرتز نیاز به آنتنی به طول ۳۷۵۰ متر و برای فرکانس ۲۰ هرتز نیاز به آنتنی به بلندی ۳۷۵۰ کیلومتر است.

د ــ در صورتی که نیاز به آنتن‌های متعدد را نیز بپذیریم، در هر منطقه بیش از یک ایستگاه رادیویی نمی‌توانیم داشته باشیم. چرا که به دلیل مشابهت طیف فرکانسی صوت انسان‌ها با یکدیگر، تداخل به وجود می‌آید و صداها با هم مخلوط می‌شود. در شکل ۸ــ۳ موارد بالا به طور خلاصه و با تصویر نشان داده شده است.



شکل ۸ــ۳ــ موانع مربوط به انتشار صوت به وسیلهٔ امواج الکترومغناطیسی

پس با توجه به موارد بالا نتیجه می‌گیریم که هرگز نمی‌توان سیگنال صوتی را به‌طور مستقیم در فضا انتشار داد. پس چه باید کرد؟ چگونه اوّلین پیام انسانی را که صداست به فواصل دور منتقل کنیم؟

آیا هرگز فکر کرده‌اید که اگر انسان بخواهد فاصله بین تهران تا مشهد را پیاده طی کند چه مدت طول می‌کشد؟ با یک محاسبهٔ ساده اگر سرعت راه رفتن را ۵ کیلومتر در ساعت و فاصله تهران تا مشهد را ۹۶۰ کیلومتر در نظر بگیریم زمان موردنیاز برابر است با :

$$\text{زمان مسافرت با پای پیاده} = \frac{\text{فاصله}}{\text{سرعت}}$$

$$= \frac{۹۶۰\text{Km}}{۵\text{Km/H}} = ۱۹۲ \text{ ساعت} = \text{شبانه روز } ۸$$

حال اگر این فاصله را با اتومبیل طی کنیم و سرعت متوسط اتومبیل ۶۰ کیلومتر در ساعت باشد زمان موردنیاز برابر خواهد شد با :

$$\text{زمان مسافرت با اتومبیل} = \frac{\text{فاصله}}{\text{سرعت}} = \frac{۹۶۰\text{Km}}{۶۰\text{Km/H}} = ۱۶ \text{ ساعت}$$

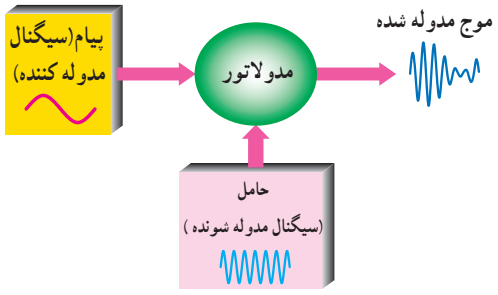
در صورتی که فاصلهٔ مزبور را با هواپیمایی طی کنیم که سرعت آن ۶۰۰ کیلومتر در ساعت باشد، در حدود ۱/۵ ساعت طول می‌کشد تا به مقصد برسیم. مشاهده می‌شود که سرعت وسیلهٔ نقلیّه زمان جابه‌جایی را کم می‌کند. بنابراین، انتخاب وسیلهٔ نقلیّه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اگر وسیلهٔ نقلیه را امواج الکترومغناطیسی در نظر بگیریم، با

توجه به این که سرعت امواج الکترومغناطیسی حدوداً برابر با سرعت نور است، زمان طی شده توسط این امواج به فاصلهٔ دور مثلاً ۹۶۰ کیلومتر، بسیار کوتاه خواهد شد.

$$\text{زمان طی شده توسط امواج الکترومغناطیسی} = \frac{\text{فاصله}}{\text{سرعت}} = \frac{۹۶۰\text{km}}{۳۰۰۰۰۰\text{km/sec}} = ۳۲۰۰\mu\text{s}$$

پس اگر سیگنال صوتی را روی سیگنال دیگری که به‌عنوان وسیلهٔ نقلیه استفاده می‌شود سوار کنیم و به‌صورت امواج الکترومغناطیسی در فضا پخش کنیم اشکالات مربوط به ارسال مستقیم برطرف می‌شود. به این عمل در اصطلاح عمومی مدولاسیون (Modulation) می‌گویند. سیگنال پیام را سیگنال مدوله کننده (Modulating signal) می‌گویند. سیگنالی که پیام روی آن سوار می‌شود سیگنال حامل، (کاریر carrier) یا سیگنال مدوله شونده (Modulation signal) نام دارد. به مدار یا دستگاهی که این عمل را انجام می‌دهد، مدولاتور (Modulator) می‌گویند. شکل ۹ـ۳ نحوهٔ انجام مدولاسیون را به‌صورت بلوکی نشان می‌دهد.



شکل ۹ـ۳ـ بلوک دیاگرام نحوهٔ انجام مدولاسیون

۶ـ۳ـ الگوی پرسش

تشریحی :

۱ـ چرا امواج صوتی را مستقیماً نمی‌توان به امواج الکترومغناطیسی تبدیل کرد؟

۲ـ در صورتی که انتشار امواج صوتی از آنتن به صورت مستقیم میسر باشد، به چه دلیل نیاز به آنتن‌های متعدد داریم؟

محاسباتی :

۳ـ اگر صوت به صورت امواج الکترومغناطیس در فضا انتشار یابد مسافت ۶۰۰km را در چه مدتی طی می‌کند؟

۴ـ در صورتی که فرکانس تُن صوتی برابر با ۳ کیلوهرتز باشد طول آنتن $\frac{\lambda}{۴}$ برای انتشار آن چه‌قدر است؟

کامل کردنی :

۵ ـ سرعت امواج الکترومغناطیس حدود..... متر بر ..... است.

۶ ـ سیگنال مدوله کننده سیگنال ..... و سیگنال مدوله‌شونده سیگنال ..... است.

چهارگزینه‌ای

۷ـ صوت با سرعت $۳۴۰\text{m/}_{\text{sec}}$ مسافت ۱۳۶۰ متر را در چند ثانیه طی می‌کند؟

۱) ۱ ۲) ۲ ۳) ۳ ۴) ۴

مخترعین

لی‌دوفارست Lee De Farest در سال ۱۸۷۳ در آمریکا به دنیا آمد، او در طول زندگی خود که ۸۷ سال طول کشید، بیش از ۳۰۰ مورد اختراع داشته که یکی از آنها لامپ تریود خلأ است. همچنین او مخترع اولین گیرنده رادیویی است. این دانشمند در سال ۱۹۶۱ چشم از جهان فرو بست.

لی‌دوفارست

برای کسب اطلاعات بیشتر به سایت دانشمندان مراجعه کنید.

یک نمونه گیرنده

نمونه‌ای از گیرنده‌های اولیهٔ رادیویی

دو نمونه گیرنده رادیویی ساخته شده توسط دوفارست

۳ـ۷ـ مزایای استفاده از سیگنال RF به عنوان حامل

در قسمت‌های قبل گفتیم که به دلایل متعدد امکان انتشار سیگنال صوتی به طور مستقیم از آنتن وجود ندارد. حال می‌خواهیم ببینیم آیا استفاده از سیگنال RF مشکلات را حل می‌کند؟

الف ــ اشاره شد که به علت کم بودن فرکانس امواج صوتی نیاز به آنتن‌های طویل است؛ در صورتی که به دلیل بالا بودن فرکانس‌های RF طول آنتن کم می‌شود.

مثال ۳ـ۳

در صورتی که فرکانس حامل برابر با ۱۰۰ مگاهرتز باشد، طول آنتن $\frac{\lambda}{۴}$ را به‌دست آورید.

پاسخ

$$\lambda = \frac{C}{F} = \frac{۳۰۰۰۰۰۰\times ۱۰^{۳}\, m/s}{۱۰۰\times ۱۰^{۶}\, HZ} = ۳ \quad \text{متر}$$

$$La = \frac{\lambda}{۴} = \frac{۳}{۴} = ۰/۷۵m = ۷۵ \quad \text{سانتی‌متر}$$

مثال ۳ـ۳ را با مثال ۲ـ۳ مقایسه کنید. در مثال ۲ـ۳ برای انتشار مستقیم سیگنال صوتی نیاز به آنتنی به طول ۳۷۵۰ متر است؛ در صورتی که با استفاده از سیگنال RF به‌عنوان حامل، طول آنتن به ۷۵ سانتی‌متر کاهش یافته است.

ب ــ احتیاج داشتن به آنتن‌های متعدد نیز یکی از مشکلات انتشار مستقیم سیگنال صوتی بود، که درصورت استفاده از سیگنال RF این مسئله نیز برطرف می‌شود، با توجه به این که پیام سوار سیگنال RF می‌شود و سیگنال RF به عنوان وسیلهٔ نقلیه عمل می‌کند و به صورت امواج الکترومغناطیس ارسال می‌شود. در این حالت طول آنتن کاهش می‌یابد، زیرا طول آنتن دقیقاً با طول موج سیگنال RF مرتبط است.

ج ــ تداخل ایستگاه‌های رادیویی مشکل دیگری بود که در انتشار سیگنال صوتی به صورت مستقیم به‌وجود می‌آمد. انتخاب سیگنال‌های حامل متفاوت در محدودهٔ RF مشکل تداخل را نیز از بین می‌برد، زیرا به علت زیاد بودن فرکانس RF می‌توان توسط فیلترهای مناسب فرکانس‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد. در جدول ۲ــ۳ مزایای استفاده از سیگنال RF به عنوان حامل، در مقایسه با انتشار مستقیم پیام آمده است.

جدول ۲ــ۳ــ مزایای استفاده از سیگنال RF به عنوان حامل

انتشار مستقیم	انتشار با استفاده از سیگنال RF
۱ــ به سبب کم بودن فرکانس سیگنال صوتی نیاز به آنتن طویل است.	۱ــ به سبب زیاد بودن فرکانس، طول آنتن به‌شدت کاهش می‌یابد.
۲ــ به علت تعدد فرکانس‌های صوتی و وسیع بودن محدوده فرکانسی صوتی به آنتن‌های متعدد نیاز است.	۲ــ استفاده از سیگنال RF به عنوان عامل اصلی انتشار، وابستگی طول آنتن به فرکانس‌های صوتی را از بین می‌برد.
۳ــ به سبب مشابه بودن باند فرکانس صوتی نمی‌توان بیش از یک ایستگاه رادیویی در منطقه داشت.	۳ــ با استفاده از سیگنال‌های حامل متفاوت می‌توان چندین ایستگاه رادیویی را در یک منطقه دایر کرد.

خلاقیت
بسازید و جایزه بگیرید

با استفاده از دورریزها و وسایل معمولی موجود در خانه، دستگاهی بسازید که بدون استفاده از الکتریسیته و مشابه تلفن صدا را به فاصله ۱۰ تا ۲۰ متری انتقال دهد.

