مدولاسیون و انواع آن

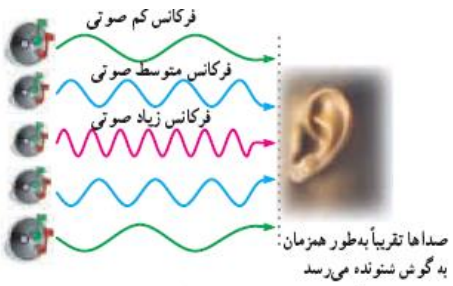
مقدمه

برای انتقال صوت به فواصل دور به شرایط ویژه ای نیاز داریم. در این فصل با انواع مدولاسیون و سیگنال حامل و ضریب مدولاسیون و طیف فرکانسی AM آشنا خواهیم شد.

سیگنال صوتی و نحوه انتقال آن

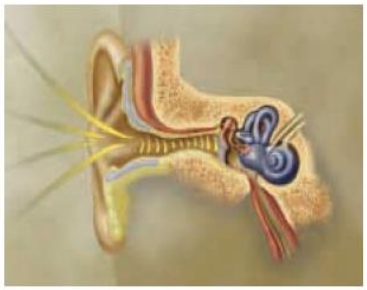
یکی از مهم ترین امواج ، امواج صوتی می باشد که انسان با آن سرو کار دارد. از طریق این امواج ما گفتگو می کنیم یا با به صدا در آوردن بوق به عابرین هشدار می دهیم. برای انتشار صوت به محیط مادی نیاز داریم. در واقع صوت ارتعاشات مکانیکی است. این ارتعاشات از طریق ارتعاشات ملکول های هوا منتقل می شوند. ارتعاشات ملکول های هوا از طریق حفره گوش به پرده گوش برخورد کرده و صدا شنیده می شود.

نکته امواج صوتی در محدوده ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلو هرتز قرار دارند.



شکل ۱ــ۳ــ امواج صوتی با فرکانس‌های مختلف

شکل ۲ــ۳ــ نحوه‌ی انتشار صوت در هوا



شکل ۳ــ۳ــ نحوه‌ی برخورد ملکول‌های هوا به پرده‌ی گوش انسان

سرعت صوت

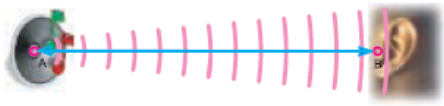
سرعت انتشار صوت در یک محیط به ویژگی های محیط انتشار بستگی دارد.

صوت در محیط های گازی و مایع و جامد منتشر می شود. سرعت صوت در هوا در صفر درجه ۳۳۱ متر بر ثانیه است و در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد ۳۴۳ متر بر ثانیه می باشد.

جدول ۱ــ۳ــ سرعت صوت در اجسام مختلف

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

اگر سرعت صوت ۳۴۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شود و این صوت در نقطه A تولید شود پس از یک ثانیه در فاصله ۳۴۰ متری شنیده می شود. طول موج از رابطه زیر بدست می آید.



شکل ۴ـ۳ـ نحوه‌ی انتشار صوت در هوا

$$\lambda = \frac{V}{F}$$

در این رابطه V سرعت صوت و F فرکانس صوت می باشد و λ طول موج می باشد.

به عنوان مثال طول موج کمترین و بزرگ ترین فرکانس صوتی AF برابر است با:سرعت صوت در هوا ۳۴۰ متر در ثانیه می باشد.

$$\lambda_1 = \frac{V}{F} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{340}{20} = 170m$$

$$\lambda_2 = \frac{V}{F} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{340}{20000} = 17mm$$

انتقال صوت به فواصل دور توسط سیم یا کابل

حنجره انسان به گونه ای است که نمی تواند دامنه های تارهای صوتی را بیش از حد زیاد کند. این محدودیت باعث می شود برای انتقال صوت به فواصل دور (۵۰۰متر) از دستگاه تقویت کننده (آمپلی فایر) استفاده کند. برای پخش صوت نیاز به یک بلند گو ضروری است وهمچنین برای انتقال ، به سیم یا کابل نیاز داریم.

نکته: استفاده از سیم و کابل برای انتقال صوت برای فواصل دور موجب افت ولتاژ و توان می شود.

