

# فصل ۳

## مدولاسیون موج پیوسته (آنالوگ) و انواع آن‌ها

### هدف کلی

### آموزش مفاهیم مدولاسیون و علل استفاده آن در فرستنده‌های رادیویی

کل زمان اختصاص داده شده به فصل: ۹ ساعت آموزشی

#### زمان پیشنهادی

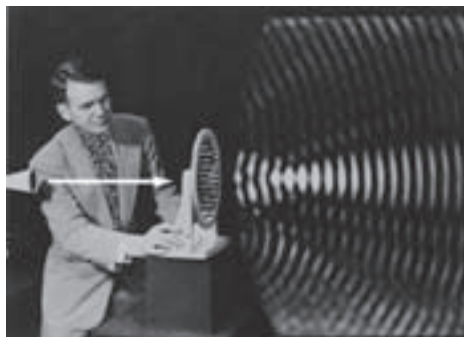
#### هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل از فراگیرنده انتظار می‌رود که:

- ۱- سیگنال صوتی را شرح دهد. ۱۰'
- ۲- نحوه انتشار صوت را در هوا توضیح دهد. ۱۰'
- ۳- سرعت صوت را توضیح دهد. ۵'
- ۴- دلایل استفاده از تقویت‌کننده را برای انتقال صوت به فواصل دور تشریح کند. ۱۰'
- ۵- دلایل استفاده نکردن از آمپلی‌فایر و بلندگو را برای انتقال صوت به فواصل خیلی دور (بین دو شهر) شرح دهد. ۱۰'
- ۶- دلایل استفاده نکردن از روش انتشار صوت به صورت امواج الکترومغناطیس از آنتن را، تشریح کند. ۱۵'
- ۷- دلایل استفاده از مدولاسیون را شرح دهد. ۲۰'
- ۸- مشخصات سیگنال پیام و سیگنال حامل یا کاربر را با ذکر فرمول آن تشریح کند. ۲۰'
- ۹- نحوه انجام عمل مدولاسیون را به‌طور عمومی و کلی تشریح کند. ۱۰'
- ۱۰- مدولاسیون را تعریف کند. ۱۰'
- ۱۱- مدولاسیون AM، FM و PM را تعریف کند و شکل موج آنها را ترسیم کند. ۴۰'
- ۱۲- معادله موج AM را بنویسد و مشخصات آن را تشریح کند. ۲۰'
- ۱۳- شاخص مدولاسیون را در حالات مختلف محاسبه و نتایج آن را بررسی کند. ۲۰'
- ۱۴- سیگنال‌های با مدولاسیون کم‌تر از صددرصد، صددرصد و بیش‌تر از صددرصد را با یکدیگر مقایسه کند. ۲۰'
- ۱۵- روش محاسبه درصد مدولاسیون را شرح دهد. ۱۵'
- ۱۶- طیف فرکانسی سیگنال AM را با سیگنال ساده مقایسه کند. ۱۰'
- ۱۷- طیف فرکانسی AM را در حوزه فرکانس ترسیم کند. ۱۰'
- ۱۸- طیف فرکانسی سیگنال AM را با استفاده از سیگنال مربعی و سیگنال صوتی شرح دهد. ۱۵'
- ۱۹- فرکانس‌های کناری بالا و پایین را شرح دهد. ۱۵'
- ۲۰- انواع روش‌های ارسال در مدولاسیون AM (VSB- ISB- SSB- DSB) را شرح دهد. ۱۵'
- ۲۱- توان در سیگنال AM را شرح دهد. ۱۰'
- ۲۲- توان در سیگنال AM را در انواع روش‌های ارسال مقایسه کند. ۱۰'
- ۲۳- پهنای باند سیگنال AM را شرح دهد و انواع آن را محاسبه کند. ۱۵'
- ۲۴- باند کناری بالا و پایین را توضیح دهد. ۱۰'
- ۲۵- محدوده فرکانس رادیویی AM تجاری را توضیح دهد. ۱۰'
- ۲۶- باند محافظ guard band را شرح دهد. ۱۰'
- ۲۷- تعداد ایستگاه‌های رادیویی را، که در یک باند فرکانسی AM تجاری جای می‌گیرد، بدون باند محافظ و با باند محافظ محاسبه کند. ۱۵'
- ۲۸- از نرم‌افزارها و فیلم‌های مرتبط برای درک بهتر مفاهیم استفاده کند.
- ۲۹- در فرایند اجرای آموزش متناسب با شرایط و محتوا، به آزمون‌های تکوینی، تشخیصی و پایانی پاسخ دهد.
- ۳۰- هدف‌های رفتاری در حیطه عاطفی که در فصل اول آمده است را در این فصل نیز رعایت کند.

## پیشگفتار

شکل ۲-۳ نحوه انتشار صوت را در هوا و شکل ۳-۳

نحوه پخش امواج صوتی و برخورد ملکول‌های هوا را به پرده گوش نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ نحوه انتشار صوت در هوا



شکل ۳-۳ نحوه برخورد ملکول‌های هوا به پرده گوش انسان

### نکته مهم

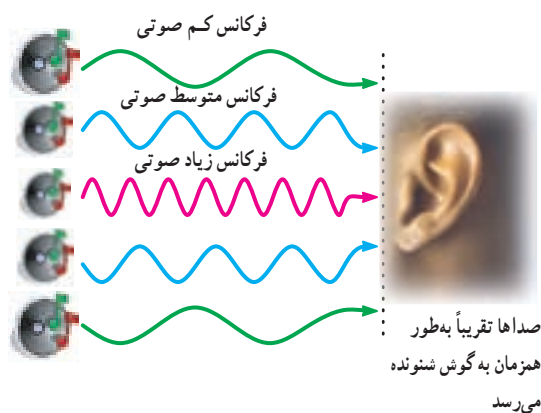
توجه داشته باشید که فشردگی ملکول‌های هوا یا باز شدن آنها از یکدیگر سبب انتقال ارتعاشات صوتی به گوش و شنیدن صدا می‌شود. لذا تعیین جهت مثبت یا منفی (نیم سیکل مثبت یا منفی مثلاً یک موج سینوسی) برای فشردگی و باز شدگی فرضی بوده و اثری روی میزان شنوایی ندارد. یعنی باز شدگی یا فشردگی حاصل از یک سیگنال سینوسی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

همان‌طور که 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 نحوه 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.

### ۳-۱- سیگنال صوتی و نحوه 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 عبوری که از خیابان عبور می‌کند، هشدار می‌دهیم.

امواج صوتی در محدوده فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز قرار دارند. شکل ۳-۱ که امواج صوتی با فرکانس‌های کم و متوسط و زیاد را نشان می‌دهد و گوش قادر به شنیدن این امواج است.



شکل ۳-۱ امواج صوتی با فرکانس‌های مختلف

برای انتشار امواج صوتی نیاز به محیطی مادی 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 حفره گوش به پرده گوش برخورد می‌کند و صدا شنیده می‌شود. هر قدر شدت صوت بیشتر باشد ارتعاشات قوی‌تر و صدا بلندتر است.

## ۳-۲- سرعت صوت

۳۴۰ متر در ثانیه در نظر گرفته می‌شود. F فرکانس صوت بر حسب هرتز است.



شکل ۳-۵- انتشار امواج در آب

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 در هوا در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ۳۴۳ متر بر ثانیه و در هوای صفر درجه سانتی‌گراد ۳۳۱ متر بر ثانیه است. سرعت صوت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۱۴۹۸ متر بر ثانیه و در آهن ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه است. در جدول ۳-۱ سرعت صوت در هوا و سایر اجسام را مشاهده می‌کنید.

جدول ۳-۱- 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 درجه سانتی‌گراد
m/sec	۱۴۹۸	آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد
m/sec	۶۰۰۰ تا ۵۰۰۰	آهن

## مثال ۳-۱

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

برای کمترین فرکانس صوتی

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{340 \text{ m/sec}}{20 \text{ Hz}} = 17 \text{ m}$$

برای بیشترین فرکانس صوتی

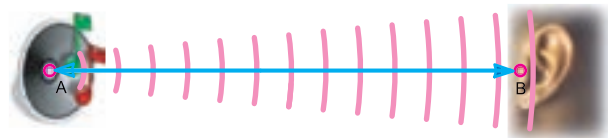
$$\lambda_r = \frac{V}{F_r} = \frac{340 \text{ m/sec}}{20,000 \text{ Hz}} = 17 \text{ mm}$$

## ۳-۳- انتقال صوت به فواصل دور توسط سیم یا کابل

فیزیولوژی حنجره انسان به گونه‌ای است که نمی‌تواند دامنه حاصل از تارهای صوتی را از حد معینی افزایش دهد. این محدودیت باعث می‌شود که برای انتقال صوت به فواصل دور (حدوداً تا ۵۰۰ متری) از دستگاه‌های تقویت‌کننده (آمپلی‌فایر) استفاده کنند. برای انتقال صوت از دستگاه آمپلی‌فایر به بلندگو به خط انتقال نیاز داریم. خط انتقالی که برای این منظور به کار می‌رود سیم یا کابل است (شکل ۳-۶). 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- تلفات توان و افت ولتاژ زیاد می‌شود.

اگر سرعت حرکت صوت در هوا را حدود ۳۴۰ متر در ثانیه در نظر بگیریم، چنانچه صوتی در نقطه A تولید شود، پس از یک ثانیه در فاصله ۳۴۰ متری شنیده می‌شود. در شکل ۳-۴ نحوه انتشار صوت در هوا نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- نحوه انتشار صوت در هوا

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

شکل ۳-۵ انتشار امواج را در آب نشان می‌دهد.

طول موج برای امواج صوتی از رابطه  $\lambda = \frac{V}{F}$  به دست می‌آید. در این رابطه V سرعت سیر صوت است که در هوا حدود

۸- صوت برای انتشار به محیط مادی نیاز دارد.

صحيح □ غلط □

چهار گزینه‌ای

۹- طول موج صوت با سرعت  $340 \text{ m/sec}$  و فرکانس

$8/5 \text{ KHZ}$  چند سانتی متر است؟

۴ (۱) ۲ (۲)

۴ (۳) ۰/۰۰۴ (۴)

### ۳-۵- 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 ۳-۷ 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.