۳ـ۸ـ الگوی پرسش

صحیح یا غلط

۱ــ استفاده از سیگنال RF به عنوان حامل سبب کاهش طول آنتن و افزایش ایستگاه رادیویی در منطقه می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

تشریحی

۲ــ مزایای استفاده از سیگنال RF را به عنوان حامل بیان کنید.

۳ــ شکل موج سیگنال پیام سینوسی و حامل را ترسیم و با هم مقایسه کنید.

۴ــ به چه دلیل باید فرکانس حامل را زیاد انتخاب کرد؟

محاسباتی :

۵ــ در صورتی که فرکانس حامل برابر با ۱۲۰۰ کیلوهرتز باشد، طول آنتن $\frac{\lambda}{۴}$ را به‌دست آورید.

۶ ــ چند مثال دیگر برای محاسبه طول آنتن درمحدودهٔ باند فرکانس FM طراحی و حل کنید.

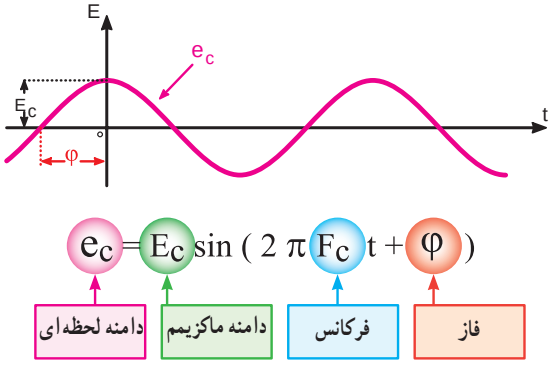
۹ـ۳ـ چگونگی عمل مدولاسیون (modulation)

مثالی را در مورد مسافرت انسان با استفاده از روش‌های مختلف بیان کردیم. این مثال فقط جهت درک بهتر مطلب عنوان شده بود. عمل مدولاسیون در مقایسه با مسافرت انسان عملی کاملاً متفاوت است. هنگامی که انسان در مبدأ سوار هواپیما می‌شود، در زمان سوار شدن هیچ تغییری در ماهیت او پدید نمی‌آید. در مقصد نیز بدون تغییر در ذات و ماهیت از هواپیما پیاده می‌شود. در صورتی که در مدولاسیون، همواره شکل سیگنال ارسالی با سیگنال حامل و پیام کاملاً متفاوت است؛ به‌عبارت دیگر، در هنگام انجام مدولاسیون یکی از مشخصه‌های سیگنال حامل متناسب با پیام تغییر می‌کند.

۱ـ۹ـ۳ـ مشخصه‌های سیگنال حامل : سیگنال حامل معمولاً به دو صورت مربعی یا سینوسی تولید می‌شود. در فرستنده‌های محلی معمولاً از سیگنال سینوسی به عنوان حامل استفاده می‌کنند. بنابراین بحث ما بیشتر دربارهٔ حامل سینوسی خواهد بود. می‌دانیم که هر سیگنال سینوسی دارای سه مشخصه اصلی به شرح زیر است :

۱ــ دامنه	Amplitude
۲ــ فرکانس	Frequency
۳ــ فاز	Phase

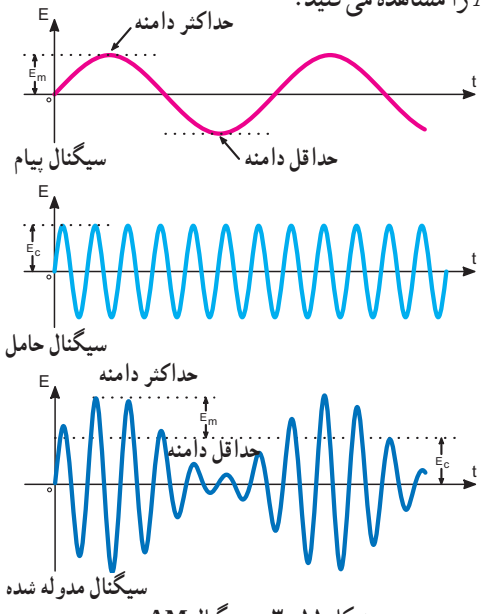
در شکل ۱۰ــ۳ سیگنال حامل را با ذکر معادله موج و مشخصه‌های اصلی آن مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۰ــ۳ــ مشخصه‌های اصلی سیگنال حامل و معادلهٔ موج

۲ـ ۹ـ۳ـ تعریف مدولاسیون: مدولاسیون عبارت است از کنترل یکی از مشخصه‌های اصلی حامل توسط پیام، به‌طوری که گیرنده بتواند اطلاعات ارسال شده، از قبیل صوت، موسیقی و... را مجدداً بازسازی کند. چون سیگنال حامل یک سیگنال سینوسی با فرکانس بالا است، بنابراین می‌توان سه مشخصهٔ دامنه، فاز و فرکانس را با سیگنال پیام، تحت کنترل درآورد و در صورت نیاز آن را بازسازی کرد. بنابراین سه نوع مدولاسیون دامنه، فاز و فرکانس شکل می‌گیرد.

۳ـ ۹ـ۳ـ مدولاسیون دامنه: در مدولاسیون دامنه (Amplitude Modulation)، فرکانس موج حامل (کاریر) ثابت است و دامنهٔ حامل متناسب با دامنه پیام (موج مدوله کننده) تغییر می‌کند. سرعت تکرار تغییرات دامنه حامل متناسب با فرکانس پیام خواهد بود. مدولاسیون دامنه را به اختصار به صورت AM می‌نویسند. در شکل ۱۱ــ۳ سیگنال پیام سینوسی، سیگنال حامل سینوسی و سیگنال مدوله شده AM را مشاهده می‌کنید.

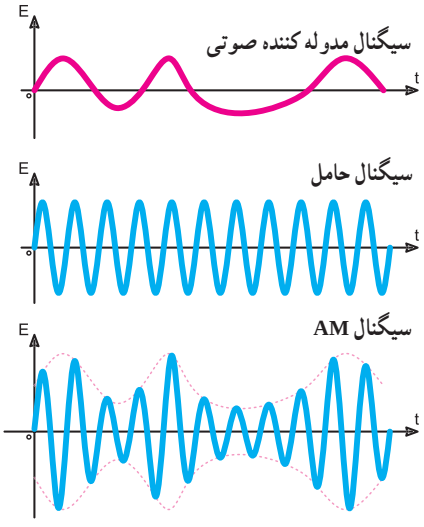


شکل ۱۱ــ۳ــ سیگنال AM

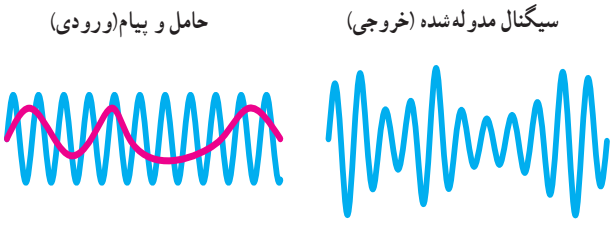
آزمایشگاه مجازی
مربی محترم

توصیه می‌شود، به منظور تسهیل در آموزش و سرعت دادن به فرآیند یاددهی و یادگیری، با استفاده از نرم‌افزار مولتی سیم یا هر نوع نرم‌افزار مشابه دیگر، مدولاسیون AM را شبیه‌سازی کنید و آن را به هنرجویان نشان دهید.

در شکل‌های ۱۲ــ۳ و ۱۳ــ۳ دو نوع پیام غیرسینوسی و حامل سینوسی و موج مدوله شده AM مربوط به آنها را مشاهده می‌کنید.

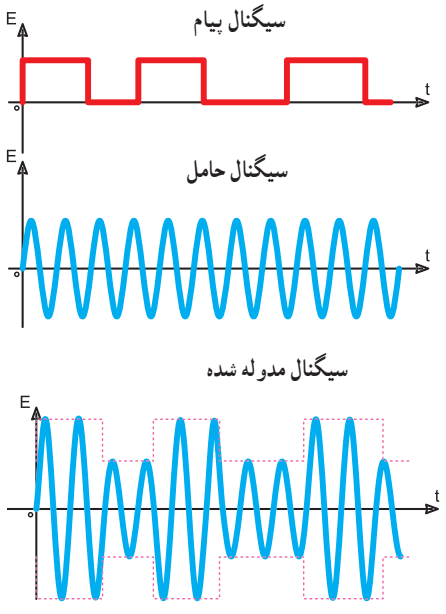


شکل ۱۲ــ۳ــ مدولاسیون AM با سیگنال غیرسینوسی

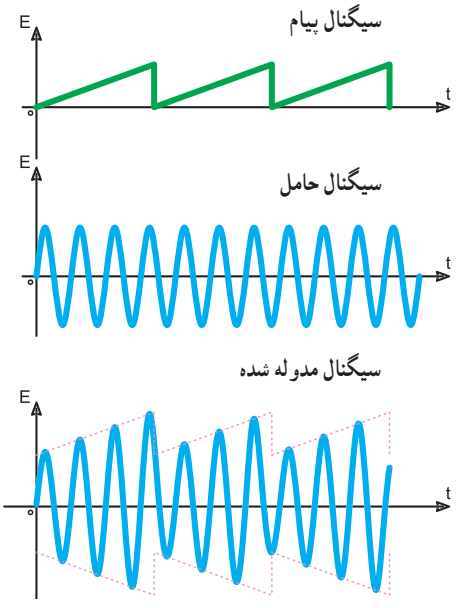


شکل ۱۳ــ۳ــ مقایسهٔ ترکیب پیام و حامل در مدولاسیون AM با سیگنال غیرسینوسی

در شکل‌های ۱۴ــ۳ و ۱۵ــ۳ پیام‌های مربعی و دندانه اره‌ای که به صورت AM روی حامل سینوسی مدوله شده‌اند نشان داده شده است.



شکل ۱۴ــ۳ــ مدولاسیون AM با سیگنال مربعی



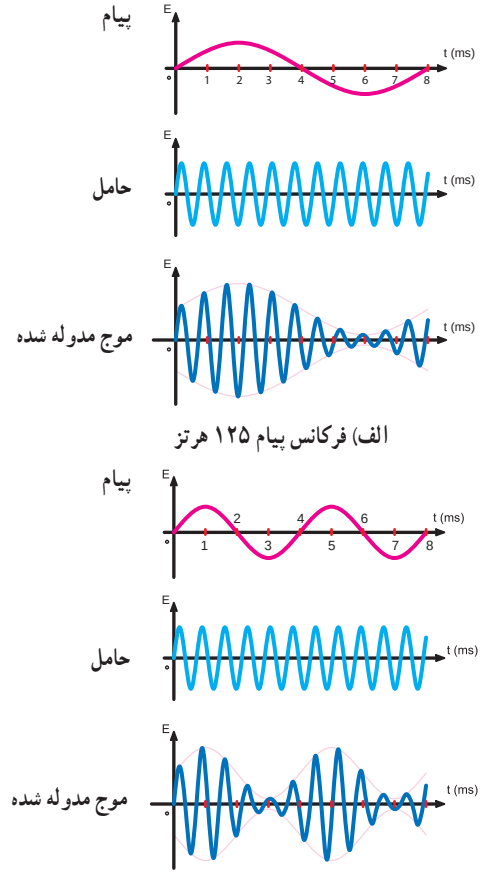
شکل ۱۵ــ۳ــ مدولاسیون AM با سیگنال دندانه ارّه‌ای

شکل‌های ۱۶ــ۳ــ الف و ب، نشان می‌دهد که سرعت تغییرات دامنهٔ حامل به فرکانس پیام بستگی دارد.