صوت را نمی توان به فواصل دور(بین دو شهر) توسط آمپلی فایر و بلندگو منتقل کرد زیرا

الف- تلفات توان و ولتاژ زیاد است.

ب- به سبب طولانی بودن سیستم آسیب پذیرتر است.

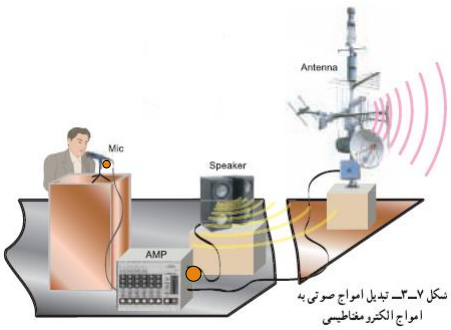
ج- هرینه نصب و راه اندازی ، تعمیر و نگهداری زیاد است.

د- پیام نمی تواند محرمانه باقی بماند.

نکته: اگر صوت مستقیما" در فضا پخش شود موجب آلودگی صوتی می شود.

انتقال سیگنال صوتی به فواصل دور توسط امواج الکترومغناطیسی

به نظر می رسد ساده ترین روش برای انتقال امواج صوتی ، تبدیل این امواج به امواج الکترومغناطیسی می باشد و آنها را توسط آنتن منتشر کرد.



شکل ۷ـ۳ـ تبدیل امواج صوتی به امواج الکترومغناطیسی

به دلایل زیر نمی توان امواج صوتی را توسط امواج الکترومغناطیس انتشار داد.

الف- فرکانس امواج صوتی کم و طول موج آنها بزرگ است لذا انتقال آنها تقریبا" غیر ممکن است.

ب- در صورتیکه انتقال امواج صوتی توسط آنتن ممکن باشد نیاز به آنتن طویل داریم.

ج- با فرض اینکه آنتن طویل ساخته شود به دلیل آنکه صوت ترکیبی از فرکانس ها است نیاز به آنتن های متعددی می باشد.

د- با فرض پذیرفتن آنتن های متعدد در هر منطقه نمی توان بیش از یک ایستگاه داشت زیرا به دلیل مشابهت طیف فرکانسی افراد تداخل بوجود می آید.

با توجه به موارد فوق نمی توان صوت را مستقیما" در فضا فرستاد، پس چه باید کرد؟

انسان برای مسافرت به مکان های دور از یک وسیله نقلیه استفاده می کند. که وسیله می تواند یک حیوان یا ماشین یا هواپیما باشد.

اگر وسیله نقلیه امواج الکترو مغناطیس باشد، با توجه به اینکه این امواج با سرعت نور حرکت می کنند ، فواصل زیاد را کمتر از ثانیه طی می کند.

مثلا" اگر فاصله تهران از مشهد ۹۶۰ کیلومتر باشد داریم:

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

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

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

$$= \frac{۹۶۰\,\text{Km}}{۶۰\,\text{Km/H}} = ۱۶ \text{ ساعت}$$

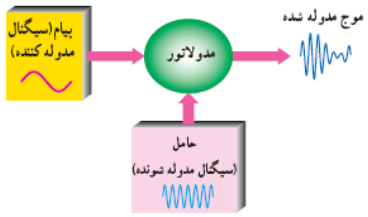
$$\text{زمان طی شده توسط امواج الکترومغناطیسی} = \frac{\text{فاصله}}{\text{سرعت}} = \frac{۹۶۰\text{km}}{۳۰۰۰۰۰\text{km/sec}} = ۳۲۰۰\mu\text{s}$$

اگر سیگنال صوتی را بتوان روی یک وسیله نقلیه سوار کرد(امواج الکترومغناطیس) و در فضا منتشر کرد اشکال روش ارسال مستقیم حل می شود.به این روش مدولاسیون گویند. Modulation

سیگنال پیام را سیگنال مدوله کننده گویند. Modulating signal

سیگنالی که پیام روی آن سوار می شود را سیگنال حامل carrier یا سیگنال مدوله شونده گویند. Modulation signal

به مدار یا دستگاهی که عمل مدولاسیون را انجام می دهد مدولاتور گویند. Modulator



شکل ۹ــ۳ــ بلوک دیاگرام نحوه‌ی انجام مدولاسیون

مزایای استفاده از سیگنال RF به عنوان حامل

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.