آیا این امر امکان‌پذیر است؟

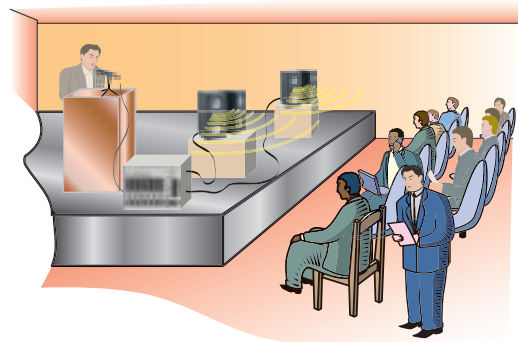
شکل ۳-۷- تبدیل امواج صوتی به امواج الکترومغناطیسی

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

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

ج- هزینه نصب و راه‌اندازی، تعمیرات و نگهداری آن زیاد است.

د- چون پیام پس از انتقال به وسیله بلندگو بخش می‌شود برای همه قابل استفاده است و نمی‌تواند محرمانه باشد. در ضمن اگر صوت به صورت مستقیم در فضا بخش شود موجب آزار مردم می‌شود و آلودگی صوتی را به وجود می‌آورد.



شکل ۳-۶- انتشار صوت از طریق دستگاه تقویت‌کننده، کابل و بلندگو برای فواصل دور

### ۳-۴- الگوی پرسش

تشریحی :

۱- در صورتی که فرکانس صوت برابر با  $6 \text{ kHz}$  باشد طول موج آن را حساب کنید.

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

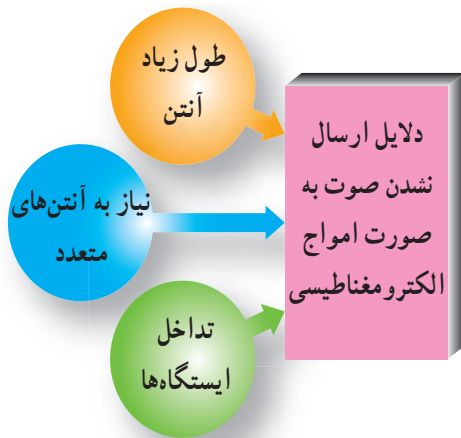
۳- چه عاملی سبب می‌شود صدا را بلندتر بشنویم؟ صحیح یا غلط

۴- سرعت صوت تقریباً چه قدر است؟

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

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

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



شکل ۸-۳- موانع مربوط به انتشار صوت به وسیله 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 اولین 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 محاسبه ساده اگر سرعت راه رفتن را ۵ کیلومتر در ساعت و فاصله تهران تا مشهد را ۹۶۰ کیلومتر در نظر بگیریم زمان مورد نیاز برابر است با:

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

$$= \frac{960 \text{ Km}}{5 \text{ Km/H}} = 192 \text{ ساعت} = 8 \text{ شبانه روز}$$

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

$$\text{ساعت} = 16 = \frac{960 \text{ Km}}{60 \text{ Km/H}} = \frac{\text{فاصله}}{\text{سرعت}}$$

در صورتی که فاصله 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 وسیله نقلیه زمان جابه‌جایی را کم می‌کند. بنابراین، انتخاب وسیله نقلیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اگر وسیله نقلیه را امواج الکترومغناطیسی در نظر بگیریم، با

الف- 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 ۲-۳ بیان‌گر این مسئله است.

ب- در صورتی که انتشار امواج صوتی از آنتن ممکن باشد، برای انتشار نیاز به آنتن بسیار بلند است. در مثال ۲-۳ طول آنتن  $\frac{\lambda}{4}$  برای امواج صوتی الکترومغناطیسی در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز محاسبه شده است.

### مثال ۲-۳

در صورتی که بخواهیم سیگنال صوتی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز را با استفاده از آنتن  $\frac{\lambda}{4}$  منتشر کنیم، طول آنتن چه قدر می‌شود؟

### پاسخ:

امواج الکترومغناطیسی که از آنتن  $\frac{\lambda}{4}$  پخش می‌شوند دارای سرعت سیری حدوداً برابر با سرعت نورند. بنابراین از رابطه  $\lambda = \frac{C}{F}$  استفاده می‌کنیم.

$$\text{طول موج} = \lambda = \frac{C}{F} = \frac{300000 \text{ km/s}}{20000 \text{ Hz}} = 15 \text{ km} = 15000 \text{ m}$$

$$\text{طول آنتن} = La = \frac{\lambda}{4} = \frac{15000}{4} = 3750 \text{ متر}$$

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

ج- با فرض این که 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 طول ۳۷۵۰ کیلومتر است.

د- 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 ۳-۸ موارد بالا به‌طور خلاصه و مصور نشان داده شده است.

### ۶-۳- الگوی پرسش

تشریحی :

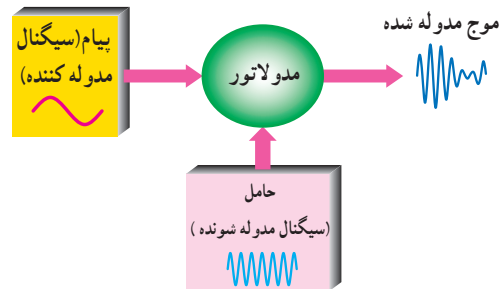
- ۱- چرا امواج صوتی را مستقیماً نمی‌توان به امواج الکترومغناطیسی تبدیل کرد؟
  - ۲- در صورتی که فرکانس تَن صوتی برابر با ۳ کیلوهرتز باشد طول آنتن  $\frac{\lambda}{4}$  برای انتشار آن چه قدر است؟
  - ۳- در صورتی که انتشار امواج صوتی از آنتن به صورت مستقیم میسر باشد، به چه دلیل نیاز به آنتن‌های متعدد داریم؟ محاسباتی :
  - ۴- اگر صوت به صورت امواج الکترومغناطیس در فضا انتشار یابد مسافت  $600 \text{ km}$  را در چه مدتی طی می‌کند؟ کامل کردنی :
  - ۵- سرعت امواج الکترومغناطیس حدود .... متر بر ..... است.
  - ۶- سیگنال مدوله کننده سیگنال ..... و سیگنال مدوله شونده سیگنال ..... است.
- چهارگزینه‌ای
- ۷- صوت با سرعت  $340 \text{ m/sec}$  مسافت  $1440$  متر را در چند ثانیه طی می‌کند؟

۱ (۱)    ۲ (۲)    ۳ (۳)    ۴ (۴)

توجه به این که سرعت امواج الکترومغناطیسی حدوداً برابر با سرعت نور است، زمان طی شده توسط این امواج به فاصله دور مثلاً  $960$  کیلومتر، بسیار کوتاه خواهد شد.

$$\text{زمان طی شده توسط امواج الکترومغناطیسی} = \frac{\text{فاصله}}{\text{سرعت}} = \frac{960 \text{ km}}{300000 \text{ km/sec}} = 3200 \mu\text{s}$$

پس اگر سیگنال صوتی را روی سیگنال دیگری که به عنوان وسیله نقلیه استفاده می‌شود سوار کنیم و به صورت 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، (کاربر carrier) یا سیگنال مدوله شونده (Modulation signal) نام دارد. به مدار یا دستگاهی که این عمل را انجام می‌دهد. مدولاتور (Modulator) می‌گویند. شکل ۹-۳ نحوه انجام مدولاسیون را به صورت بلوکی نشان می‌دهد.



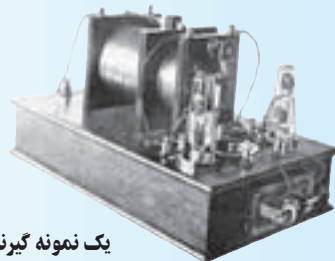
شکل ۹-۳- بلوک دیاگرام نحوه انجام مدولاسیون



لی دوفارست

برای کسب اطلاعات بیشتر به سایت دانشمندان مراجعه کنید.

لی دوفارست Lee De Forest 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. این دانشمند در سال ۱۹۶۱ چشم از جهان فرو بست او مخترع اولین گیرنده رادیویی است.



یک نمونه گیرنده



نمونه‌ای از گیرنده‌های اولیه رادیویی

دو نمونه گیرنده رادیویی ساخته شده توسط دوفارست

### ۳-۷- 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- 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 ۳-۳

در صورتی که فرکانس حامل برابر با  $10^6$  مگاهرتز باشد، طول آنتن  $\frac{\lambda}{4}$  را به دست آورید.

#### پاسخ

$$\lambda = \frac{C}{F} = \frac{300000000 \times 10^3 \text{ m/s}}{100 \times 10^6 \text{ Hz}} = 3 \text{ متر}$$

$$La = \frac{\lambda}{4} = \frac{3}{4} = 0.75 \text{ m} = 75 \text{ سانتی متر}$$

مثال ۳-۳ را با مثال ۳-۲ مقایسه کنید. در مثال ۳-۲ برای انتشار مستقیم سیگنال صوتی نیاز به آنتنی به طول  $375^\circ$  متر است؛

جدول ۳-۲- مزایای استفاده از سیگنال RF به عنوان حامل

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

### ۳-۸- الگوی پرسش

#### صحیح یا غلط

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

صحیح  غلط

۲- مزایای استفاده از سیگنال RF را به عنوان حامل

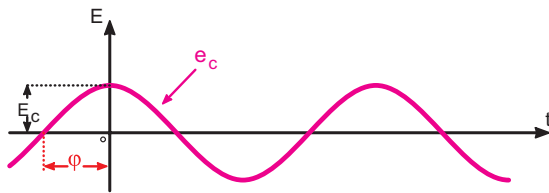
بیان کنید.