شکل (الف) موج پیام را با پریود ۸ میلی ثانیه (فرکانس

۱۲۵ هرتز) نشان می‌دهد که روی حامل سینوسی به صورت AM مدوله شده است.

شکل (ب) پیام را با پریود ۴ میلی‌ثانیه (فرکانس ۲۵۰ هرتز) نشان می‌دهد که روی حامل سینوسی به صورت AM مدوله شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت تغییرات دامنهٔ موج حامل در شکل ۱۶ــ۳ ــ ب، دو برابر سرعت تغییرات دامنهٔ موج حامل در شکل ۱۶ــ۳ ــ الف، است.



الف) فرکانس پیام ۱۲۵ هرتز

ب) فرکانس پیام ۲۵۰ هرتز

شکل ۱۶ــ۳ــ تأثیر فرکانس پیام روی موج مدوله شده AM

آزمایشگاه مجازی
مربی محترم

توصیه می‌شود، با استفاده از نرم‌افزار مولتی سیم یا سایر نرم‌افزارهای مرتبط انواع مدولاسیون را با استفاده از شکل موج‌های مختلف شبیه‌سازی کنید و به هنرجویان نشان دهید.

۱۰ــ۳ــ معادله موج AM

اگر پیام و حامل را به صورت موج سینوسی درنظر بگیریم معادلهٔ پیام و حامل به صورت معادلهٔ ۱ــ۳ و ۲ــ۳ است.

$e_m=E_m \sin\omega_m t$ (پیام) ۳ــ۱

$e_c=E_c \sin\omega_c t$ (حامل) ۳ــ۲

توجه داشته باشید که زاویهٔ فاز در هر دو معادله حذف شده است، زیرا مقدار فاز در اثر مدولاسیون دامنه، تغییر نمی‌کند، لذا با حذف آن از پیچیدگی معادله کاسته شده است.

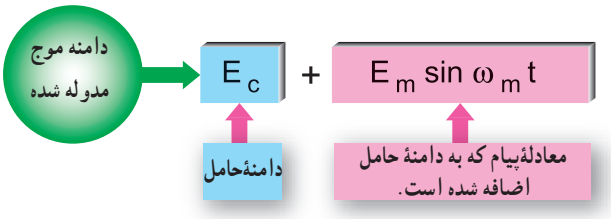
برای به‌دست آوردن معادلهٔ موج مدوله شده AM باید معادلهٔ پیام روی دامنهٔ حامل اثر بگذارد. لذا در معادلهٔ موج حامل که به صورت $e_c=E_c \sin\omega_c t$ است معادلهٔ پیام فقط با E_C جمع می‌شود و دامنهٔ حامل جدیدی را به صورت

$E'_C=E_C+E_m \sin\omega_m t$ ایجاد می‌کند (شکل ۱۷ــ۳).

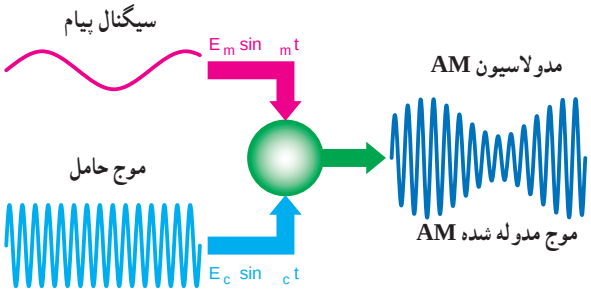
لذا معادله موج مدوله شده به‌صورت معادله ۳ــ۳ درمی‌آید.

$e_{mod}=(E_c+E_m \sin\omega_m t).\sin\omega_c t$ ۳ــ۳

در شکل ۱۸ــ۳ سیگنال پیام و سیگنال حامل و موج مدوله شده را مشاهده می‌کنید.



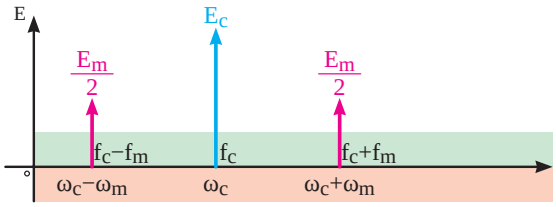
شکل ۱۷ــ۳ــ بلوک دیاگرام حاصل‌جمع دامنهٔ موج حامل با پیام



شکل ۱۸ــ۳ــ سیگنال‌های پیام، حامل و موج مدوله شده

معادله هر یک از سیگنال‌ها در مقابل آنها نوشته شده است.
مشاهده می‌شود دامنهٔ سیگنال حامل دقیقاً با پیام تغییر کرده است :

در صورت حل معادله ۳ــ۳ به این نتیجه می‌رسیم که طیف موج مدوله شده AM با سیگنال سینوسی خالص شامل فرکانس‌های حامل، مجموع فرکانس حامل و پیام و تفاضل آن دو است. لذا طیف فرکانس موج AM با پیام سینوسی خالص به صورت شکل ۱۹ــ۳ خواهد بود. با استفاده از دستگاه طیف‌نما می‌توانید این طیف فرکانسی را مشاهده کنید.



شکل ۱۹ــ۳ــ طیف موج مدوله شده AM

فرکانس مجموع حامل و پیام (فرکانس کناری بالا)
$f_c + f_m$
فرکانس تفاضل حامل و پیام (فرکانس کناری پایین)
$f_c - f_m$

برای مطالعه

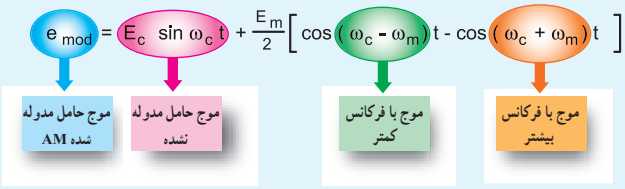
۳ــ۴
$$e_{mod}=(E_c+E_m \sin\omega_m t).\sin\omega_c t$$
$$e_{mod}=E_c \sin\omega_c t+E_m \sin\omega_m t \sin\omega_c t$$

با توجه به رابطه مثلثاتی

$$\sin x.\sin y=\frac{1}{2}[\cos(x-y)-\cos(x+y)]$$

می‌توان معادلهٔ موج مدوله‌شده را به صورت زیر نشان داد :

۳ــ۵
$$e_{mod}=E_c \sin\omega_c t+\frac{E_m}{2}[\cos(\omega_c-\omega_m)t-\cos(\omega_c+\omega_m)t]$$



مشاهده می‌شود معادلهٔ موج مدوله‌شده AM شامل سه قسمت است.

الف) موج حامل مدوله‌نشده ب) یک موج با فرکانس کمتر برابر $\omega_c-\omega_m$
ج) یک موج با فرکانس بیشتر برابر $\omega_c+\omega_m$
به این فرکانس‌ها، فرکانس‌های جانبی بالا و پایین گویند.

آزمایشگاه مجازی
مربی محترم

توصیه می‌شود، با استفاده از نرم‌افزار مولتی‌سیم یا هر نوع نرم‌افزار دیگر، طیف فرکانسی AM را روی دستگاه طیف‌نمای موجود در نرم‌افزار شبیه‌سازی کنید و برای هنرجویان نمایش دهید.

۳ـ۱۱ـ شاخص و درصد مدولاسیون: (Modulation index)

۳ـ۱۱ـ۱ـ تعریف شاخص مدولاسیون : نسبت دامنه سیگنال پیام به سیگنال حامل را شاخص مدولاسیون یا ضریب مدولاسیون می‌نامند. اگر دامنهٔ ماکزیمم حامل E_c و دامنهٔ ماکزیمم پیام E_m باشد، شاخص مدولاسیون برابر است با :

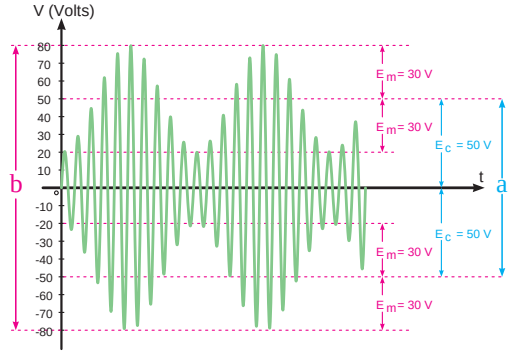
$$\text{شاخص مدولاسیون} = m = \frac{E_m}{E_c} = \frac{\text{دامنهٔ پیام}}{\text{دامنهٔ حامل}} \qquad ۳ـ۶$$

۳ـ۱۱ـ۲ـ درصد مدولاسیون (Percent of Modulation): چون ضریب مدولاسیون در عمل کوچک‌تر از واحد انتخاب می‌شود، برای سادگی در محاسبات معمولاً آن را برحسب درصد مدولاسیون بیان می‌کنند. درصد مدولاسیون را با M یا m_p نشان می‌دهند (رابطه ۳ـ۷).

$$M = m_p = \frac{E_m}{E_c} \times ۱۰۰ \qquad ۳ـ۷$$

مثال ۳ـ۴

ضریب مدولاسیون را با توجه به شکل ۳ـ۲۰ به‌دست آورید.



شکل ۳ـ۲۰ـ محاسبهٔ ضریب مدولاسیون

فکر کنید :

آیا مقدار m از رابطهٔ $\frac{b-a}{b+a}$ قابل محاسبه است؟ نتیجه را به کلاس ارائه دهید.

پاسخ

همان‌طورکه در شکل مشاهده می‌شود، دامنهٔ حامل برابر با ۵۰ ولت و دامنهٔ پیام برابر با ۳۰ ولت است. در اثر مدولاسیون دامنهٔ حامل در نیم سیکل مثبت پیام از ۵۰ ولت به ۸۰=۳۰+۵۰ ولت افزایش و در نیم سیکل منفی از ۵۰ ولت به ۲۰=۳۰−۵۰ ولت کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر سیگنال پیام به طور لحظه‌ای با دامنهٔ حامل جمع می‌شود. بنابراین، داریم :

دامنهٔ حامل $E_C = ۵۰\ V$

دامنهٔ پیام $E_m = ۳۰\ V$

ضریب مدولاسیون $m = \frac{E_m}{E_c} = \frac{۳۰}{۵۰} = ۰/۶$

توجه: دامنه حامل و پیام را می‌توانید برحسب پیک، پیک توپیک یا مؤثر قرار دهید. دقت کنید اگر E_c را برحسب پیک انتخاب کردید باید E_m نیز برحسب پیک انتخاب شود.

