

آزمایشگاه مخابرات دیجیتال پیشرفته

فصل دو

مدولاسیون

(شامل ۶ قسمت مجازی)

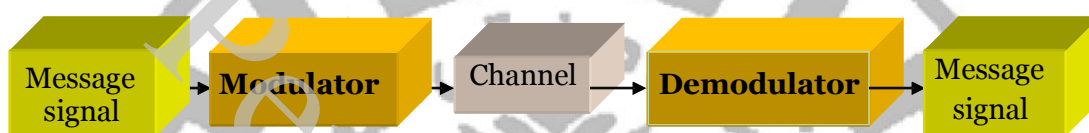
۱۳۹۹-۱۴۰۰ (نیم سال اول)

نسخه دانشجو

۱- پیش مطالعه

بخش اول: مدولاسیون های آنالوگ

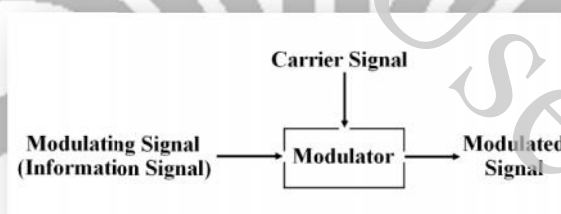
مدولاسیون^۱ عمل تغییر دادن یک سیگنال (معمولاً سیگنال متناوب موسوم به حامل) جهت استفاده از آن در راستای انتقال پیغام^۲ است.^۳ در سیستم های مخابراتی (به ویژه مخابرات راه دور) از مدولاسیون به منظور ارسال پیام مخابراتی استفاده می شود. هدف اصلی از انجام مدولاسیون در یک سیستم مخابراتی، ایجاد سیگنال آنالوگ مدوله شده ای است که با مشخصات (فیزیکی) کانال مخابراتی همخوانی داشته و از طریق آن قابل ارسال باشد. به ابزاری که عمل مدولاسیون را در سیستم مخابراتی انجام می دهد مدولاتور^۴ گفته می شود. ماژولی که عکس این عمل را انجام می دهد، دمدولاتور^۵ نام دارد.^۶ در کلی ترین تقسیم بندی، انواع مدولاسیون را می توان به دو نوع باند میانی (pass-band) و باند پایه (base-band) تقسیم کرد.



شکل (۱): جایگاه مدولاتور و دمدولاتور در یک سیستم مخابراتی

مدولاسیون های باند میانی (pass-band)

در هر نوع مدولاسیون باند میانی دو شکل موج دخیل اند؛ سیگنال مدوله کننده که پیام را نشان داده و شامل اطلاعات مورد نظر برای ارسال بر روی کانال است، و موج حامل (carrier) که به منظور مدولاسیون این اطلاعات مورد استفاده قرار می گیرد. مدولاتور شکل موج حامل را متناظر با تغییرات سیگنال پیام تغییر می دهد، تا موج مدوله شده حاصل، اطلاعات پیام را حمل کند. هر نوع مدولاسیون باید عملی برگشت پذیر باشد تا بتوان عمل عکس مدولاسیون یا همان دمدولاسیون را در گیرنده انجام داده و اطلاعات پیام را استخراج نمود.



شکل (۲): بلوک دیاگرام یک مدولاتور

در اکثر سیستم های مخابراتی راه دور از مدولاسیون موج پیوسته (CW)^۷، با حاملی که فرکانس آن بسیار بزرگتر از بزرگترین مؤلفه فرکانسی سیگنال پیام است، استفاده می شود. با این کار، اختصاص کانال رادیویی مناسب به هر کاربرد و دستیابی به برد ارسال مناسب امکان پذیر می شود. به طور کلی، مدولاسیون مزایای زیر را در بر دارد:

^۱ Modulation

^۲ Message

^۳ به طور مشابه، یک نوازنده صدای ساز خود را با تغییر سه مؤلفه شدت، زمان بندی و دانگ صدا مدوله و برای شنوندگان ارسال می کند.

^۴ Modulator

^۵ Demodulator

^۶ به ابزاری که قادر به انجام هر دو عمل مدولاسیون و دمدولاسیون است، معمولاً مودم (modem) می گویند.

^۷ Continuous wave

^۲ multiplexing

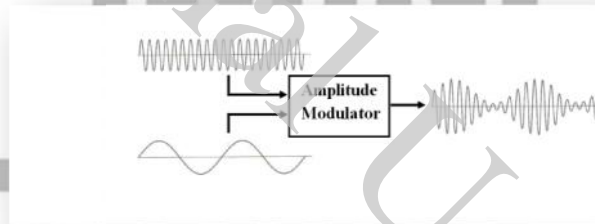
- ۱- انتقال مؤثر داده بر روی کانال فیزیکی در برد مناسب.
 - ۲- قابلیت بیشتر برای غلبه بر محدودیت‌های سخت‌افزاری.
 - ۳- کاهش اثر نامطلوب نویز و تداخل.
 - ۴- تخصیص مناسب باندهای فرکانسی به کاربردهای مخابراتی.
 - ۵- امکان مالتی‌پلکس کردن^۱ داده‌های مختلف روی کانال.
- تکنیک‌های مدولاسیون در باند میانی را می‌توان به دو دسته آنالوگ و دیجیتال تقسیم نمود.