#### خلاقیت

#### بسازید و جایزه بگیرید

#### ویژه هنرجویان علاقه‌مند

با استفاده از دورریزها و وسایل معمولی موجود در خانه، دستگاهی بسازید که بدون استفاده از الکتریسیته و مشابه تلفن صدا را به فاصله  $10^\circ$  تا  $20^\circ$  متری انتقال دهد.



$$e_c = E_c \sin(2\pi F_c t + \phi)$$

دامنه لحظه‌ای = دامنه ماکزیمم  $\sin$  ( فرکانس  $t$  + فاز )

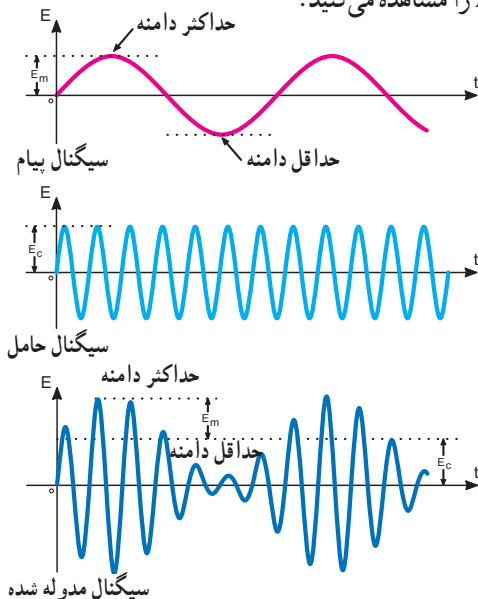
شکل ۱-۳- مشخصه‌های اصلی سیگنال حامل و معادله موج

### ۲-۹-۳- تعریف مدولاسیون: مدولاسیون عبارت است از

کنترل یکی از مشخصه‌های اصلی حامل توسط پیام، به طوری 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 مشخصه 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.

### ۳-۹-۳- مدولاسیون دامنه: در مدولاسیون دامنه

(Amplitude Modulation)، فرکانس موج حامل (کاربر) ثابت است و دامنه 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 ۱۱-۳ سیگنال پیام سینوسی، سیگنال حامل سینوسی و سیگنال مدوله شده AM را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۱-۳- سیگنال AM

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

۴- به چه دلیل باید فرکانس حامل را زیاد انتخاب کرد؟ محاسباتی:

۵- در صورتی که فرکانس حامل برابر با  $120^\circ$  کیلوهرتز باشد، طول آنتن  $\frac{\lambda}{4}$  را به دست آورید.

۶- چند مثال دیگر برای محاسبه طول آنتن در محدوده باند فرکانس FM طراحی و حل کنید.

### ۳-۹-۳- 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؛ به عبارت دیگر، در هنگام انجام مدولاسیون یکی از مشخصه‌های سیگنال حامل متناسب با پیام تغییر می‌کند.

### ۱-۹-۳- مشخصه‌های سیگنال حامل:

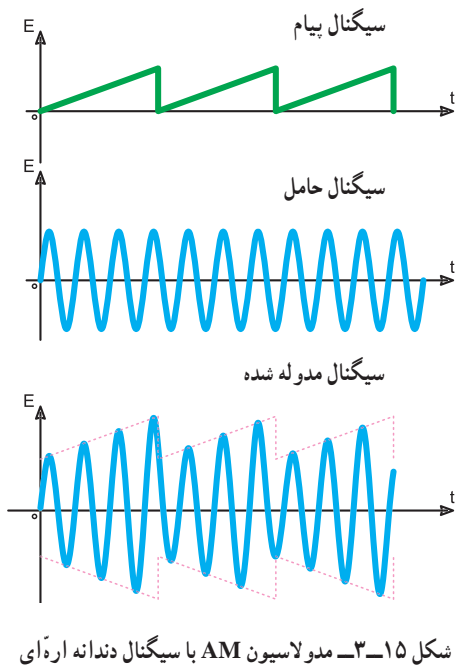
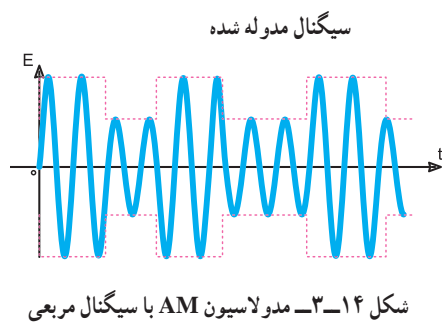
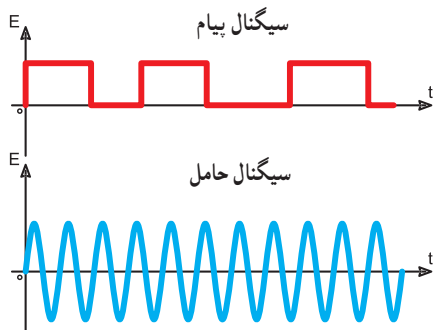
معمولاً به دو صورت مربعی یا سینوسی تولید می‌شود. در فرستنده‌های محلی معمولاً از سیگنال سینوسی به عنوان حامل استفاده می‌کنند. بنابراین بحث ما بیشتر درباره‌ی حامل سینوسی خواهد بود. می‌دانیم که هر سیگنال سینوسی دارای سه مشخصه اصلی به شرح زیر است:

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

در شکل ۱-۳ سیگنال حامل را با ذکر معادله موج و مشخصه‌های اصلی آن مشاهده می‌کنید.



در شکل‌های ۳-۱۴ و ۳-۱۵ پیام‌های مربعی و دندانه  
اره‌ای که به صورت AM روی حامل سینوسی مدوله شده‌اند  
نشان داده شده است.

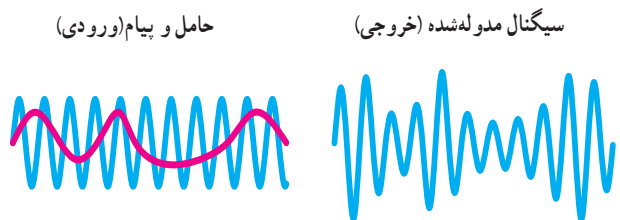
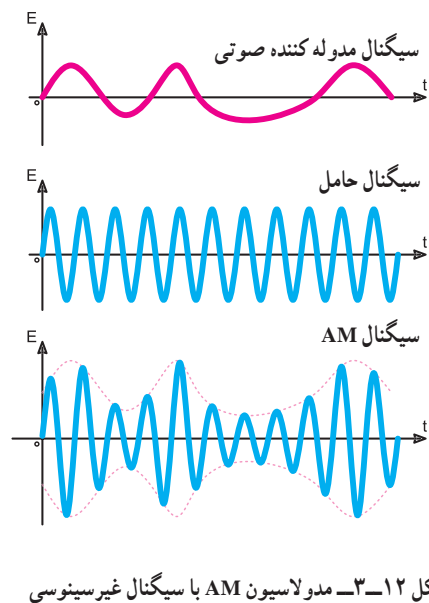


شکل‌های ۳-۱۶ الف و ب، نشان می‌دهد که سرعت  
تغییرات دامنه حامل به فرکانس پیام بستگی دارد.  
شکل (الف) موج پیام را با پریود ۸ میلی ثانیه (فرکانس

## آزمایشگاه مجازی قابل توجه 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 ۳-۱۲ و ۳-۱۳ دو نوع پیام غیر سینوسی  
و حامل سینوسی و موج مدوله شده AM مربوط به آنها را  
مشاهده می‌کنید.



شکل ۳-۱۳ - مقایسه ترکیب پیام و حامل در مدولاسیون AM با سیگنال  
غیر سینوسی

### ۳-۱۰- معادله موج AM

اگر پیام و حامل را به صورت موج سینوسی در نظر بگیریم معادله پیام و حامل به صورت معادله ۳-۱ و ۳-۲ است.

$$e_m = E_m \sin \omega_m t \quad 3-1$$

$$e_c = E_c \sin \omega_c t \quad 3-2$$

توجه داشته باشید که زاویه 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.

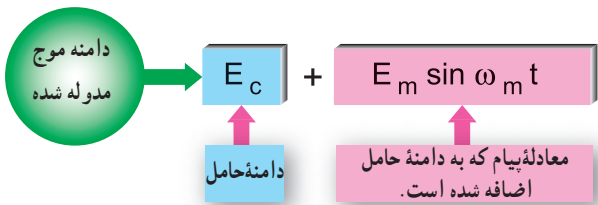
برای به دست آوردن معادله موج مدوله شده AM باید معادله پیام روی دامنه حامل اثر بگذارد. لذا در معادله موج حامل که به صورت  $e_c = E_c \sin \omega_c t$  است معادله پیام فقط با  $E_c$  جمع می‌شود و دامنه حامل جدیدی را به صورت

$$E'_c = E_c + E_m \sin \omega_m t \quad (3-17)$$

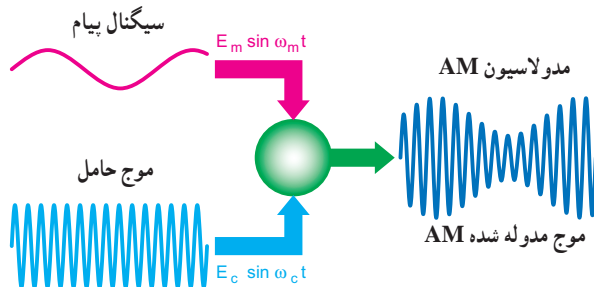
لذا معادله موج مدوله شده به صورت معادله ۳-۳ در می‌آید.

$$e_{mod} = (E_c + E_m \sin \omega_m t) \cdot \sin \omega_c t \quad 3-3$$

در شکل ۳-۱۸ سیگنال پیام و سیگنال حامل و موج مدوله شده را مشاهده می‌کنید.