مثال ۳ـ۵

درصد مدولاسیون را برای شکل ۳ـ۲۰ در مثال ۳ـ۴ به‌دست آورید :

$$M = m_p = \frac{E_m}{E_c} \times ۱۰۰$$

$$M = m_p = \frac{۳۰}{۵۰} \times ۱۰۰ = ٪۶۰$$

ـ در صورتی که علاوه بر سیگنال پیام، سیگنال دیگری روی موج حامل سوار شود حالت مدولاسیون تداخلی یا inter modulation رخ می‌دهد که برای سیگنال مدوله‌شده اشکال به وجود می‌آورد. به طور کلی برای مدولاسیون سه درجه‌بندی به شرح زیر تعریف می‌شود.

ـ مدولاسیون کمتر از صددرصد

less than hundred percent modulation

ـ مدولاسیون صددرصد

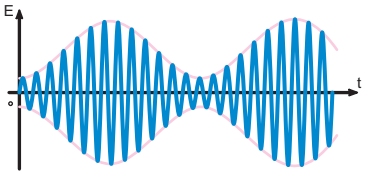
one hundred percent modulation

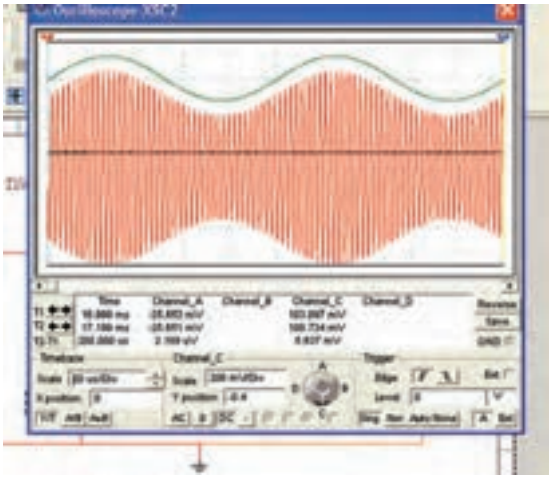
ـ مدولاسیون بیشتر از صددرصد

more than hundred percent modulation

۳ـ۱۱ـ۳ـ مدولاسیون کمتر از صددرصد (Less than hundred percent modulation):

در این نوع مدولاسیون، دامنهٔ حامل هرگز به صفر نمی‌رسد. به عبارت دیگر دامنهٔ پیام کمتر از حامل است (شکل ۲۱ـ۳).

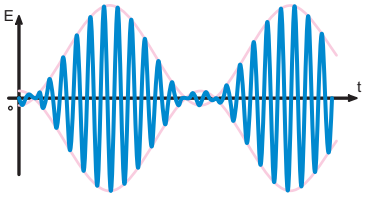


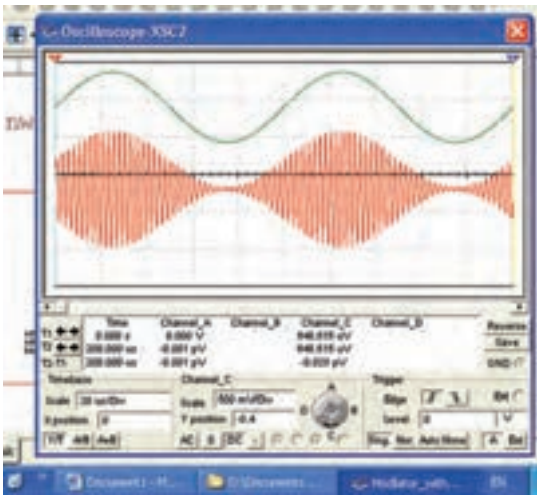


شکل ۲۱ـ۳ـ مدولاسیون کمتر از ٪۱۰۰

۴ـ۱۱ـ۳ـ مدولاسیون صددرصد (one hundred percent modulation):

در این درجه‌بندی از مدولاسیون، دامنهٔ سیگنال حامل در یک لحظهٔ کوتاه به صفر می‌رسد، (شکل ۲۲ـ۳). این شرایط هنگامی پدید می‌آید که دامنهٔ حامل و دامنهٔ پیام با هم برابر باشند.

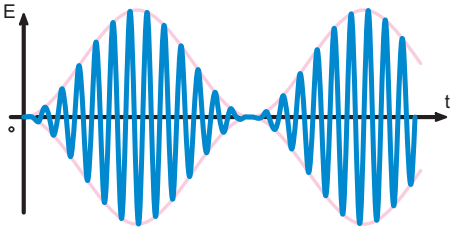


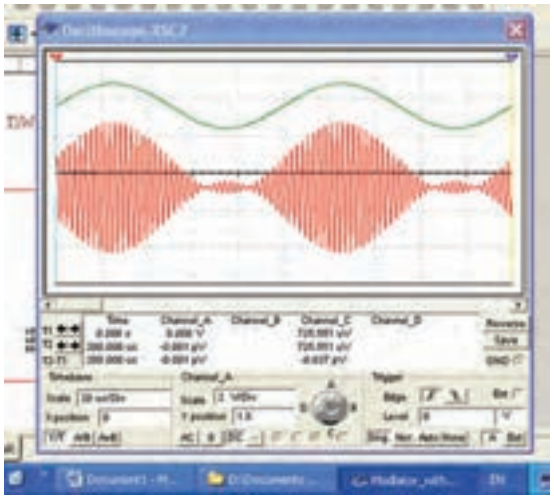


شکل ۲۲ـ۳ـ مدولاسیون ٪۱۰۰

۵ـ۱۱ـ۳ـ مدولاسیون بیشتر ازصددرصد (More than hundred percent modulation):

در صورتی که دامنه پیام بیشتر از دامنهٔ حامل باشد، مدولاسیون بیشتر از صددرصد حاصل خواهد شد (شکل ۲۳ـ۳). این نوع مدولاسیون عملاً قابل قبول نیست، زیرا هنگام بازسازی سیگنال پیام درگیرنده، قسمتی از آن حذف می‌شود. به عبارت دیگر در سیگنال پیام اعوجاج به‌وجود می‌آید.





شکل ۲۳ـ۳ـ مدولاسیون بیشتر از ٪۱۰۰

نکتهٔ مهم

توصیه می‌شود، مربی محترم با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف این مثال را شبیه‌سازی کند و به دانش آموزان نشان دهد.

۱۲ـ۳ـ الگوی پرسش

کامل کردنی :

۱ــ معادلهٔ موج مدوله‌شدهٔ AM به صورت $e_m=(E_c+\ldots\ldots)\sin\omega_c t$ است.

کوتاه پاسخ :

۲ــ فرمول شاخص مدولاسیون را بنویسید.

چهار گزینه‌ای :

۳ــ در مورد مدولاسیون AM کدام گزینه صحیح است؟

۱) دامنهٔ کریر متناسب با فرکانس پیام تغییر می‌کند.

۲) سرعت تغییر فرکانس کریر متناسب با دامنهٔ پیام است.

۳) دامنهٔ کریر متناسب با دامنهٔ پیام تغییر می‌کند.

۴) سرعت تغییر دامنهٔ کریر متناسب با دامنهٔ پیام است.

تشریحی :

۴ــ مشخصه‌های سیگنال حامل و پیام را با ذکر معادلات آن نام ببرید.

۵ــ امواج با مدولاسیون ۱۰۰٪، کمتر از ۱۰۰٪ و بیشتر از ۱۰۰٪ را شرح دهید.

۶ــ ضریب مدولاسیون را تعریف کنید و تفاوت آن را با درصد مدولاسیون بنویسید.

۷ــ به چه دلیل از مدولاسیون بیشتر از ۱۰۰٪ نمی‌توان استفاده کرد؟

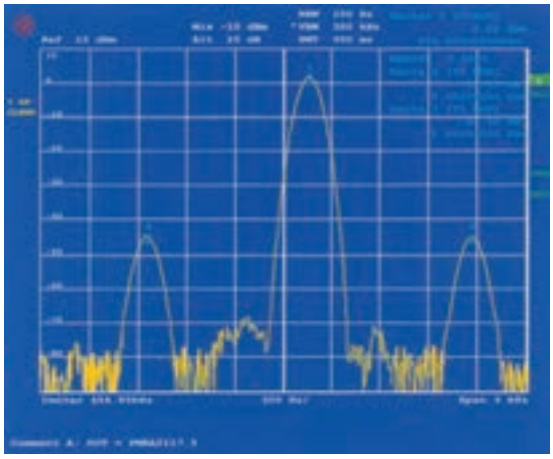
۸ــ تعدادی شکل موج سیگنال AM با دامنه‌های مختلف ترسیم کنید و میزان شاخص مدولاسیون را به‌دست آورید.

۱۳ـ۳ـ طیف فرکانسی سیگنال AM

در صورتی که یک سیگنال AM با فرکانس حامل F_c و پیام به صورت تُن صوتی با فرکانس F_m و ضریب مدولاسیون m را به ورودی دستگاه طیف نما متصل کنیم، روی صفحهٔ دستگاه طیف‌نما فرکانس‌هایی به شرح زیر ظاهر می‌شود :

فرکانس حامل	F_c
مجموع فرکانس‌های حامل و پیام	F_c+F_m
تفاضل فرکانس‌های حامل و پیام	F_c-F_m

مجموعهٔ فرکانس‌های فوق را طیف فرکانسی سیگنال AM می‌نامند. درطیف فرکانسی دامنهٔ سیگنال حامل برابر با E_c و دامنهٔ فرکانس‌های F_c+F_m و F_c-F_m هر کدام برابر با $\frac{mE_c}{۲}$ است[۱]. شکل ۲۴ــ۳ طیف فرکانسی سیگنال AM رانشان می‌دهد.



شکل ۲۴ــ۳ــ طیف فرکانسی AM

همان طورکه مشاهده می‌شود، فرکانس‌های مجموع (F_c+F_m) و تفاضل (F_c-F_m) در دو طرف فرکانس حامل قرار دارند. فرکانس مجموع را فرکانس کناری بالا USF (Upper Side Frequency) و فرکانس تفاضل را فرکانس کناری پایین LSF (Lower Side Frequency) می‌نامند.

مثال ۶ـ۳

یک سیگنال حامل با فرکانس ۷۵۰ کیلوهرتز توسط یک موج سینوسی خالص با فرکانس ۳ کیلوهرتز مدوله می‌شود. مقادیر فرکانس‌های موجود در طیف فرکانسی را به‌دست آورید. کدام فرکانس، فرکانس کناری بالا و کدام فرکانس، فرکانس کناری پایین است؟

۱ــ مقادیر فرکانس و دامنهٔ طیف فرکانسی با استفاده از روابط ریاضی قابل محاسبه است.