چگونگی عمل مدولاسیون Moudulation

در سوار کردن انسان در هواپیما هیچ گونه تغییری در ماهیت انسان ایجاد نمی شود ولی در عمل مدولاسیون شکل سیگنال ارسالی و پیام متفاوت می باشد.

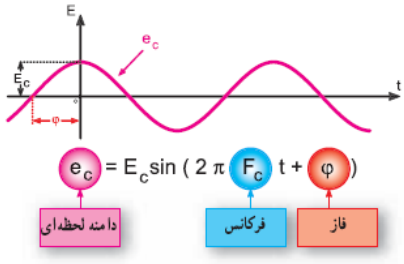
مشخصه سیگنال حامل

سیگنال حامل سینوسی یا مربعی می باشد. ولی در فرستنده های محلی از سینوسی استفاده می شود. لذا سیگنال سینوسی دارای سه مشخصه می باشد که عبارتند:

۱- دامنه Amplitude

۲- فرکانس Frequency

۳- فاز Phase



شکل ۱۰ـ۳ـ مشخصه‌های اصلی سیگنال حامل و معادله‌ی موج

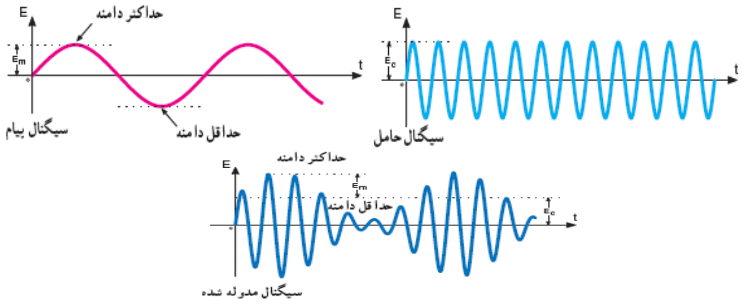
مدولاسیون

مدولاسیون عبارت است کنترل یکی از مشخصه های اصلی حامل توسط پیام به طوریکه گیرنده بتواند اطلاعات ارسالی را مجددا" بازسازی کند. چون سیگنال حامل سینوسی می باشد لذا می توان سه مشخصه دامنه ، فرکانس و فاز را با سیگنال پیام تغییر داد، پس سه نوع مدولاسیون دامنه، فرکانس و فاز وجود دارد.

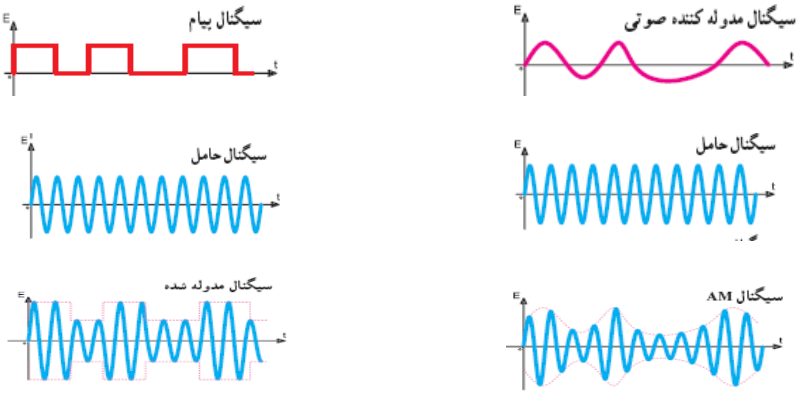
مدولاسیون دامنه Amplitude Modulation

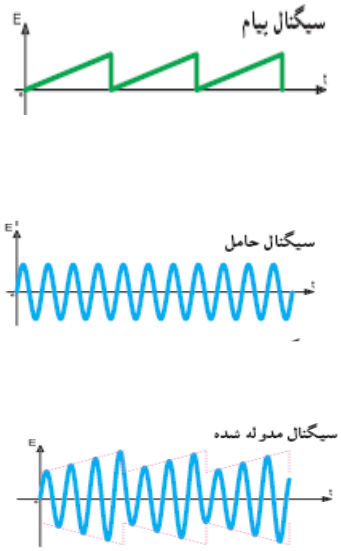
در مدولاسیون دامنه فرکانس ثابت بوده و دامنه آن متناسب با دامنه پیام تغییر می کند.