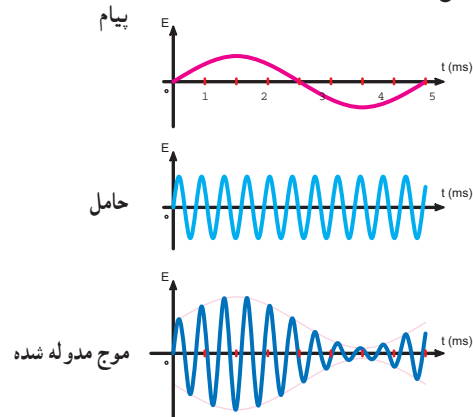
شکل ۳-۱۷- بلوک دیاگرام معادله موج مدوله شده



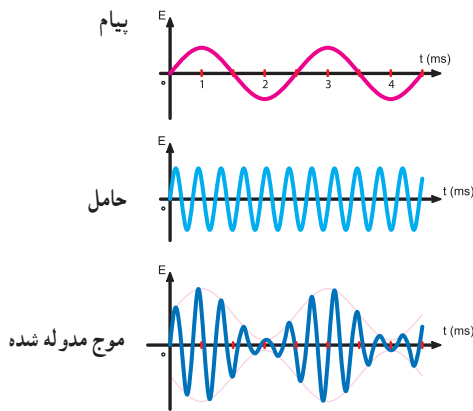
شکل ۳-۱۸- سیگنال‌های پیام، حامل و موج مدوله شده

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 دامنه موج حامل در شکل ۳-۱۶ ب، دو برابر سرعت تغییرات دامنه موج حامل در شکل ۳-۱۶ الف، است.



الف) فرکانس پیام ۱۲۵ هرتز

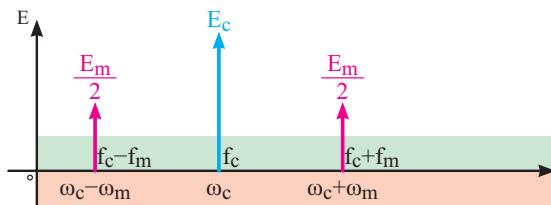


ب) فرکانس پیام ۲۵۰ هرتز

شکل ۳-۱۶- تأثیر فرکانس پیام روی موج مدوله شده AM

## آزمایشگاه مجازی قابل توجه 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.



شکل ۱۹-۳ طیف موج مدوله شده AM

فرکانس مجموع حامل و پیام (فرکانس کناری

$$f_c + f_m = \text{بالا}$$

فرکانس تفاضل حامل و پیام (فرکانس کناری

$$f_c - f_m = \text{پایین}$$

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

در صورت حل معادله ۳-۳ 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 ۱۹-۳ خواهد بود. با استفاده از دستگاه طیف‌نما می‌توانید این طیف فرکانسی را مشاهده کنید.

$$e_{\text{mod}} = (E_c + E_m \sin \omega_m t) \cdot \sin \omega_c t \quad 3-4$$

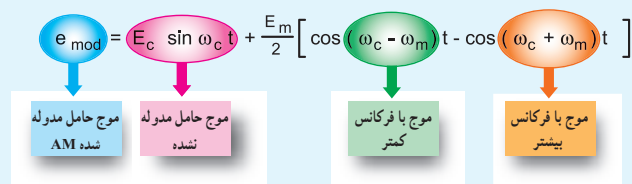
$$e_{\text{mod}} = E_c \sin \omega_c t + E_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t$$

با توجه به رابطه مثلثاتی

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

می‌توان معادله موج مدوله شده را به صورت زیر نشان داد:

$$e_{\text{mod}} = E_c \sin \omega_c t + \frac{E_m}{2} [\cos(\omega_c - \omega_m)t - \cos(\omega_c + \omega_m)t] \quad 3-5$$



مشاهده می‌شود معادله موج مدوله شده AM شامل سه قسمت است.

(الف) موج حامل مدوله نشده (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

### قابل توجه مهربی محترم

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

## فکر کنید:

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

## پاسخ

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، دامنه حامل برابر با  $50^\circ$  ولت و دامنه پیام برابر با  $30^\circ$  ولت است. در اثر مدولاسیون دامنه حامل در نیم سیکل مثبت پیام از  $50^\circ$  ولت به  $80^\circ = 50^\circ + 30^\circ$  ولت افزایش و در نیم سیکل منفی از  $50^\circ$  ولت به  $20^\circ = 50^\circ - 30^\circ$  ولت کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر سیگنال پیام به طور لحظه‌ای با دامنه حامل جمع می‌شود. بنابراین، داریم:

$$E_c = 50^\circ \text{ V} \quad \text{دامنه حامل}$$

$$E_m = 30^\circ \text{ V} \quad \text{دامنه پیام}$$

$$m = \frac{E_m}{E_c} = \frac{30^\circ}{50^\circ} = 0.6 \quad \text{ضریب مدولاسیون}$$

**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 ۳-۵

درصد مدولاسیون را برای شکل ۳-۲ در مثال ۳-۴ به دست آورید:

$$M = m_p = \frac{E_m}{E_c} \times 100$$

$$M = m_p = \frac{30^\circ}{50^\circ} \times 100 = 60\%$$

– 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 مدوله شده اشکال به وجود می‌آورد. به طور کلی برای مدولاسیون سه درجه بندی به شرح زیر تعریف می‌شود.

– مدولاسیون کمتر از صد درصد

less than hundred percent modulation

## ۱-۱-۳- شاخص و درصد مدولاسیون: (Modulation index)

۱-۱-۳-۱- **تعریف شاخص مدولاسیون:** نسبت دامنه سیگنال پیام به سیگنال حامل را شاخص مدولاسیون یا ضریب مدولاسیون می‌نامند. اگر دامنه ماکزیمم حامل  $E_c$  و دامنه ماکزیمم پیام  $E_m$  باشد، شاخص مدولاسیون برابر است با:

$$3-6 \quad m = \frac{E_m}{E_c} = \frac{\text{دامنه پیام}}{\text{دامنه حامل}}$$

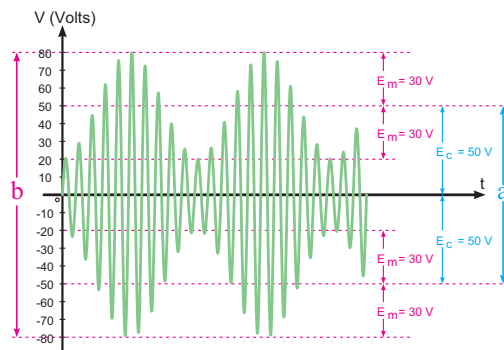
## ۱-۱-۳-۲ درصد مدولاسیون

(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 ۳-۷).

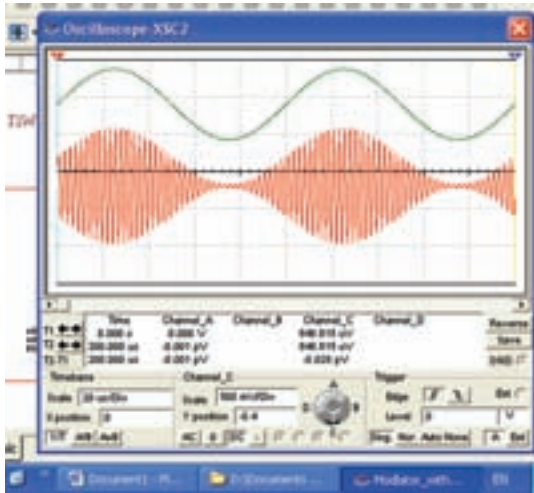
$$3-7 \quad M = m_p = \frac{E_m}{E_c} \times 100$$

## مثال ۳-۴

ضریب مدولاسیون را با توجه به شکل ۳-۲ به دست آورید.

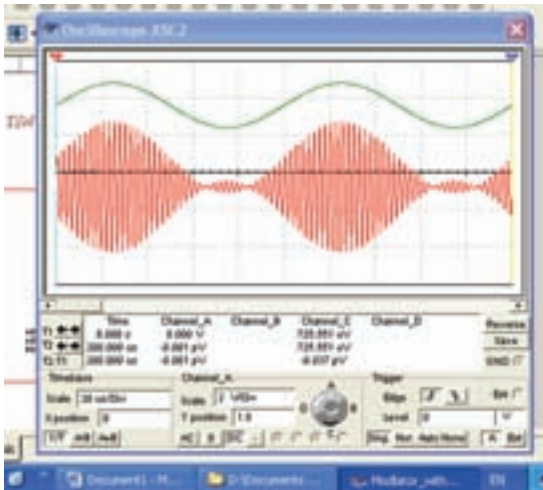
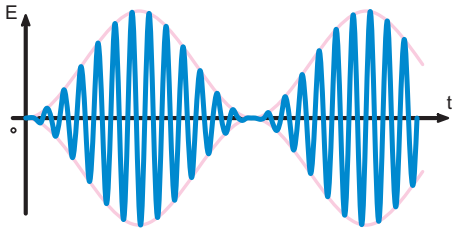


شکل ۳-۲- محاسبه ضریب مدولاسیون



شکل ۳-۲۲- مدولاسیون ۱۰۰٪

۳-۱۱-۵- مدولاسیون بیشتر از صد درصد (More than hundred percent modulation): در صورتی که دامنه پیام بیشتر از دامنه حامل باشد، مدولاسیون بیشتر از صد درصد حاصل خواهد شد (شکل ۳-۲۳). 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 به وجود می‌آید.



شکل ۳-۲۳- مدولاسیون بیشتر از ۱۰۰٪

– مدولاسیون صد درصد

one hundred percent modulation

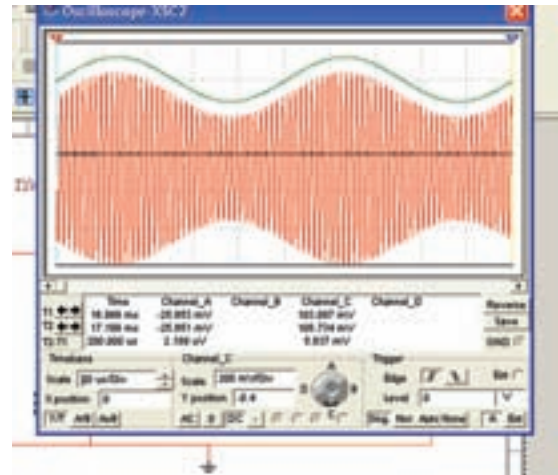
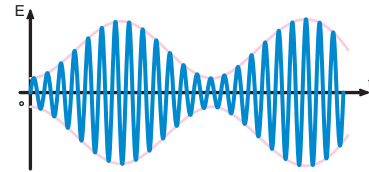
– مدولاسیون بیشتر از صد درصد

more than hundred percent modulation

۳-۱۱-۳- مدولاسیون کمتر از صد درصد

(Less than hundred percent modulation): در این

نوع مدولاسیون، دامنه حامل هرگز به صفر نمی‌رسد. به عبارت دیگر دامنه پیام کمتر از حامل است (شکل ۳-۲۱).