پاسخ

$F_c = ۷۵۰ KHz$

$F_m = ۳KHz$

$F_c + F_m = ۷۵۰KHZ + ۳KHZ = ۷۵۳KHz$

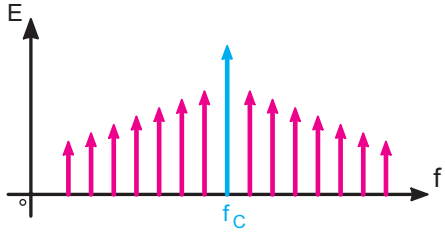
$F_c - F_m = ۷۵۰KHz - ۳KHz = ۷۴۷KHz$

فرکانس کناری پایین $LSF = ۷۴۷KHz$

فرکانس کناری بالا $USF = ۷۵۳KHz$

در صورتی که پیام از چند سیگنال سینوسی جداگانه تشکیل شده باشد، برای هر سیگنال سینوسی، فرکانس‌های کناری بالا و پایین مستقل به‌وجود می‌آید. در این حالت مجموعه‌ای از طیف فرکانسی پدید می‌آید.

شکل ۲۵ــ۳ مجموعهٔ طیف فرکانسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۵ــ۳ــ مجموعهٔ طیف فرکانسی

مثال ۷ـ۳

سیگنال پیامی شامل فرکانس‌های $F_{m_1} = ۳KHz$، $F_{m_2} = ۱۰KHz$ و $F_{m_3} = ۲۰KHz$ است. در صورتی که این سیگنال‌ها را روی حامل $F_c = ۵۰۰KHz$ مدوله کنیم و سیگنال مدوله شده را به دستگاه طیف‌نما بدهیم چه فرکانس‌هایی روی صفحه دستگاه ظاهر می‌شود؟ فرکانس‌های کناری بالا و فرکانس‌های کناری پایین کدام‌اند؟ دامنهٔ طیف فرکانسی بستگی به چه عواملی دارد؟

پاسخ

$F_1 = F_c + F_{m_1} = ۵۰۰ + ۳ = ۵۰۳KHz$

$F_2 = F_c + F_{m_2} = ۵۰۰ + ۱۰ = ۵۱۰KHz$

$F_3 = F_c + F_{m_3} = ۵۰۰ + ۲۰ = ۵۲۰KHz$

$F_4 = F_c - F_{m_1} = ۵۰۰ - ۳ = ۴۹۷KHz$

$F_5 = F_c - F_{m_2} = ۵۰۰ - ۱۰ = ۴۹۰KHz$

$F_6 = F_c - F_{m_3} = ۵۰۰ - ۲۰ = ۴۸۰KHz$

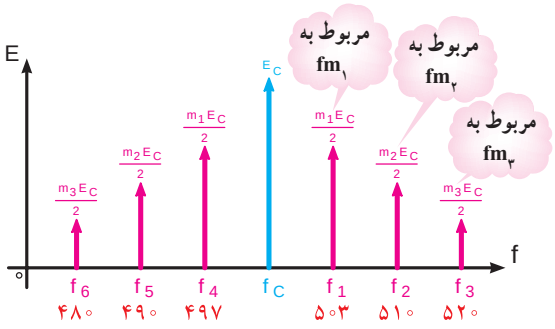
دامنهٔ فرکانس‌های کناری، بستگی به ضریب مدولاسیون m و E_c دارد. طیف سیگنال مدوله شده حاوی هفت فرکانس به شرح زیر است :

فرکانس حامل $\Rightarrow F_c$

فرکانس‌های کناری بالا $\Rightarrow F_۱, F_۲, F_۳$

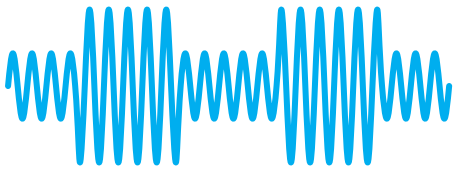
فرکانس‌های کناری پایین $\Rightarrow F_۴, F_۵, F_۶$

در شکل ۲۶ــ۳ طیف فرکانسی نشان داده شده است.

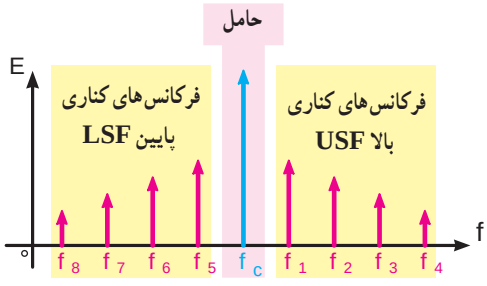


شکل ۲۶ــ۳ــ طیف فرکانسی حاصل از سیگنال پیام مرکب

اگر سیگنال پیام یک سیگنال غیرسینوسی، مثلاً مربعی باشد، در این حالت در باندهای کناری بالا و پایین مجموعه‌ای از طیف فرکانسی را، که از ترکیب هارمونیک‌های موج غیرسینوسی به‌وجود می‌آید، خواهیم داشت. در شکل ۲۷ــ۳ طیف فرکانسی یک موج مدوله شده را، که پیام آن یک سیگنال مربعی است مشاهده می‌کنید.



الف ــ سیگنال مدوله شده AM



ب ــ طیف فرکانسی

شکل ۲۷ــ۳ــ طیف فرکانسی حاصل از مدولاسیون موج مربعی

آزمایشگاه مجازی

توصیه می‌شود، با استفاده از دستگاه طیف نمای موجود در نرم‌افزار آموزشی، طیف فرکانسی شکل ۲۵ــ۳ را نمایش دهید.

۱۴ـ۳ـ الگوی پرسش

۱ــ در صورتی که سیگنال مدوله‌کننده یک سیگنال سینوسی ساده باشد، طیف فرکانسی موج مدوله شده را رسم کنید.

۲ــ فرکانس‌های USF و LSF را تعریف کنید.

۳ــ در صورتی که $F_c=۶۰۰KHz$ ، $E_c=۱۰V$ و $m=۰/۳$ باشد، مقدار دامنهٔ فرکانس‌های کناری بالا و پایین چند ولت است؟ مقدار فرکانس‌های کناری بالا و پایین، در صورتی که $F_m=۲KHz$ باشد، برابر با چند کیلوهرتز است؟

۴ــ طیف فرکانسی حاصل از مدولاسیون سه سیگنال سینوسی با یک حامل را رسم کنید.

۵ــ در صورتی که سیگنال پیام یک سیگنال غیرسینوسی باشد به چه دلیل در سیگنال AM یک طیف فرکانسی تشکیل می‌شود؟

۶ــ طیف فرکانسی حاصل از مدولاسیون موج مربعی با یک سیگنال حامل را رسم کنید. سپس در صورت تمایل طیف فرکانسی را با مقادیر دل‌خواه از طریق نرم‌افزار به‌دست آورید.

صحیح یا غلط

۷ــ دامنهٔ فرکانس‌های کناری در طیف موج مدوله‌شدهٔ AM برابر با $\frac{E_m}{۲}$ است. صحیح ☐ غلط ☐

چهارگزینه‌ای

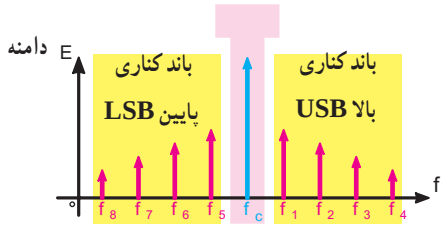
۸ــ اگر پیامی با فرکانس ۱۲ کیلوهرتز روی حاملی با فرکانس ۷۰۰کیلوهرتز به صورت AM مدوله شود، فرکانس LSF چند کیلوهرتز است؟

۱) ۶۸۸ ۲) ۷۰۰ ۳) ۷۱۲ ۴) ۷۲۴

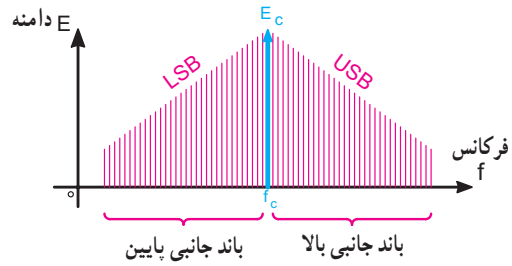
۱۵ـ۳ـ باندهای کناری سیگنال AM

همان‌طور که در مثال ۷ــ۳ بیان شد، در صورتی که سیگنال مدوله‌کننده (پیام) از چند سیگنال سینوسی تشکیل شده باشد، در صورت انجام مدولاسیون هر یک از سیگنال‌ها به تنهایی یک طیف فرکانسی را به‌وجود می‌آورد. در این حالت تعداد فرکانس‌های کناری بالا و پایین بیشتر از یک فرکانس می‌شود و باند فرکانسی را تشکیل می‌دهد. از مجموع فرکانس‌های پیام و حامل، باند کناری بالا (USB)(Upper Side Band) و از تفاضل فرکانس‌های پیام و حامل، باند کناری پایین(LSB) (Lower Side Band) شکل می‌گیرد (شکل ۲۸ــ۳).

اگر تعداد فرکانس‌های پیام آن‌قدر زیاد شود که مؤلفه‌های فرکانس‌های کناری بالا و پایین به هم بچسبند، باند فرکانسی پیوسته تشکیل می‌شود (شکل ۲۹ــ۳).



شکل ۲۸ــ۳ــ باندهای کناری بالا و پایین



شکل ۲۹ــ۳ــ باند فرکانسی پیوسته

۱ـ۱۵ـ۳ـ پهنای باند (Band width)سیگنال مدوله شده

پهنای باند عبارت از محدودهٔ فرکانس‌هایی است که در فاصلهٔ بین کمترین فرکانس کناری پایین و بیشترین فرکانس کناری بالا قرار می‌گیرد. پهنای باند از رابطهٔ ۸ ــ ۳ به‌دست می‌آید.

$$BW=F_{USB}-F_{LSB} \qquad ۸ــ۳$$

که در آن

پهنای باند برحسب هرتز، کیلوهرتز یا مگاهرتز = BW

بالاترین فرکانس باند کناری بالا = F_{USB}

پایین‌ترین فرکانس باند کناری پایین = F_{LSB}

پهنای باند را با روش دیگری نیز می‌توان محاسبه کرد. با فرمول پهنای باند شروع می‌کنیم :

$$BW=F_{USB}-F_{LSB}$$

$$F_{USB}=F_c+F_m\ max \qquad ۳ـ۹$$

$$F_{LSB}=F_c-F_m\ max \qquad ۳ـ۱۰$$

معادلات ۳ـ۹ و ۳ـ۱۰ را در معادله ۳ ـ۸ قرار می‌دهیم :

$$BW=(F_c+F_m\,max)-(F_c-F_m\,max)$$

$$BW=۲F_m\,max \qquad ۳ـ۱۱$$

با توجه به معادلهٔ ۳ـ۱۱ درمی‌یابیم که پهنای باند دو برابر بیشترین فرکانس پیام است. به عبارت دیگر، در سیگنال AM پهنای باند دو برابر فرکانس پیام است. در فرستنده‌های AM تجارتی پهنای باند را ده کیلوهرتز در نظر می‌گیرند. بنابراین، سیگنال پیام نباید از ۵ کیلوهرتز بیشتر شود. بدین ترتیب بیشترین فرکانس پیام در فرستنده‌های AM برابر ۵ کیلوهرتز است.