مدولاسیون دامنه را مدولاسیون AM گویند.

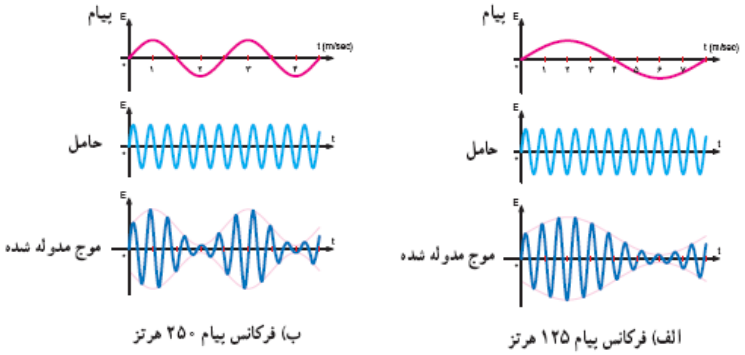


در شکل های زیر شکل پیام سینوسی نیست.





نکته: سرعت تغییرات دامنه حامل بستگی به فرکانس پیام دارد.



الف) فرکانس پیام ۱۲۵ هرتز

ب) فرکانس پیام ۲۵۰ هرتز

شاخص مدولاسیون

نسبت دامنه پیام به دامنه حامل را شاخص مدولاسیون یا ضریب مدولاسیون می نامند.

۶ـ۳

$$\text{شاخص مدولاسیون} = \frac{\text{دامنه‌ی پیام}}{\text{دامنه‌ی حامل}} = \frac{E_m}{E_c} = m$$

در صد مدولاسیون Percent of Modulation

چون ضریب مدولاسیون کمتر از واحد می باشد لذا در صد مدولاسیون تعریف می شود.

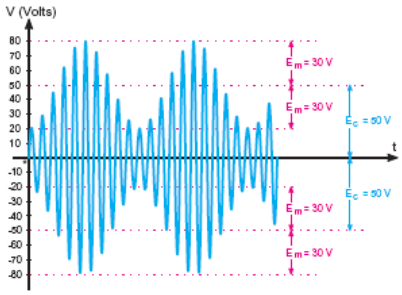
$$M = m_p = \frac{E_m}{E_c} \times 100$$

در شکل زیر ضریب مدولاسیون را بدست آورید.

$E_c = ۵۰V$ دامنه‌ی حامل

$E_m = ۳۰V$ دامنه‌ی پیام

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



شکل ۲۱ــ۳ــ محاسبه‌ی ضریب مدولاسیون

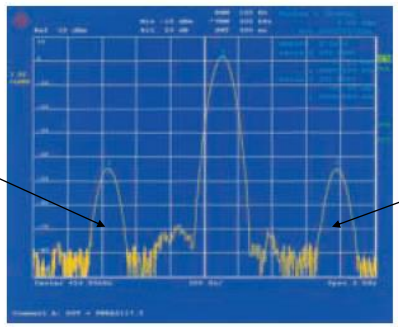
طیف فرکانسی AM

در صورتی یک موج مدوله AM با حاملی با فرکانس Fc و با یک موج پیام با فرکانس Fm را به یک طیف نما وصل شود ، در طیف نما فرکانس های Fc و Fc-Fmو Fc+Fm ظاهر می شود. به مجموعه فرکانس های فوق طیف AM گویند.

در طیف AM دامنه فرکانس Fc برابرEc و دامنه فرکانس های Fc-Fm و Fc+Fm برابر Em/2 می باشد. (Em/2=mEc/2)

فرکانس تفاضل را فرکانس کناری پایین گویند LSF

Lower Side Frequency

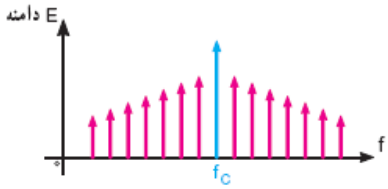


فرکانس مجموع را فرکانس کناری بالا گویند USF

Upper Side Frequency

شکل ۲۲ــ۳ــ طیف فرکانسی AM

در صورتیکه پیام از چند سیگنال سینوسی درست شده باشد، برای هر یک از موج های سینوسی یک فرکانس کناری بالا و پایین ایجاد می شود در این حالت مجموعه ای از طیف فرکانسی بدست می آید.