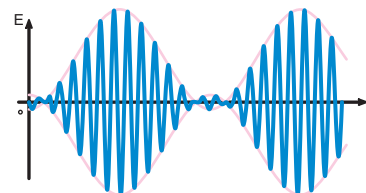


شکل ۳-۲۱- مدولاسیون کمتر از ۱۰۰٪

۳-۱۱-۴- مدولاسیون صد درصد

(one hundred percent modulation): در این

درجه‌بندی از مدولاسیون، دامنه سیگنال حامل در یک لحظه کوتاه به صفر می‌رسد، (شکل ۳-۲۲). این شرایط هنگامی پدید می‌آید که دامنه حامل و دامنه پیام با هم برابر باشند.



## نکته مهم

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

## ۳-۱۲- الگوی پرسش

کامل کردنی:

۱- معادله موج مدوله شده AM به صورت  $e_m = (E_c + \dots) \sin \omega_c t$  است.

کوتاه پاسخ:

۲- فرمول شاخص مدولاسیون را بنویسید.

چهار گزینه‌ای:

۳- در مورد مدولاسیون AM کدام گزینه صحیح است؟

(۱) دامنه کریر متناسب با فرکانس پیام تغییر می‌کند.

(۲) سرعت تغییر فرکانس کریر متناسب با دامنه پیام است.

(۳) دامنه کریر متناسب با دامنه پیام تغییر می‌کند.

(۴) سرعت تغییر دامنه کریر متناسب با دامنه پیام است.

تشریحی:

۴- مشخصه‌های سیگنال حامل و پیام را با ذکر معادلات

آن نام ببرید.

۵- امواج با مدولاسیون ۱۰۰٪، کمتر از ۱۰۰٪ و بیشتر

از ۱۰۰٪ را شرح دهید.

۶- ضریب مدولاسیون را تعریف کنید و تفاوت آن را با

درصد مدولاسیون بنویسید.

۷- به چه دلیل از مدولاسیون بیشتر از ۱۰۰٪ نمی‌توان

استفاده کرد؟

۸- تعدادی شکل موج سیگنال AM با دامنه‌های مختلف

ترسیم کنید و میزان شاخص مدولاسیون را به دست آورید.

## ۳-۱۳- طیف فرکانسی سیگنال AM

در صورتی که یک سیگنال AM با فرکانس حامل  $F_c$  و پیام

به صورت  $F_m$  صوتی با فرکانس  $F_m$  و ضریب مدولاسیون  $m$  را به ورودی دستگاه طیف نما متصل کنیم، روی صفحه دستگاه طیف نما فرکانس‌هایی به شرح زیر ظاهر می‌شود:

فرکانس حامل  $F_c$

مجموع فرکانس‌های حامل و پیام  $F_c + F_m$

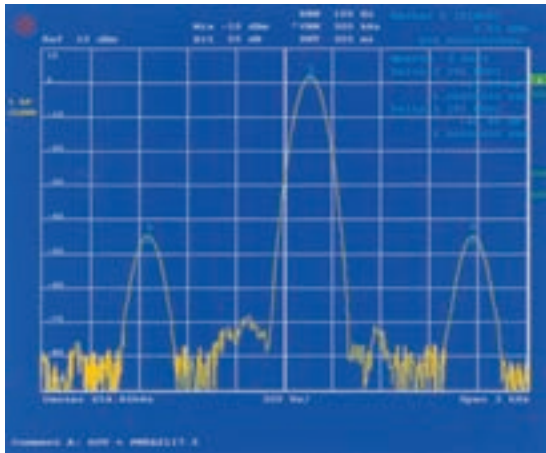
تفاضل فرکانس‌های حامل و پیام  $F_c - F_m$

مجموعه فرکانس‌های فوق را طیف فرکانسی سیگنال AM

می‌نامند. در طیف فرکانسی دامنه سیگنال حامل برابر با  $E_c$  و دامنه

فرکانس‌های  $F_c + F_m$  و  $F_c - F_m$  هر کدام برابر با  $\frac{mE_c}{2}$  است.

شکل ۲۴-۳ طیف فرکانسی سیگنال AM را نشان می‌دهد.



شکل ۲۴-۳- طیف فرکانسی AM

همان‌طور که 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 (Upper Side Frequency) USF و فرکانس تفاضل را فرکانس کناری پایین (Lower Side Frequency) LSF می‌نامند.

## مثال ۳-۶

یک سیگنال حامل با فرکانس  $75^\circ$  کیلوهرتز توسط یک موج سینوسی خالص با فرکانس ۳ کیلوهرتز مدوله می‌شود. مقادیر فرکانس‌های موجود در طیف فرکانسی را به دست آورید. کدام فرکانس، فرکانس کناری بالا و کدام فرکانس، فرکانس کناری پایین است؟

۱- مقادیر فرکانس و دامنه طیف فرکانسی با استفاده از روابط ریاضی قابل محاسبه است.

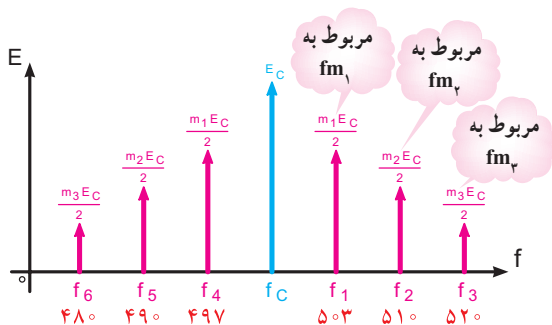
دامنه فرکانس‌های کناری، بستگی به ضریب مدولاسیون  $m$  و  $E_c$  دارد. طیف سیگنال مدوله شده حاوی هفت فرکانس به شرح زیر است:

$F_c \Rightarrow$  فرکانس حامل

$F_1, F_2, F_3 \Rightarrow$  فرکانس‌های کناری بالا

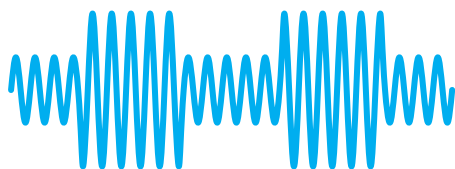
$F_4, F_5, F_6 \Rightarrow$  فرکانس‌های کناری پایین

در شکل ۲۶-۳ طیف فرکانسی نشان داده شده است.

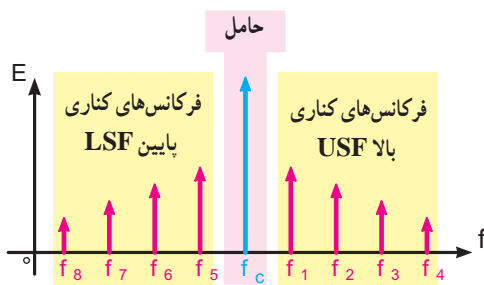


شکل ۲۶-۳- طیف فرکانسی حاصل از سیگنال پیام مرکب

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 به وجود می‌آید، خواهیم داشت. در شکل ۲۷-۳ طیف فرکانسی یک موج مدوله شده را، که پیام آن یک سیگنال مربعی است مشاهده می‌کنید.



الف- سیگنال مدوله شده AM



ب- طیف فرکانسی

شکل ۲۷-۳- طیف فرکانسی حاصل از مدولاسیون موج مربعی

$$F_c = 75 \text{ KHz}$$

$$F_m = 3 \text{ KHz}$$

$$F_c + F_m = 75 \text{ KHz} + 3 \text{ KHz} = 78 \text{ KHz}$$

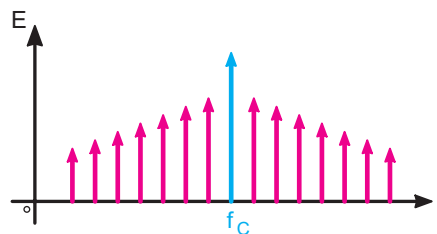
$$F_c - F_m = 75 \text{ KHz} - 3 \text{ KHz} = 72 \text{ KHz}$$

$$LSF = 72 \text{ KHz} \quad \text{فرکانس کناری پایین}$$

$$USF = 78 \text{ KHz} \quad \text{فرکانس کناری بالا}$$

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

شکل ۲۵-۳ مجموعه طیف فرکانسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲۵-۳- مجموعه طیف فرکانسی

### مثال ۷-۳

سیگنال پیامی شامل فرکانس‌های  $F_{m1} = 3 \text{ KHz}$ ،  $F_{m2} = 1 \text{ KHz}$  و  $F_{m3} = 2 \text{ KHz}$  است. در صورتی که این سیگنال‌ها را روی حامل  $F_c = 50 \text{ KHz}$  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؟ دامنه طیف فرکانسی بستگی به چه عواملی دارد؟

$$F_1 = F_c + F_{m1} = 50 + 3 = 53 \text{ KHz}$$

$$F_2 = F_c + F_{m2} = 50 + 1 = 51 \text{ KHz}$$

$$F_3 = F_c + F_{m3} = 50 + 2 = 52 \text{ KHz}$$

$$F_4 = F_c - F_{m1} = 50 - 3 = 47 \text{ KHz}$$

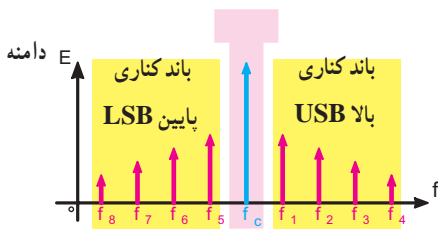
$$F_5 = F_c - F_{m2} = 50 - 1 = 49 \text{ KHz}$$

$$F_6 = F_c - F_{m3} = 50 - 2 = 48 \text{ KHz}$$

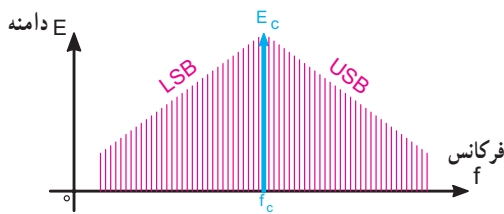
### ۱۵-۳- باندهای کناری سیگنال AM

همان طور که در مثال ۷-۳ بیان شد، در صورتی که سیگنال مدوله کننده (پیام) از چند سیگنال سینوسی تشکیل شده باشد، در صورت انجام مدولاسیون هر یک از سیگنال ها به تنهایی یک طیف فرکانسی را به وجود می آورد. در این حالت تعداد فرکانس های کناری بالا و پایین بیشتر از یک فرکانس می شود و باند فرکانسی را تشکیل می دهد. از مجموع فرکانس های پیام و حامل، باند کناری بالا (Upper Side Band)(USB) و از تفاضل فرکانس های پیام و حامل، باند کناری پایین (Lower Side Band) (LSB) شکل می گیرد (شکل ۲۸-۳).