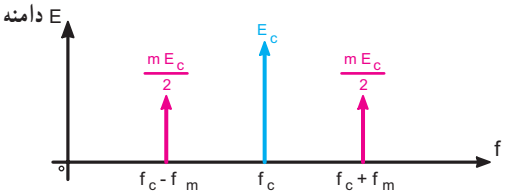
مثال ۳ـ۸

اگر فرکانس سیگنال حامل در یک فرستنده رادیویی ۱۰ مگاهرتز باشد و بخواهیم آن را با فرکانس ۵ کیلوهرتز مدوله کنیم، پهنای باند سیگنال AM ارسالی چه‌قدر خواهد شد؟

$$Bw=۲F_m=۲\times۵kHz=۱۰kHz$$

۳ـ۱۶ـ توان در موج مدوله شده AM

همان‌طور که نشان داده شد، طیف فرکانسی موج مدوله شده AM با پیام به صورت سینوسی خالص، شامل موج حامل مدوله نشده و دو مؤلفهٔ فرکانس‌های جانبی بالا و پایین است. شکل ۳ـ۳۰ موج حامل و فرکانس‌های جانبی بالا و پایین را نشان می‌دهد.



شکل ۳ـ۳۰ـ نمایش موج حامل و فرکانس‌های جانبی بالا و پایین

چون دامنهٔ E_c نیز در طیف فرکانسی AM ظاهر می‌شود بنابراین موج مدوله شده AM دارای توانی بیشتر از توان موج حامل قبل از انجام مدولاسیون است. مقدار کل توان از رابطه ۳ـ۱۲ به دست می‌آید.

رابطه ۳ـ۱۲

$$P_T=\frac{E_{Ce}^2}{R}+\frac{E_{LSFe}^2}{R}+\frac{E_{USFe}^2}{R}$$

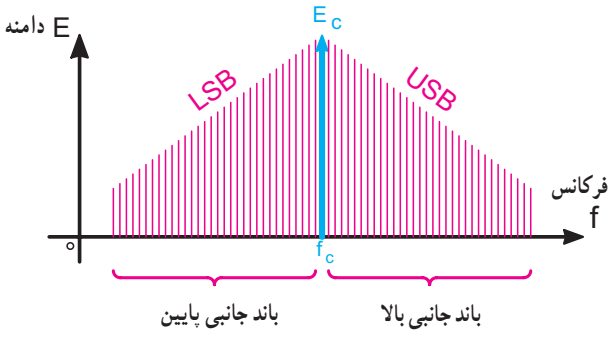
P_T: توان کل موج AM — $\frac{E_{Ce}^2}{R}$: توان موج حامل — $\frac{E_{LSFe}^2}{R}$: توان فرکانس جانبی پایین — $\frac{E_{USFe}^2}{R}$: توان فرکانس جانبی بالا

مقادیر مؤثر هستند E_{C_e} ، E_{LSF_e} ، E_{USF_e}

در محاسبه توان تمام ولتاژها مؤثر در نظر گرفته می‌شوند و R مقاومتی نظیر مقاومت آنتن است که توان در آن تلف می‌شود.

با توجه به رابطهٔ ۳ـ۱۲ اثبات می‌شود که در سیگنال مدوله شده AM، حدود ۶۳ درصد توان در سیگنال حامل و ۳۷ درصد توان در باندهای کناری قرار دارد. با توجه به این‌که موج حامل موجود در سیگنال مدوله شده فاقد اطلاعات مربوط به پیام است، اگر بتوانیم قسمتی از توان موج AM را که در آن پیام وجود دارد بفرستیم در مصرف توان صرفه‌جویی می‌شود. این عمل از طریق فراهم آوردن انواع روش‌های ارسال امواج AM امکان‌پذیر می‌شود.

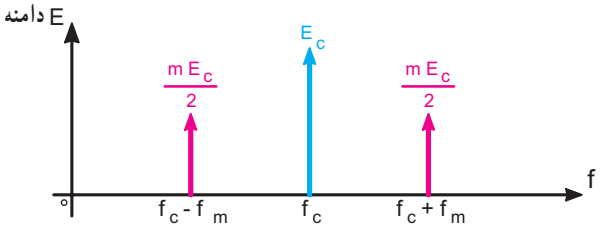
از آن‌جایی که معمولاً پیام ارسالی سینوسی خالص نیست لذا امواج مدوله شده AM غالباً دارای طیف فرکانسی‌اند. بنابراین به جای ارسال فرکانس جانبی بالا و پایین، باند فرکانس بالا و پایین ارسال می‌شود. شکل ۳ـ۳۱ موقعیت فرکانس حامل و باند جانبی بالا و پایین را نشان می‌دهد.



شکل ۳ـ۳۱ـ نمایش موقعیت فرکانس حامل و باند جانبی بالا و پایین

۳ـ۱۷ـ انواع روش‌های ارسال در مدولاسیون AM

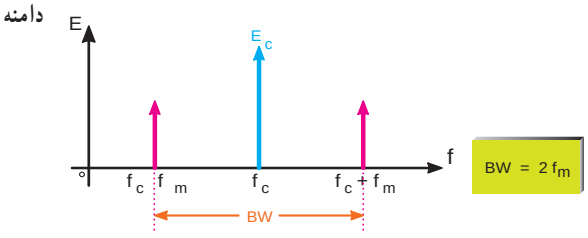
همان‌طور که نشان داده شد در تولید موج AM با سیگنال سینوسی خالص فرکانس حامل با دو فرکانس جانبی ایجاد می‌شود. شکل ۳ـ۳۲ طیف موج مدوله شده AM را نشان می‌دهد.



شکل ۳ـ۳۲ـ طیف موج مدوله شده AM

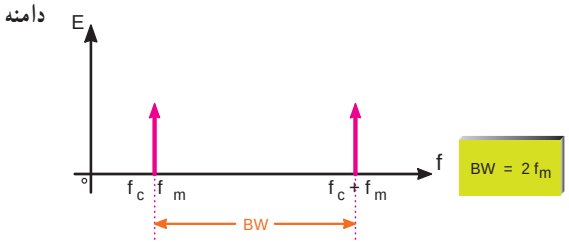
در صورتی که هنگام ارسال موج مدوله شده قسمت‌هایی از سیگنال‌های موجود در سیگنال AM، مثلاً فرکانس حامل حذف شود پنج روش ارسال، به شرح زیر به‌وجود می‌آید :

۱ـ۱۷ـ۳ـ ارسال مدولاسیون دامنه به صورت کامل AM-FC (Amplitude Modulation-full Carrier): در این روش هر دو فرکانس جانبی بالا و پایین و سیگنال حامل ارسال می‌شود. این روش مدولاسیون در فرستندهٔ رادیویی تجارتی به‌کار می‌رود. پهنای باند در این روش $2F_m$ است. شکل ۳ـ۳۳ فرکانس حامل و فرکانس‌های جانبی بالا و پایین و پهنای باند را در روش ارسال به‌صورت DSBFC نشان می‌دهد.



شکل ۳ـ۳۳ـ طیف موج مدوله شده به روش AM-FC

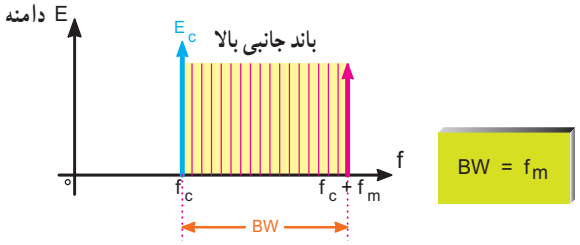
۲ـ۱۷ـ۳ـ ارسال مدولاسیون دامنه به روش دو باند کناری AM-SC یا DSB با حذف سیگنال حامل (Amplitude Modulation-Suppressed Carrier Double side Band): در این روش فقط باندهای کناری بالا و پایین ارسال می‌گردد و سیگنال حامل حذف می‌شود. پهنای باند در این روش نیز برابر با $2F_m$ است. شکل ۳ـ۳۴ طیف فرکانس در این روش را نشان می‌دهد.



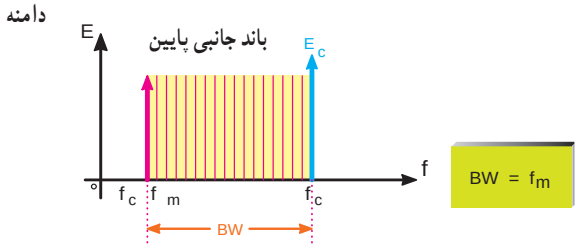
شکل ۳ـ۳۴ـ طیف موج مدوله شده به روش DSB

۳ـ۱۷ـ۳ـ ارسال مدولاسیون دامنه به روش یک باند کناری SSB (Single Side Band): چون در هر یک از باندهای جانبی بالا و پایین کلیه اطلاعات وجود دارد، برای صرفه‌جویی در توان، افزایش راندمان و کاهش پهنای باند، می‌توان فقط یکی از باندهای جانبی و حامل را ارسال نمود این روش ارسال مدولاسیون را به اختصار SSB می‌نامند.

شکل‌های ۳ـ۳۵ و ۳ـ۳۶ یکی از باندهای جانبی را در روش ارسال مدولاسیون به صورت SSB، نشان می‌دهد.



شکل ۳ـ۳۵ـ باند جانبی بالا به روش SSB در طیف موج مدوله شده



شکل ۳ـ۳۶ـ باند جانبی پایین در طیف موج مدوله شده به روش SSB

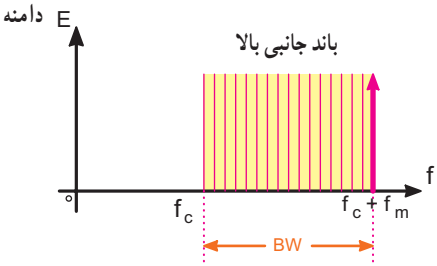
در مدولاسیون SSB پهنای باند موج مدوله شده برابر با F_m است.

BW = f_m

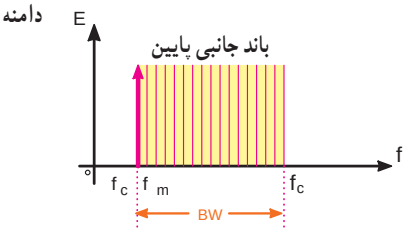
۴-۱۷-۳- ارسال مدولاسیون AM با باندکناری مستقل ISB (Independent-Side Band):

در این روش ارسال مدولاسیون فقط یکی از باندهای جانبی بالا یا پایین را ارسال می‌نمایند و سیگنال حامل را حذف می‌کنند. شکل ۳ــ۳۷ و ۳ــ۳۸ طیف این روش ارسال را نشان می‌دهد.