شکل ۲۳ــ۳ــ مجموعه‌ی طیف فرکانسی

مثال ۷ــ۳

سیگنال پیامی شامل فرکانس‌های $F_{m1} = 3KHZ$ ، $F_{m2} = 10KHZ$ و $F_{m3} = 20KHZ$ است. در صورتی که این سیگنال‌ها را روی حامل $F_c = 500KHZ$ 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؟ دامنه‌ی طیف فرکانسی بستگی به چه عواملی دارد؟

پاسخ:

$F_1 = F_c + F_{m1} = 500 + 3 = 503\ KHZ$

$F_2 = F_c + F_{m2} = 500 + 10 = 510\ KHZ$

$F_3 = F_c + F_{m3} = 500 + 20 = 520\ KHZ$

$F_4 = F_c - F_{m1} = 500 - 3 = 497\ KHZ$

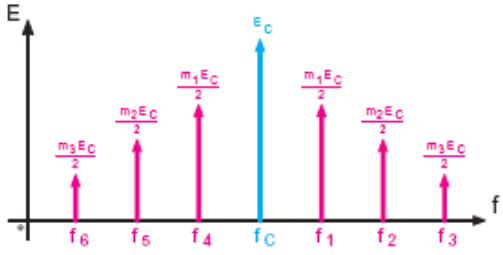
$F_5 = F_c - F_{m2} = 500 - 10 = 490\ KHZ$

$F_6 = F_c - F_{m3} = 500 - 20 = 480\ KHZ$

فرکانس حامل $\Rightarrow F_c$

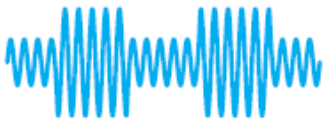
فرکانس‌های کناری بالا $\Rightarrow F_1, F_2, F_3$

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



شکل ۲۴ــ۳ــ طیف فرکانسی حاصل از سیگنال پیام مرکب

نکته: اگر شکل پیام مربعی باشد. باند کناری بالا و پایین ازترکیب هارمونیک های موج مربعی بدست می آید.



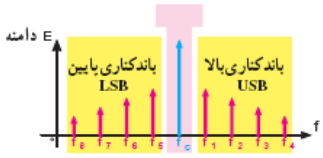
الف ــ سیگنال مدوله شده AM

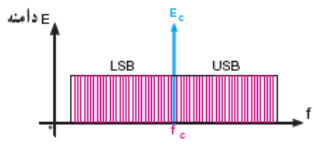
ب ــ طیف فرکانسی

شکل ۲۵ــ۳ــ طیف فرکانسی حاصل از مدولاسیون موج مربعی

پهنای باند سیگنال AM

در صورتی که سیگنال پیام از چند سیگنال سینوسی درست شده باشد، در صورت عمل مدولاسیون هر یک از موج های سینوسی به تنهایی یک طیف فرکانسی دارد. در این حالت باند کناری بالا و باند کناری پایین بیش از یک فرکانس دارد. اگر تعداد فرکانس های پیام زیاد باشد طیف فرکانسی پیام پیوسته خواهد بود.





شکل ۲۷ــ۳ــ باند فرکانسی پیوسته

پهنای باند سیگنال مدوله شده Band width

پهنای باند موج AM عبارت است محدوده فرکانس های است که در فاصله کمترین فرکانس باند کناری پایین و بیشترین فرکانس باند کناری بالا قرار دارد.

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

$$F_{USB} = F_c + F_{m\,max}$$

$$F_{LSB} = F_c - Fm_{m\,ax}$$

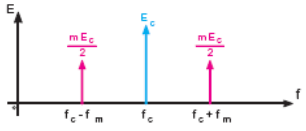
$$BW = (F_c + F_{m\,max}) - (F_c - {}_{Fm\,max})$$

$$BW = 2F_{m\,max}$$

نکته پهنای باند AM تجاری ۱۰ کیلو هرتز می باشد لذا حداکثر فرکانس پیام ۵ کیلو هرتز نباید بیشتر باشد.