اگر تعداد فرکانس های پیام آن قدر زیاد شود که مؤلفه های فرکانس های کناری بالا و پایین به هم بچسبند، باند فرکانسی پیوسته تشکیل می شود (شکل ۲۹-۳).



شکل ۲۸-۳ باندهای کناری بالا و پایین



شکل ۲۹-۳ باند فرکانسی پیوسته

#### ۱-۱۵-۳- پهنای باند (Band width) سیگنال

**مدوله شده:** پهنای باند عبارت از محدوده فرکانس هایی است که در فاصله بین کمترین فرکانس کناری پایین و بیشترین فرکانس کناری بالا قرار می گیرد. پهنای باند از رابطه ۸-۳ به دست می آید.

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

۳-۸

که در آن

### آزمایشگاه مجازی

توصیه می شود، با استفاده از دستگاه طیف نمای موجود در نرم افزار آموزشی، طیف فرکانسی شکل ۲۵-۳ را نمایش دهید.

### ۱۴-۳- الگوی پرسش

- ۱- در صورتی که سیگنال مدوله کننده یک سیگنال سینوسی ساده باشد، طیف فرکانسی موج مدوله شده را رسم کنید.
- ۲- فرکانس های USB و LSF را تعریف کنید.
- ۳- در صورتی که  $F_c = 600 \text{ KHz}$ ،  $E_c = 10 \text{ V}$  و  $m = 0.3$  باشد، مقدار دامنه فرکانس های کناری بالا و پایین چند ولت است؟ مقدار فرکانس های کناری بالا و پایین، در صورتی که  $F_m = 2 \text{ KHz}$  باشد، برابر با چند کیلوهرتز است؟
- ۴- طیف فرکانسی حاصل از مدولاسیون سه سیگنال سینوسی با یک حامل را رسم کنید.
- ۵- در صورتی که سیگنال پیام یک سیگنال غیرسینوسی باشد به چه دلیل در سیگنال AM یک طیف فرکانسی تشکیل می شود؟
- ۶- 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 نرم افزار به دست آورید.
- صحیح یا غلط
- ۷- دامنه فرکانس های کناری در طیف موج مدوله شده

AM برابر با  $\frac{E_m}{E_c}$  است. صحیح  غلط

#### چهارگزینه ای

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

۶۸۸ (۱)      ۷۰۰ (۲)

۷۱۲ (۳)      ۷۲۴ (۴)



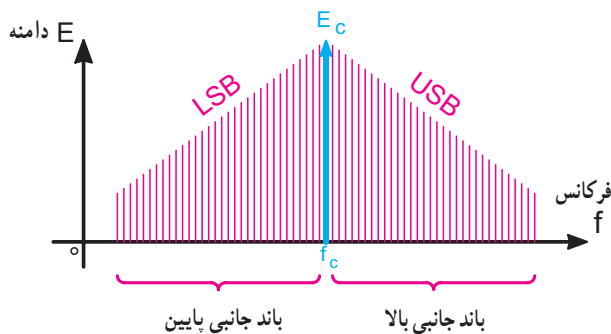
چون دامنه  $E_c$  نیز در طیف فرکانسی AM ظاهر می شود بنابراین موج مدوله شده AM دارای توانی بیشتر از توان موج حامل قبل از انجام مدولاسیون است. مقدار کل توان از رابطه از رابطه زیر به دست می آید.

$$P_T = \frac{E_c^2}{R} + \frac{E_{LSF}^2}{R} + \frac{E_{USF}^2}{R}$$

توان کل  
موج AM
توان موج  
حامل
توان فرکانس  
جانبی پایین
توان فرکانس  
جانبی بالا

در محاسبه توان تمام ولتاژها مؤثر در نظر گرفته می شوند و R مقاومتی نظیر مقاومت آنتن است که توان در آن تلف می شود. با توجه به رابطه ۳-۱۲ اثبات می شود 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 این که 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 صرفه جویی می شود. این عمل از طریق فراهم آوردن انواع روش های ارسال امواج AM امکان پذیر می شود.

از آنجایی که معمولاً پیام ارسالی سینوسی خالص نیست لذا امواج مدوله شده AM غالباً دارای طیف فرکانسی اند. بنابراین به جای ارسال فرکانس جانبی بالا و پایین، باند فرکانس بالا و پایین ارسال می شود. شکل ۳-۳۱ موقعیت فرکانس حامل و باند جانبی بالا و پایین را نشان می دهد.



شکل ۳-۳۱- نمایش موقعیت فرکانس حامل و باند جانبی بالا و پایین

پهنای باند برحسب هرتز، کیلوهرتز یا مگاهرتز  $BW =$   
 بالاترین فرکانس باند کناری بالا  $F_{USB} =$   
 پایین ترین فرکانس باند کناری پایین  $F_{LSB} =$   
 پهنای باند را با روش دیگری نیز می توان محاسبه کرد. با فرمول پهنای باند شروع می کنیم:

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

$$F_{USB} = F_c + F_m \max \quad 3-9$$

$$F_{LSB} = F_c - F_m \max \quad 3-10$$

معادلات ۳-۹ و ۳-۱۰ را در معادله ۳-۸ قرار می دهیم:

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

$$BW = 2F_m \max \quad 3-11$$

با توجه به معادله ۳-۱۱ در می یابیم که پهنای باند دو برابر بیشترین فرکانس پیام است. به عبارت دیگر، در سیگنال AM پهنای باند دو برابر فرکانس پیام است. در فرستنده های AM تجارتي پهنای باند را ده کیلوهرتز در نظر می گیرند. بنابراین، سیگنال پیام نباید از ۵ کیلوهرتز بیشتر شود. بدین ترتیب بیشترین فرکانس پیام در فرستنده های AM برابر ۵ کیلوهرتز است.

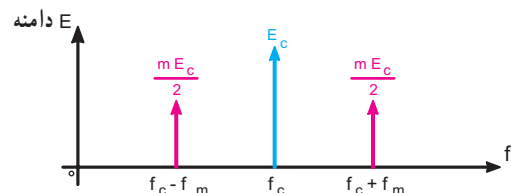
### مثال ۳-۸

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 چه قدر خواهد شد؟

$$BW = 2F_m = 10 = 2 \times 5 \text{ kHz}$$

### ۳-۱۶- توان در موج مدوله شده AM

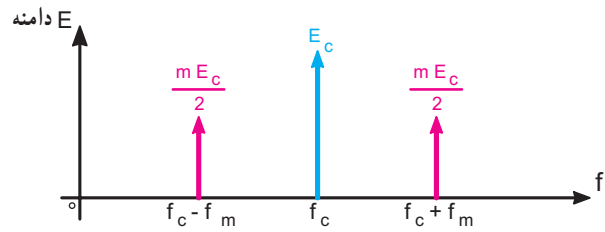
همان طور که نشان داده شد، طیف فرکانسی موج مدوله شده AM با پیام به صورت سینوسی خالص، شامل موج حامل مدوله نشده و دو مؤلفه فرکانس های جانبی بالا و پایین است. شکل ۳-۳۰ موج حامل و فرکانس های جانبی بالا و پایین را نشان می دهد.



شکل ۳-۳۰- نمایش موج حامل و فرکانس های جانبی بالا و پایین

### ۱۷-۳- 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 ۳-۳۲ طیف موج مدوله شده AM را نشان می‌دهد.



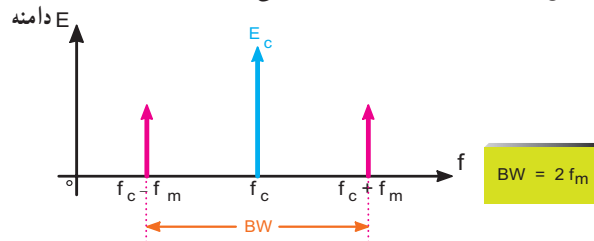
شکل ۳-۳۲ طیف موج مدوله شده AM

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 به وجود می‌آید:

#### ۱-۱۷-۳- ارسال مدولاسیون دامنه به صورت کامل

(Amplitude Modulation-full Carrier) AM-FC:

این روش هر دو فرکانس جانبی بالا و پایین و سیگنال حامل ارسال می‌شود. این روش مدولاسیون در فرستنده رادیویی تجارتي به کار می‌رود. پهنای باند در این روش  $2F_m$  است. شکل ۳-۳۳ فرکانس حامل و فرکانس‌های جانبی بالا و پایین و پهنای باند را در روش ارسال به صورت DSBFC نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۳ طیف موج مدوله شده به روش AM-FC

#### ۲-۱۷-۳- ارسال مدولاسیون دامنه به روش دو باند

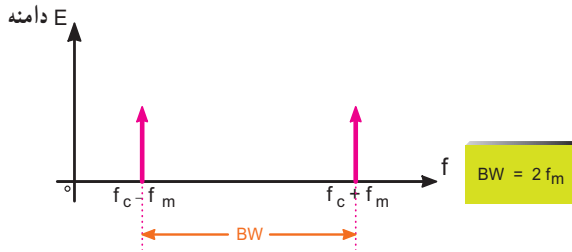
کناری AM-SC یا DSB با حذف سیگنال حامل

(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 ۳-۳۴ طیف فرکانس

در این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۴ طیف موج مدوله شده به روش DSB

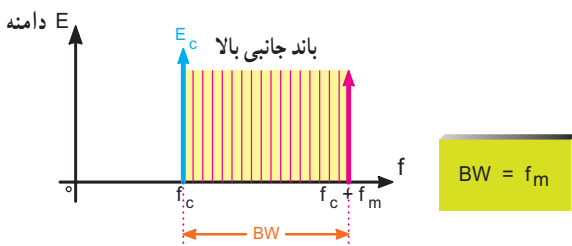
#### ۳-۱۷-۳- ارسال مدولاسیون دامنه به روش یک

باند کناری (Single Side Band) SSB: چون در هر یک

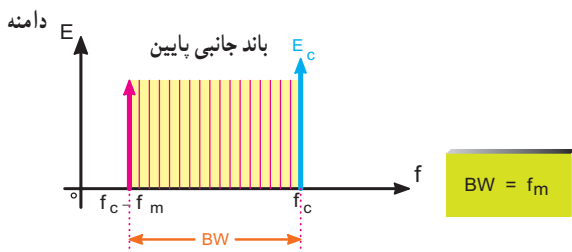
از باندهای جانبی بالا و پایین کلیه اطلاعات وجود دارد، برای صرفه‌جویی در توان، افزایش راندمان و کاهش پهنای باند، می‌توان فقط یکی از باندهای جانبی و حامل را ارسال نمود این روش ارسال مدولاسیون را به اختصار SSB می‌نامند.