پهنای باند در این روش نیز برابر F_m است. $BW = f_m$



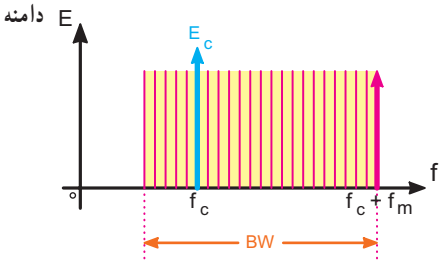
شکل ۳ــ۳۷ــ باند جانبی بالا بدون حامل



شکل ۳ــ۳۸ ــ باند جانبی پایین بدون حامل

۵-۱۷-۳- ارسال مدولاسیون AM به روش VSB (Vestigial Side Band):

در این روش ارسال، تمام باند جانبی بالا و قسمتی از باند جانبی پایین را ارسال می‌کنند. شکل ۳ــ۳۹ طیف موج مدوله شده به صورت VSB را نشان می‌دهد.



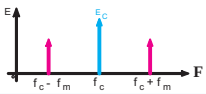
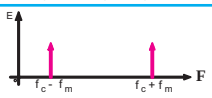
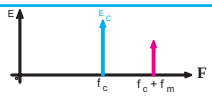
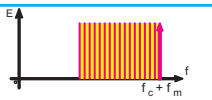
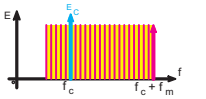
شکل ۳ــ۳۹ــ طیف موج مدوله شده به روش VSB

از این روش ارسال مدولاسیون، در ارسال تصاویر تلویزیون استفاده می‌شود.

پهنای باند در این روش اندکی بیشتر از F_m است. $BW > f_m$

در جدول ۳ــ۳ انواع مدولاسیون AM طیف موج مدوله شده و پهنای باند و کاربرد هر نوع مدولاسیون آورده شده است.

جدول ۳ــ۳

نوع مدولاسیون AM	طیف موج مدوله شده	پهنای باند BW	کاربرد
AM – FC		$۲f_m$	فرستنده‌های رادیویی محلی
DSB یا AM – SC		$۲f_m$	در مواردی که محدودیت در تولید انرژی در فرستنده وجود دارد؛ مانند بی‌سیم پلیس
SSB		f_m	در مواردی که محدودیت پهنای باند وجود دارد؛ مانند ارتباطات ناوبری دریایی، رادیو آماتوری و نظامی
ISB		f_m	در مواردی که محدودیت توان و پهنای باند وجود دارد؛ مانند مخابرات نقطه‌به‌نقطه و رادیو تلفنی
VSB		اندکی بیشتر از f_m	در فرستندهٔ تلویزیونی

منابع اطلاعات این قسمت کتاب سیستم‌های مخابرات الکترونیکی تألیف جرج کندی است.

۱۸ـ۳ـ الگوی پرسش

۱ــ انواع روش‌های ارسال در مدولاسیون AM را نام ببرید.

۲ــ لغات انگلیسی هر یک از کلمات اختصاری AM-SC، AM-FC،VSB،DSB-SSB را بنویسید ومعنا کنید.

۳ــ پهنای باند روش‌های مختلف مدولاسیون AM را با هم مقایسه کنید.

۴ــ روش ارسال در مدولاسیون VSB دارای چه پهنای باندی است؟ از این روش در فرستندهٔ رادیویی استفاده می کنند یا در فرستنده تلویزیونی؟

چهارگزینه‌ای

۵ــ در کدام نوع ارسال مدولاسیون AM، پهنای باند موج مدوله شده اندکی بیشتر از سیگنال f_m است؟

۱) ISB ۲) DSB ۳) SSB ۴) VSB

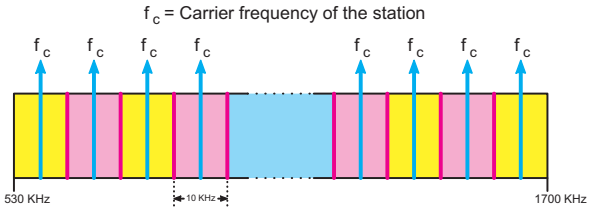
صحیح یا غلط

۶ــ در مواردی که محدودیت توان و پهنای باند وجود دارد، از روش ارسال مدولاسیون ISB استفاده می شود .

☐ صحیح ☐ غلط

۱۹ـ۳ـ تعداد ایستگاه رادیویی

با توجه به مسئلهٔ پهنای باند در فرستنده‌های رادیویی تعداد ایستگاه‌های رادیویی محدود می‌شود. اگر پهنای باند سیگنال AM را ۱۰kHz در نظر بگیریم این بدین معناست که هر ایستگاه AM، ۱۰kHz را اشغال می کند. شکل ۴۰ـ۳ نشان می‌دهد چگونه در فاصلهٔ ۵۳۰ تا ۱۷۰۰ کیلو هرتز چندین ایستگاه رادیویی کنار هم قرار گرفته‌اند.



شکل ۴۰ـ۳ـ تقسیم بندی فاصلهٔ ۵۳۰ تا ۱۷۰۰ کیلوهرتز به چندین ایستگاه رادیویی

مثال ۹ـ۳

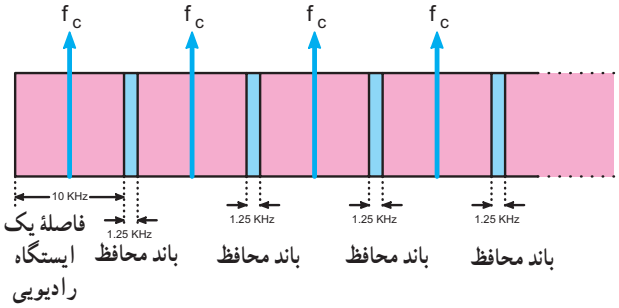
در باند فرکانسی ۱ تا ۲ مگاهرتز چند ایستگاه رادیویی AM می‌توان جای داد؟ (بدون باند محافظ)

$$\text{تعداد ایستگاه‌ها} = \frac{\text{باند فرکانس رادیویی}}{\text{پهنای باند سیگنال AM}} = \frac{(۲\times۱۰^{۶} - ۱\times۱۰^{۶})\text{Hz}}{(۱۰\times۱۰^{۳})\text{Hz}}$$

$$\text{تعداد ایستگاه‌ها} = \frac{۱\times۱۰^{۶}}{۱۰\times۱۰^{۳}} = ۱۰۰$$

با توجه به مثال ۹ــ۳ ملاحظه می‌شود که می‌توانیم صد ایستگاه رادیویی را در فاصلهٔ فرکانسی ۱ تا ۲ مگاهرتز داشته باشیم. عملاً برای جلوگیری از تداخل بین ایستگاه‌ها باید باند محافظ (Guard Band) نیز در نظر گرفته شود. بدین ترتیب تعداد ایستگاه‌ها کمتر از صد می‌شود. مقدار باند محافظ در AM برابر ۱/۲۵kHz است.

شکل ۴۱ـ۳ چند ایستگاه رادیویی را همراه با باند محافظ نشان می‌دهد.



شکل ۴۱ـ۳ـ چند ایستگاه رادیویی همراه با باند محافظ

مثال ۱۰ـ۳

در فاصلهٔ ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ کیلوهرتز چند ایستگاه رادیویی با باند محافظ جای می گیرد؟

$$\text{تعداد ایستگاه} = \frac{\text{باند فرکانسی رادیویی}}{\text{باند محافظ + پهنای باند سیگنال AM}}$$

پاسخ

$$\text{تعداد ایستگاه رادیویی} = \frac{(۱۲۰۰ - ۷۵۰\text{kHz})}{(۱۰ + ۱/۲۵)\text{kHz}} = \frac{۴۵۰\text{kHz}}{۱۱/۲۵\text{kHz}} = ۴۰$$

۲۰ـ۳ـ الگوی پرسش

۱ــ در صورتی‌که بیشترین فرکانس صوتی برابر با ۲/۵ کیلوهرتز باشد، پهنای باند سیگنال AM ارسالی چند کیلوهرتز است؟

۲ــ پهنای باند فرستنده‌های AM تجارتی چند کیلوهرتز است؟

۳ــ در فاصلهٔ ۶۰۰ کیلوهرتز تا ۱۸۰۰ کیلوهرتز چند ایستگاه رادیویی می‌توان جای داد؟ (بدون باند محافظ)

۴ــ در باند MW (۱۶۰۵kHz تا ۵۳۵) چند ایستگاه رادیویی AM با باند محافظ جای می‌گیرد؟

۵ــ با استفاده از یک سیگنال AM که فرکانس حامل و پیام آن مشخص است، طیف فرکانسی را برای انواع روش‌های ارسال با مقیاس مناسب ترسیم کنید. انتخاب فرکانس دلخواه است.

کامل کردنی :

۶ــ باند محافظ در ایستگاه رادیویی AM .... کیلوهرتز است.

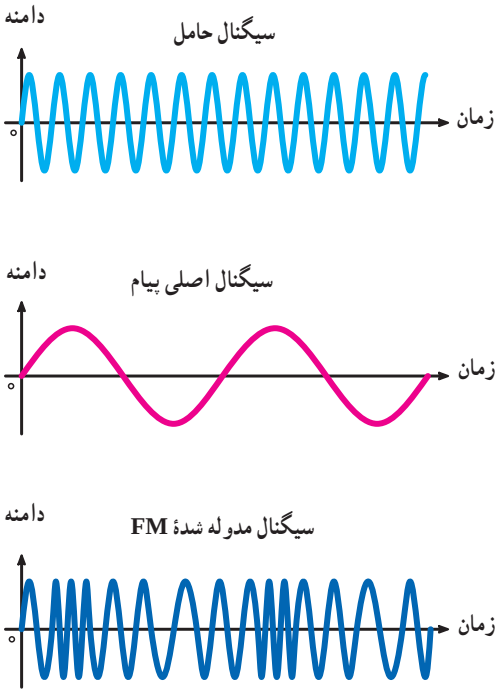
چهارگزینه‌ای :

۷ــ اگر پهنای باند سیگنال AM، ۱۰کیلوهرتز باشد در فاصلهٔ ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوهرتز چند ایستگاه رادیویی بدون باند محافظ جای می‌گیرد؟

۱) ۲۰ ۲) ۳۰ ۳) ۴۰ ۴) ۸۰

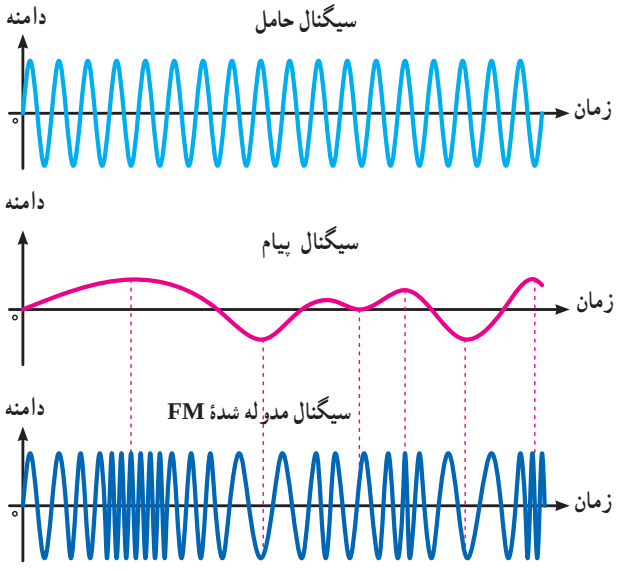
۲۱ـ۳ـ اشاره‌ای به مدولاسیون فرکانس (frequency modulation)

درصورتی‌که فرکانس سیگنال حامل، متناسب با تغییرات دامنهٔ پیام تغییر کند مدولاسیون فرکانس ایجاد می‌شود. در این حالت سرعت تکرار تغییرات فرکانس موج حامل متناسب با فرکانس پیام خواهد بود. مدولاسیون فرکانس را با FM نشان می‌دهند. درشکل ۴۲ــ۳ مدولاسیون FM با پیام سینوسی را نشان داده‌ایم. همان‌طورکه مشاهده می‌شود؛ هنگامی‌که دامنهٔ پیام صفر است، فرکانس موج مدوله شده برابر با موج حامل می‌شود. با افزایش دامنهٔ سیگنال پیام، فرکانس حامل افزایش می‌یابد (فشرده می‌شود) و با کاهش دامنهٔ پیام، فرکانس حامل کم می‌شود.