توان موج مدوله شده AM

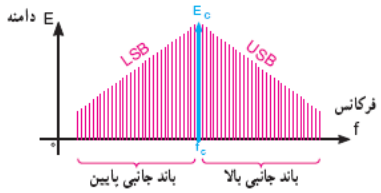
با توجه به طیف فرکانسی AM توان موج AM بیشتر از حامل می باشد.



شکل ۲۸ــ۳ــ نمایش موج حامل و فرکانس‌های جانبی بالا و پایین

اثبات می شود ۶۳ درصد توان در موج حامل و ۳۷ درصد توان در باند های کناری قرار دارد.لذا بازده کم می شود و برای افزایش بازده روش های مدولاسیون AM مطرح می شود.

با توجه به این که موج پیام سینوسی خالص نیست لذا موج AM دارای طیف فرکانسی می باشد.



روش های ارسال مدولاسیون AM

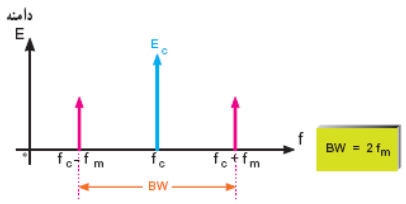
در صورتی که در ارسال موج AM قسمتی از موج AM حذف شود ۵ نوع مدولاسیون AM داریم.

ارسال مدولاسیون دامنه به صورت کامل AM-FC

Amplitude Modulation - full Carrier

در این روش فرکانس حامل و فرکانس های جانبی بالا و پایین ارسال می شود.

BW=2Fmax. این روش در فرستنده تجاری استفاده می شود.

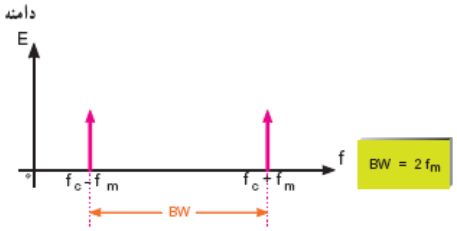


شکل ۳۱ـ۳ـ طیف موج مدوله شده به روش AM-FC

ارسال مدولاسیون AM به روش دو باند کناری AM-SC یا DSB با حذف سیگنال حامل Amplitude Modulation-Suppressed Carrier یا Double side Band

در این روش فقط باند کناری بالا و پایین فرستاده می شود و سیگنال حامل حذف می شود.

BW=2Fmax و راندمان زیاد

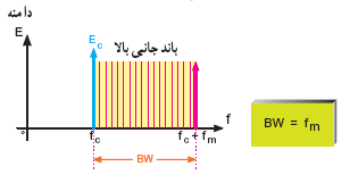


شکل ۳۲ــ۳ــ طیف موج مدوله شده به روش DSB

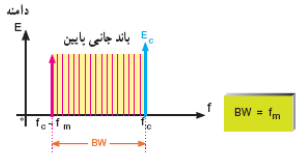
ارسال مدولاسیون AM به روش یک باند کناری SSB (Single side Band)

در این روش یکی از باند های کناری و حامل فرستاده می شود

BW=Fmax. راندمان زیاد و پهنای باند کم دارد.



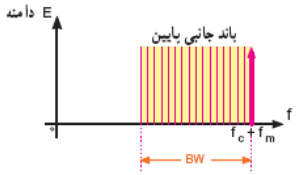
شکل ۳۳ــ۳ــ باند جانبی بالا به روش SSB طیف موج مدوله شده



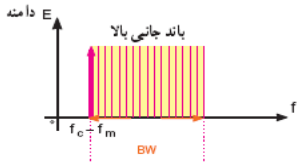
شکل ۳۴ــ۳ــ باند جانبی پایین در طیف موج مدوله شده به روش SSB

ارسال مدولاسیون AM با باند کناری مستقل ISB (IndePendent-Side Band):

در این روش یکی از باند های جانبی بالا یا پایین ارسال می شود و سیگنال حامل حذف می شود.BW=Fmax و راندمان زیاد.



شکل ۳۵ــ۳ــ باند جانبی پایین بدون حامل

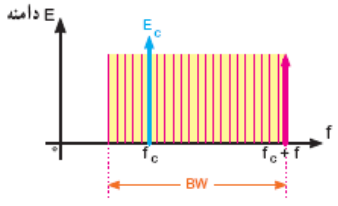


شکل ۳۶ــ۳ ــ باند جانبی بالا بدون حامل

ارسال مدولاسیون AM به روش VSB (Vestigial Side Band)

در این روش تمام باند کناری بالا و مقداری از باند کناری پایین ارسال می شود.