شکل‌های ۳-۳۵ و ۳-۳۶ یکی از باندهای جانبی را در

روش ارسال مدولاسیون به صورت SSB، نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۵ باند جانبی بالا به روش SSB در طیف موج مدوله شده



شکل ۳-۳۶ باند جانبی پایین در طیف موج مدوله شده به روش SSB

در مدولاسیون SSB پهنای باند موج مدوله شده برابر

با  $F_m$  است.

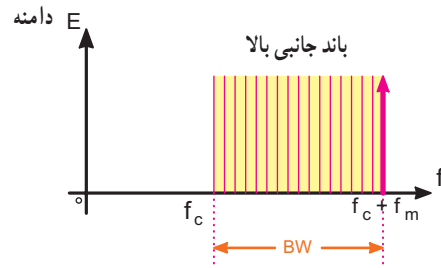
$$BW = f_m$$

۱۲-۳

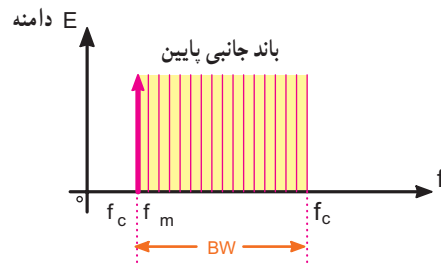
#### ۳-۱۷-۴- ارسال مدولاسیون AM با باند کناری

**مستقل (Independent-Side Band) ISB:** در این روش ارسال مدولاسیون فقط یکی از باندهای جانبی بالا یا پایین را ارسال می‌نمایند و سیگنال حامل را حذف می‌کنند. شکل ۳-۳۷ و ۳-۳۸ طیف این روش ارسال را نشان می‌دهد. پهنای باند در این روش نیز برابر  $F_m$  است.

$$BW = f_m$$



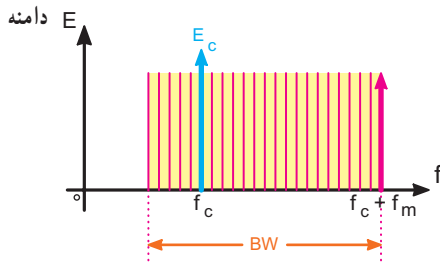
شکل ۳-۳۷- باند جانبی بالا بدون حامل



شکل ۳-۳۸- باند جانبی پایین بدون حامل

#### ۳-۱۷-۵- ارسال مدولاسیون AM به روش

**(Vestigial Side Band) VSB:** در این روش ارسال، تمام باند جانبی بالا و قسمتی از باند جانبی پایین را ارسال می‌کنند. شکل ۳-۳۹ طیف موج مدوله شده به صورت VSB را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۹- طیف موج مدوله شده به روش VSB

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

$$BW > f_m$$

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

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

جدول ۳-۳

نوع مدولاسیون AM	طیف موج مدوله شده	پهنای باند BW	کاربرد
AM - FC		$2f_m$	فرستنده‌های رادیویی محلی
DSB یا AM - SC		$2f_m$	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 نقطه به نقطه و رادیو تلفنی
VSB		اندکی بیشتر از $f_m$	در فرستنده تلویزیونی

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

### ۳-۱۸- الگوی پرسش

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

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

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

۴- روش ارسال در مدولاسیون VSB دارای چه پهنای باندی است؟ از این روش در فرستنده رادیویی استفاده می‌کنند یا در فرستنده تلویزیونی؟

#### چهارگزینه‌ای

۵- 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

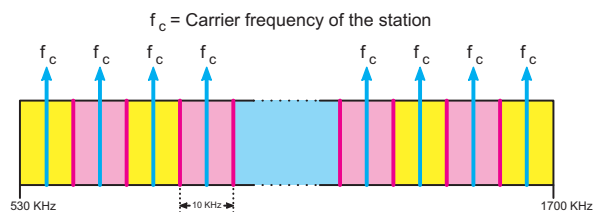
#### صحیح یا غلط

۶- در مواردی که محدودیت توان و پهنای باند وجود دارد، از روش ارسال مدولاسیون ISB استفاده می‌شود.

صحیح  غلط

### ۳-۱۹- تعداد ایستگاه رادیویی

با توجه به مسئله پهنای باند در فرستنده‌های رادیویی تعداد ایستگاه‌های رادیویی محدود می‌شود. اگر پهنای باند سیگنال AM را  $10\text{ kHz}$  در نظر بگیریم این بدین معناست که هر ایستگاه AM،  $10\text{ kHz}$  را اشغال می‌کند. شکل ۳-۴ نشان می‌دهد چگونه در فاصله  $530$  تا  $1700$  کیلوهرتز چندین ایستگاه رادیویی کنار هم قرار گرفته‌اند.



شکل ۳-۴- تقسیم‌بندی فاصله  $530$  تا  $1700$  کیلوهرتز به چندین ایستگاه رادیویی

### مثال ۳-۹

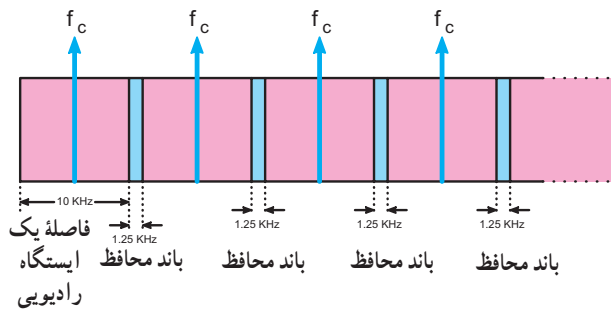
در باند فرکانسی ۱ تا ۲ مگاهرتز چند ایستگاه رادیویی AM می‌توان جای داد؟ (بدون باند محافظ)

$$\text{تعداد ایستگاه‌ها} = \frac{\text{باند فرکانس رادیویی}}{\text{پهنای باند سیگنال AM}} = \frac{(2 \times 10^6 - 1 \times 10^6) \text{ Hz}}{(10 \times 10^3) \text{ Hz}}$$

$$\text{تعداد ایستگاه‌ها} = \frac{1 \times 10^6}{10 \times 10^3} = 100$$

با توجه به مثال ۳-۹ ملاحظه می‌شود که می‌توانیم صد ایستگاه رادیویی را در فاصله 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  $1/25\text{ kHz}$  است.

شکل ۳-۴۱ چند ایستگاه رادیویی را همراه با باند محافظ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴۱- چند ایستگاه رادیویی همراه با باند محافظ

### مثال ۳-۱۰

در فاصله  $750$  تا  $1200$  کیلوهرتز چند ایستگاه رادیویی با باند محافظ جای می‌گیرد؟

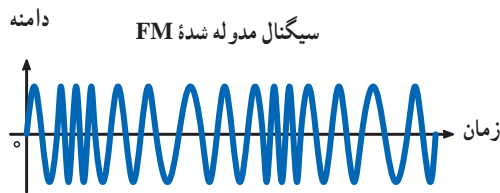
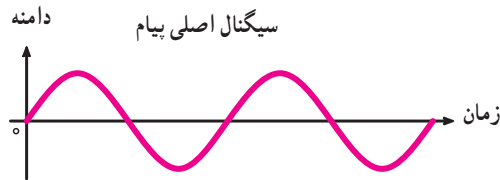
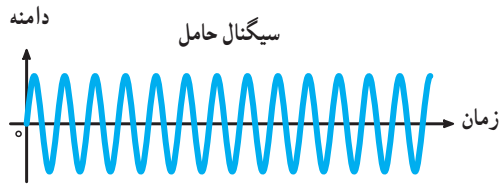
$$\text{تعداد ایستگاه} = \frac{\text{باند فرکانسی رادیویی}}{\text{باند محافظ + پهنای باند سیگنال AM}}$$

#### پاسخ

$$\text{تعداد ایستگاه رادیویی} = \frac{(1200 - 750) \text{ kHz}}{(10 + 1/25) \text{ kHz}} = \frac{450 \text{ kHz}}{11/25 \text{ kHz}} = 100$$

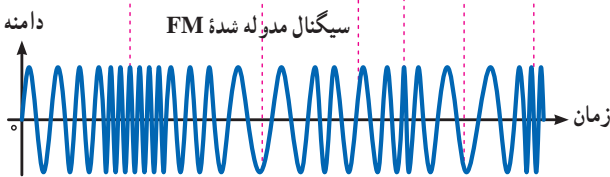
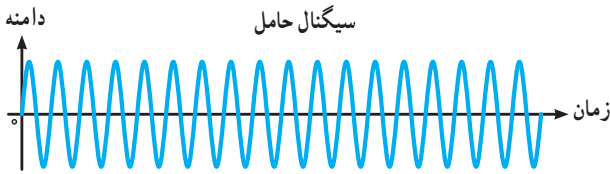
## ۲۰-۳- الگوی پرسش

دامنه سیگنال پیام، فرکانس حامل افزایش می‌یابد (فشرده می‌شود) و با کاهش دامنه پیام، فرکانس حامل کم می‌شود.