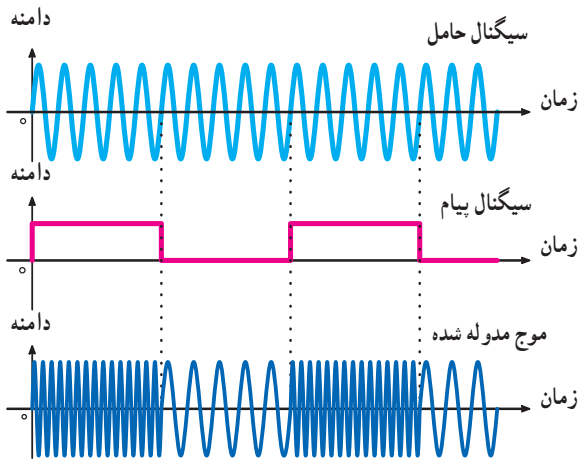
شکل ۴۲ــ۳ــ مدولاسیون FM با پیام سینوسی

شکل ۴۳ــ۳ــ یک پیام غیرسینوسی را که روی حامل به‌صورت FM مدوله شده است نشان می‌دهد.



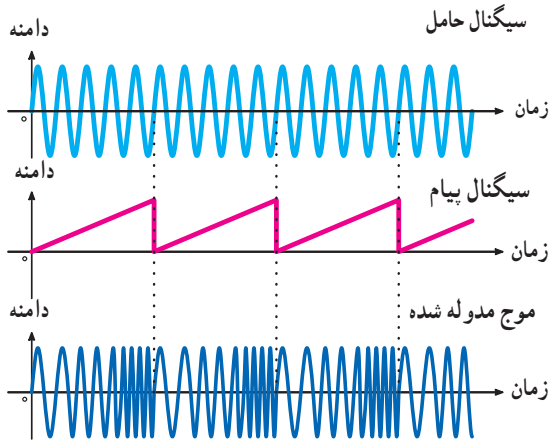
شکل ۴۳ــ۳ــ مدولاسیون FM با پیام غیرسینوسی

شکل ۴۴ــ۳ پیام مربعی که روی حامل سینوسی به‌صورت FMمدوله شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۴۴ــ۳ــ مدولاسیون FM با سیگنال پیام مربعی

شکل ۴۵ــ۳ پیام دندانه اره‌ای که روی حامل سینوسی به‌صورت FM مدوله شده است را نشان می‌دهد.

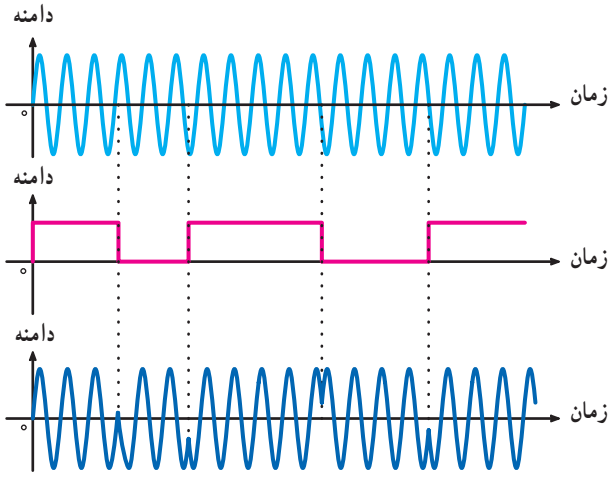


شکل ۴۵ــ۳ــ مدولاسیون FM با سیگنال پیام دندانه اره‌ای

۲۲ـ۳ـ مدولاسیون فاز (Phase Modulation)

اگر فاز سیگنال حامل متناسب با دامنهٔ سیگنال پیام تغییر کند مدولاسیون فاز به‌وجود می‌آید. در این حالت سرعت تکرار تغییرات فاز برابر با فرکانس پیام خواهد بود. مدولاسیون فاز از پاره‌ای جهات مشابهت‌هایی با مدولاسیون FM دارد. مدولاسیون فاز را با PM نشان می‌دهند (شکل ۴۶ــ۳).

سه نوع مدولاسیون AM ، FM و PM از انواع مدولاسیون‌های پیوسته یا آنالوگ‌اند. در صورتی که حامل یا پیام موج مربعی باشد، مدولاسیون دیجیتال و پالسی شکل می‌گیرد. چون هدف ما در این بخش کتاب تحلیل مدار گیرنده‌های رادیویی است، تأکید بر مدولاسیون‌های آنالوگ و بیشتر روی AM خواهیم داشت.



شکل ۴۶ــ۳ــ مدولاسیون فاز

تحقیق برای هنرجویان علاقه‌مند

در صورت امکان با استفاده از نرم‌افزارهایی که در دسترس دارید، شکل موج انواع مدولاسیون‌ها را با پیام مربعی و سینوسی، بازسازی و مشاهده کنید.

۲۳ـ۳ـ الگوی پرسش

کامل کردنی :

۱ــ در مدولاسیون فرکانس دامنهٔ حامل ..... است و فرکانس حامل متناسب با ..... پیام تغییر می‌کند.

چهار گزینه‌ای :

۲ــ در مدولاسیون فاز ..... حامل متناسب با ..... پیام تغییر می‌کند.

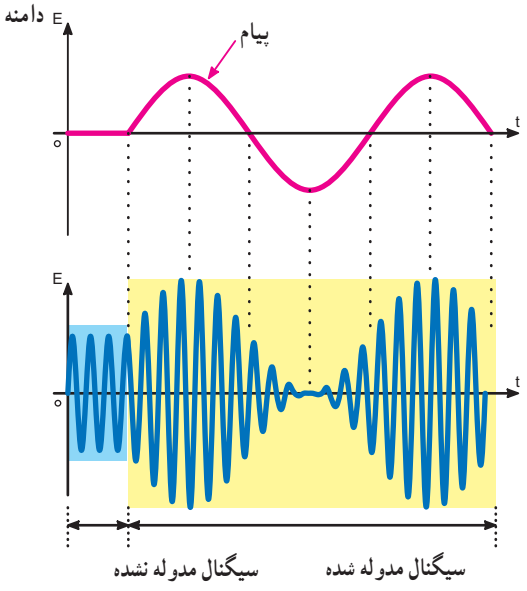
۱) فرکانس ــ دامنهٔ ۲) فاز ــ دامنهٔ

۳) فاز ــ فرکانس ۴) دامنهٔ ــ فاز

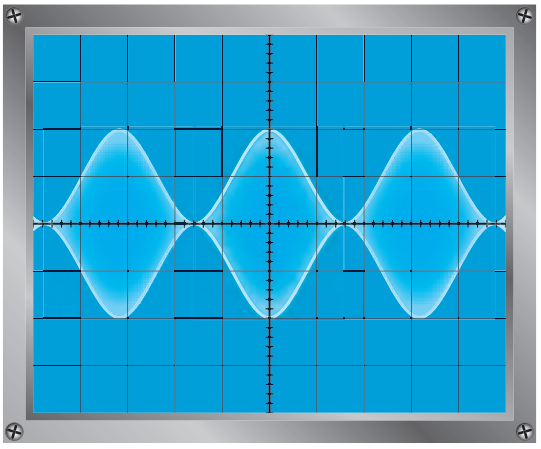
۳ــ مدولاسیون دامنه، فرکانس و فاز را تعریف کنید.

۴ــ شکل موج سیگنال AM، FM و PM را با موج پیام مربعی ترسیم کنید.

۵ــ در هر یک از شکل‌های ۳ــ۴۷ و ۳ــ۴۸ درصد مدولاسیون چه‌قدر است؟

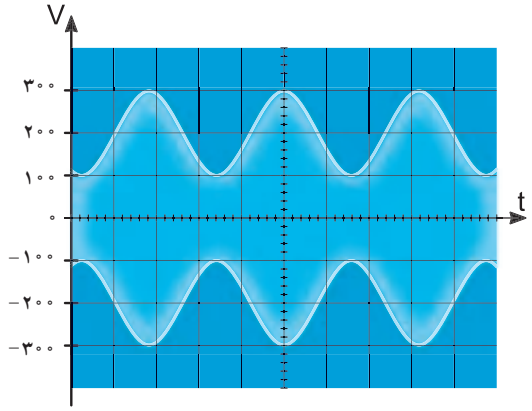


شکل ۳ــ۴۷



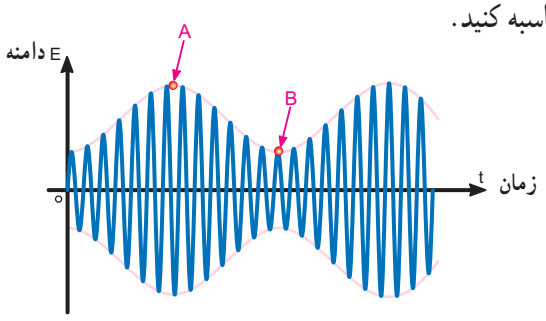
شکل ۳ــ۴۸

۶ــ در شکل ۳ــ۴۹ ضریب مدولاسیون را محاسبه کنید.



شکل ۳ــ۴۹

۷ــ اگر در شکل ۳ــ۵۰ دامنهٔ موج مدوله شده در نقطهٔ A سه برابر دامنهٔ موج مدوله شده در نقطهٔ B باشد و پیام دارای دامنه ۵۰ میلی‌ولت باشد، درصد مدولاسیون و دامنهٔ حامل را محاسبه کنید.



شکل ۳ــ۵۰

۳ـ۲۴ـ اشاره‌ای به مدولاسیون پالس (Pulse Modulation):

علاوه بر مدولاسیون آنالوگ، مدولاسیون‌های دیگری نیز وجود دارد که آن را مدولاسیون‌های پالسی می‌نامند.

در فصل دهم، دربارهٔ مدولاسیون‌های پالسی بحث خواهیم کرد.