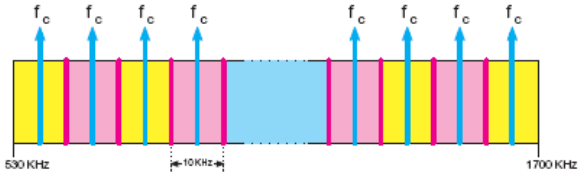
این روش در ارسال تصاویر تلویزیون استفاده می شود. پهنای باند کمی بیشتر از Fmax می باشد.



شکل ۳۷ــ۳ــ طیف موج مدوله شده به روش VSB

تعداد ایستگاه رادیویی

با توجه به پهنای باند در فرستنده رادیویی تعداد ایستگاه رادیویی محدود می شود. اگر پهنای باند AM تجاری را ۱۰ کیلو هرتز در نظر بگیریم این بدین معنی است هر ایستگاه رادیویی AM ۱۰ کیلو هرتز اشغال می کند.



شکل ۳۸ــ۳ــ تقسیم بندی فاصله ۵۳۰ تا ۱۷۰۰ کیلوهرتز به چندین ایستگاه رادیویی

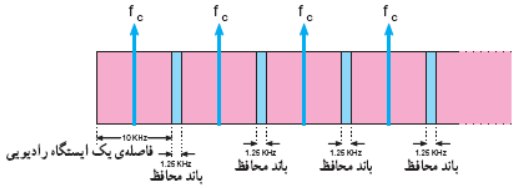
مثال ۹ــ۳

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

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

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

عملا" برای جلوگیری از تداخل بین ایستگاه از باند محافظ استفاده می شود. Guard Band مقدار باند محافظ AM ۱.۲۵ کیلو هرتز در نظر می گیرند.



شکل ۳۹ــ۳ــ چند ایستگاه رادیویی همراه با باند محافظ

مثال ۱۰ــ۳

در فاصله ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ کیلوهرتز چند ایستگاه رادیویی با باند محافظ جای می‌گیرد؟

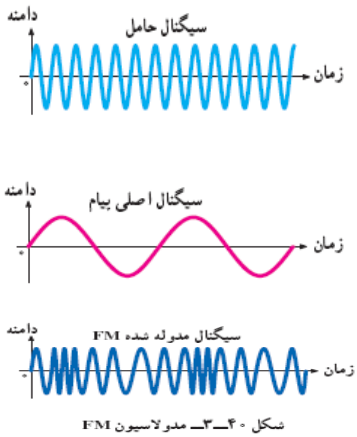
پاسخ:

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

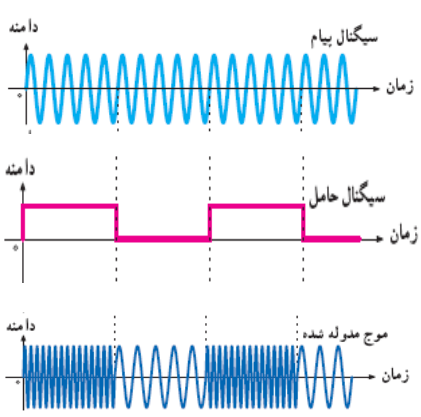
$$\text{تعداد ایستگاه رادیویی} = \frac{۱۲۰۰-۷۵۰\text{KHZ}}{۱۰+۱/۲۵\text{KHZ}} = \frac{۴۵۰\text{KHZ}}{۱۱/۲۵\text{KHZ}} = ۴۰$$

مدولاسیون فرکانس frequency modulation (FM)

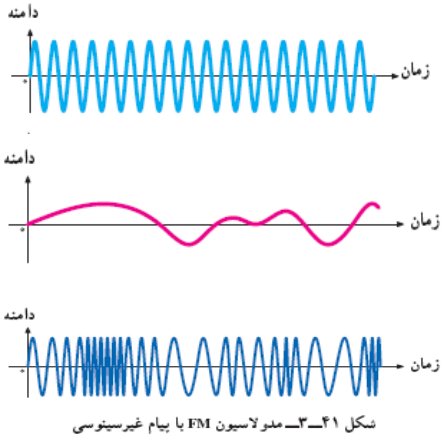
در صورتی که فرکانس سیگنال حامل متناسب با تغییرات دامنه پیام تغییر کند مدولاسیون فرکانس به وجود می آید.