شکل ۴۲-۳- مدولاسیون FM با پیام سینوسی

شکل ۴۳-۳- یک پیام غیر سینوسی را که روی حامل به صورت FM مدوله شده است نشان می‌دهد.



شکل ۴۳-۳- مدولاسیون FM با پیام غیر سینوسی

۱- در صورتی که بیشترین فرکانس صوتی برابر با  $2/5$  کیلوهرتز باشد، پهنای باند سیگنال AM ارسالی چند کیلوهرتز است؟

۲- پهنای باند فرستنده‌های AM تجارتي چند کیلوهرتز است؟

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

۴- در باند MW (۵۳۵ تا ۶۰۵ kHz) چند ایستگاه رادیویی AM با باند محافظ جای می‌گیرد؟

۵- 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 :

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

چهار گزینه‌ای :

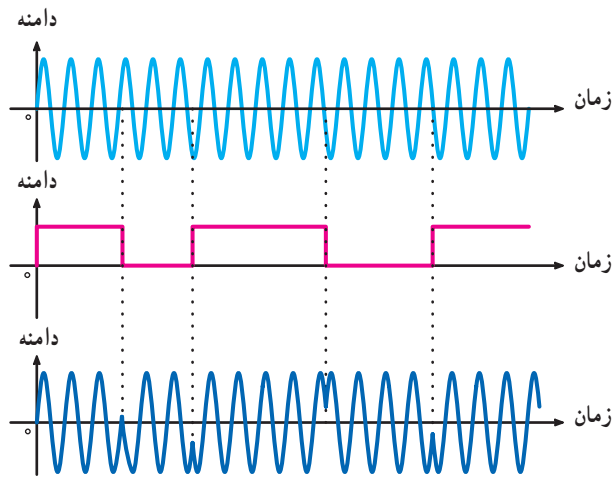
۷- اگر پهنای باند سیگنال AM، ۱۰ کیلوهرتز باشد در فاصله ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلوهرتز چند ایستگاه رادیویی بدون باند محافظ جای می‌گیرد؟

۱) ۲۰ (۲) ۳۰ (۳) ۴۰ (۴) ۸۰

## ۲۱-۳- اشاره‌ای به مدولاسیون فرکانس (frequency modulation)

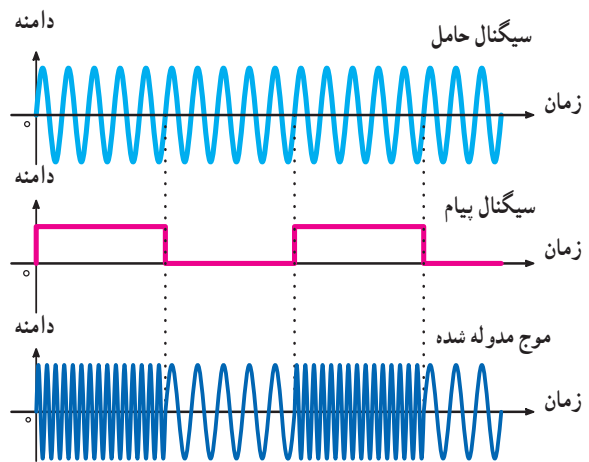
در صورتی که فرکانس سیگنال حامل، متناسب با تغییرات دامنه پیام تغییر کند مدولاسیون فرکانس ایجاد می‌شود. در این حالت سرعت تکرار تغییرات فرکانس موج حامل متناسب با فرکانس پیام خواهد بود. مدولاسیون فرکانس را با FM نشان می‌دهند. در شکل ۴۲-۳ مدولاسیون FM با پیام سینوسی را نشان داده‌ایم. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ هنگامی که دامنه پیام صفر است، فرکانس موج مدوله شده برابر با موج حامل می‌شود. با افزایش

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.



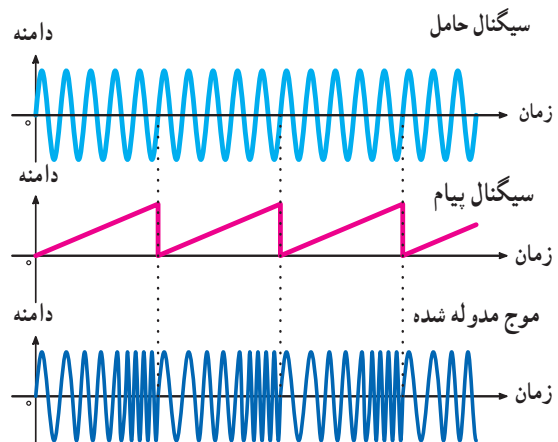
شکل ۳-۴۶ - مدولاسیون فاز

شکل ۳-۴۴ پیام مربعی که روی حامل سینوسی به صورت FM مدوله شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴۴ - مدولاسیون FM با سیگنال پیام مربعی

شکل ۳-۴۵ پیام دندانانه اره‌ای که روی حامل سینوسی به صورت FM مدوله شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴۵ - مدولاسیون FM با سیگنال پیام دندانانه اره‌ای

### تحقیق برای هنرجویان علاقه‌مند

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

### ۳-۲۳- الگوی پرسش

کامل کردنی :

۱- در مدولاسیون فرکانس دامنه حامل ..... است و فرکانس حامل متناسب با ..... پیام تغییر می‌کند.

چهار گزینه‌ای :

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

۱) فرکانس - دامنه

۲) فاز - دامنه

۳) فاز - فرکانس

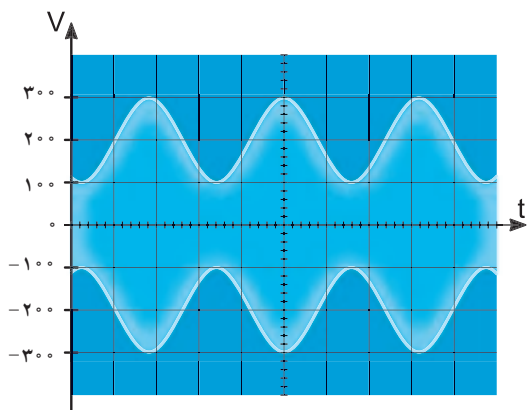
۴) دامنه - فاز

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

### ۳-۲۲- مدولاسیون فاز (Phase Modulation)

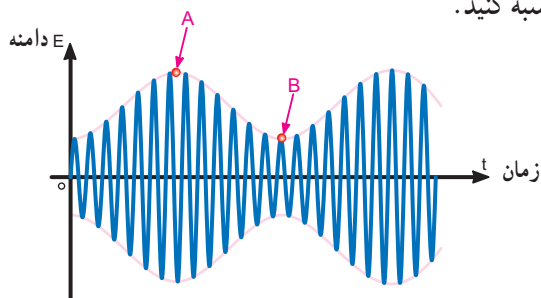
اگر فاز سیگنال حامل متناسب با دامنه سیگنال پیام تغییر کند مدولاسیون فاز به وجود می‌آید. در این حالت سرعت تکرار تغییرات فاز برابر با فرکانس پیام خواهد بود. مدولاسیون فاز از پاره‌ای جهات مشابه‌هایی با مدولاسیون FM دارد. مدولاسیون فاز را با PM نشان می‌دهند (شکل ۳-۴۶).

۶- در شکل ۳-۴۹ ضرب مدولاسیون را محاسبه کنید.



شکل ۳-۴۹

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



شکل ۳-۵۰

### ۳-۲۴- اشاره‌ای به مدولاسیون پالس :(Pulse Modulation)

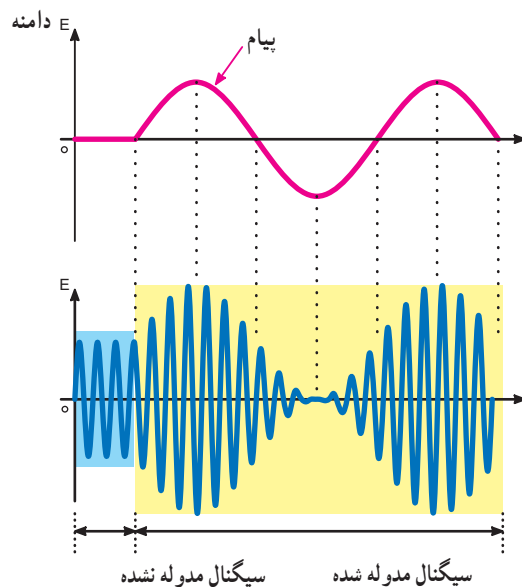
علاوه بر مدولاسیون آنالوگ، مدولاسیون‌های دیگری نیز وجود دارد که آن را مدولاسیون‌های پالسی می‌نامند. در فصل دهم، درباره مدولاسیون‌های پالسی بحث خواهیم کرد.

۴- شکل موج سیگنال AM، FM و PM را با موج پیام

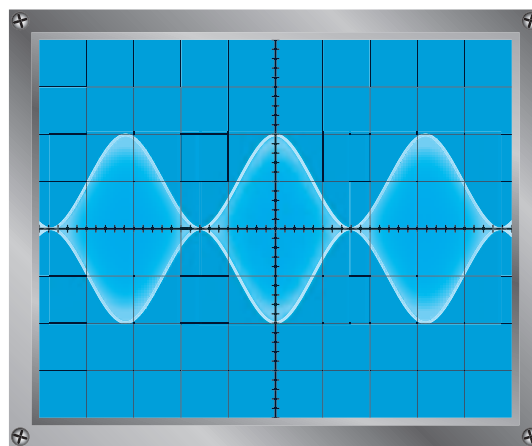
مربعی ترسیم کنید.

۵- در هر یک از شکل‌های ۳-۴۷ و ۳-۴۸ درصد

مدولاسیون چه قدر است؟



شکل ۳-۴۷



شکل ۳-۴۸