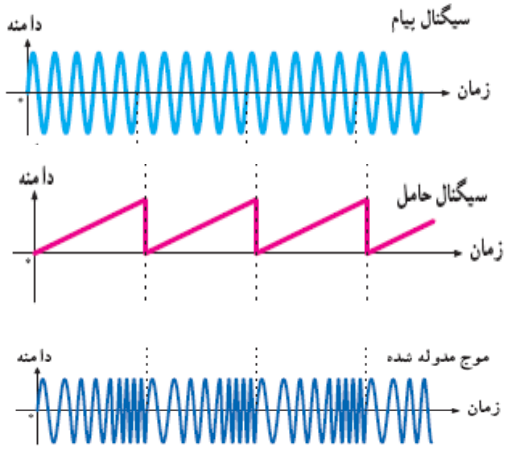
شکل ۴۰ــ۳ــ مدولاسیون FM



شکل ۴۲ــ۳ــ مدولاسیون FM با سیگنال پیام مربعی



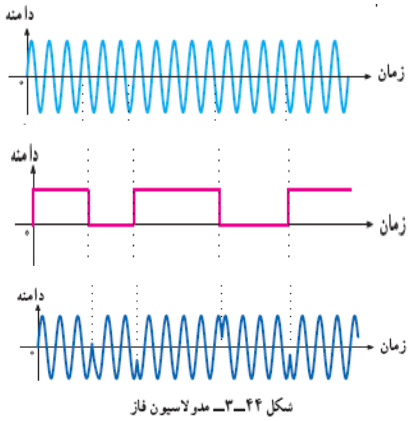
شکل ۴۱ــ۳ــ مدولاسیون FM با پیام غیرسینوسی



شکل ۴۳ــ۳ــ مدولاسیون FM با سیگنال پیام دندانه اره‌ای

مدولاسیون فاز Phase modulation (PM)

اگر فاز سیگنال حامل متناسب با تغییرات دامنه سیگنال پیام تغییر کند مدولاسیون فاز به وجود می آید.

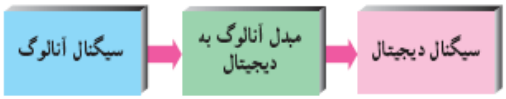


شکل ۴۴ــ۳ــ مدولاسیون فاز

نکته سه مدولاسیون AM ، FM و PM از انواع مدولاسیون پیوسته و آنالوگ می باشد. در صورتیکه حامل یا پیام موج مربعی باشد مدولاسیون دیجیتال یا پالس شکل می گیرد.

مدولاسیون پالس Pulse modulation

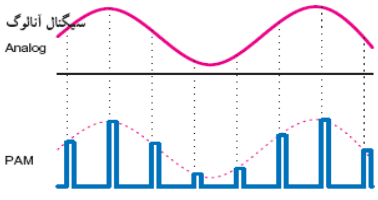
اولین قدم در مدولاسیون پالس تبدیل سیگنال آنالوگ به سیگنال دیجیتال می باشد.



شکل ۵۰ــ۳ــ بلوک دیاگرام تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال

در تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال از روشی به PAM استفاده می شود.

Pulse Amplitude Modulation در این روش از یک سیگنال آنالوگ در فاصله های زمانی یکسان نمونه برداری می شود.



شکل ۵۱ــ۳ــ سیگنال آنالوگ و پالس‌های نمونه‌برداری شده از آن

سیگنال PAM برای مخابره مفید نیست. زیرا اگرچه PAM شکل سیگنال اصلی را به یک سری پالس تبدیل می کند، این پالس ها هر مقداری دارند و هنوز مانند سیگنال آنالوگ می باشند.

گام بعدی اصلاح پالس های PAM و تولید یک سیگنال کاملا" دیجیتال است. در این حالت مقادیر PAM به کد باینری تبدیل می شوند. به این مرحله PCM یا مدولاسیون رمز پالس گویند.

Pulse code modulationpcm

شکل ۵۲ــ۳ــ نمونه‌ای از سیگنال آنالوگ و پالس‌های تولید شده از آن