الف) مدولاسیون‌های آنالوگ باند میانی

هدف از مدولاسیون آنالوگ، ارسال یک سیگنال آنالوگ پائین‌گذر (مثل سیگنال صوت یا تصویر) بر روی کانال میان‌گذر آنالوگ است. مهم‌ترین تکنیک‌های مدولاسیون آنالوگ باند میانی عبارتند از:

۱) مدولاسیون دامنه یا AM (Amplitude Modulation)

در این مدولاسیون اطلاعات سیگنال پیام در دامنه حامل قرار گرفته و شکل موج ارسالی را تشکیل می‌دهد. به عبارت دیگر، تغییرات شدت (دامنه) سیگنال ارسالی متناسب با سیگنال پیام انجام می‌گیرد. انواع مدولاسیون دامنه آنالوگ به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:



شکل (۳): مدولاسیون دامنه

۱) مدولاسیون دوکنار باندی یا DSB (Double-Side Band)

نوع ساده و اولیه مدولاسیون AM است، که در دهه ۱۸۷۰ میلادی برای انتقال با کیفیت صوت از طریق خطوط تلفن و سپس (در اوایل قرن بیستم) از طریق کانال‌های رادیویی پیشنهاد گردید. در این روش، سیگنال پیام با مقدار dc مناسب جمع (برای حذف قسمت‌های منفی) و در حامل ضرب می‌شود. به این ترتیب، طیف حاصله شامل یک مولفه در فرکانس حامل و دو باند کناری^۲ بالایی و پایینی خواهد بود. این مدولاسیون، به سه دسته زیر طبقه‌بندی می‌گردد:

- مدولاسیون دوکنار باندی با حامل تضعیف نشده (DSB-WC یا DSB-LC)^۳

این مدولاسیون ساده‌ترین نوع مدولاسیون AM است و در کانال‌های پخش رادیویی AM به کار گرفته می‌شود. اگر سیگنال حامل به صورت $S_c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$ و سیگنال پیام به صورت $S_m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$ در نظر گرفته شود، سیگنال ارسالی عبارت خواهد بود از

² Side-band

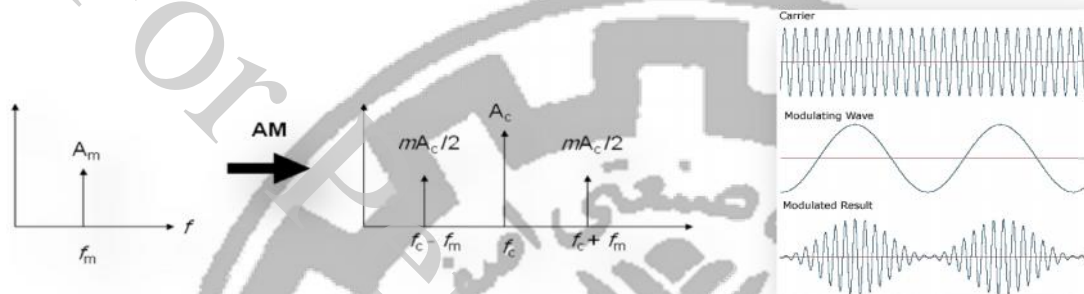
² Double-Sideband Modulation with Unsuppressed or Large Carrier

³ Double-sideband modulation with suppressed carrier

$$s(t) = [A_c + s_m(t)] \cos(\tilde{S}_c t) = [A_c + A_m \cos(\tilde{S}_m t)] \cos(\tilde{S}_c t) = A_c [1 + m \cos(\tilde{S}_m t)] \cos(\tilde{S}_c t)$$

$$\Rightarrow s(t) = A_c \cos \omega_c t + \frac{mA_c}{2} \cos(\tilde{S}_c + \tilde{S}_m)t + \frac{mA_c}{2} \cos(\tilde{S}_c - \tilde{S}_m)t$$

در این مدولاسیون، سیگنال مدوله شده دارای پهنای باندی معادل دو برابر پهنای باند سیگنال پیام است. شکل (۴) شکل زمانی و طیف سیگنال حاصله در مدولاسیون DSB-WC را نشان می‌دهد. در این نوع مدولاسیون، مصرف توان بسیار بالا است. علت آن است که حداقل ۰/۶۶ کل توان ارسالی در سیگنال حاملی متمرکز شده است که حاوی هیچ نوع اطلاعاتی نیست. به منظور رفع این نقیصه در مدولاسیون AM تکنیک‌های زیر ارائه شده است.

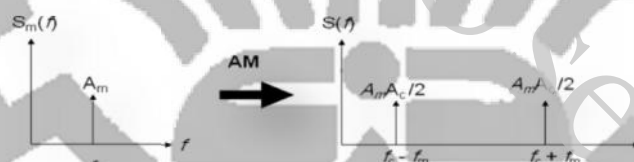


شکل (۴): شکل زمانی و طیف سیگنال حاصله در مدولاسیون DSB-WC

– مدولاسیون دو کنار باندی با ارسال حامل تضعیف شده (DSB-SC)^۱ جهت ارتقای بازده مدولاسیون DSB به لحاظ مصرف توان، می‌توان مولفه حامل موجود در طیف سیگنال DSB را حذف نمود. سیگنال مدوله شده در این روش به فرم زیر خواهد بود.

$$s(t) = A_c \cos(\tilde{S}_c t) A_m \cos(\tilde{S}_m t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos(\tilde{S}_c + \tilde{S}_m)t + \frac{A_m A_c}{2} \cos(\tilde{S}_c - \tilde{S}_m)t$$

شکل (۵) شکل طیف نوعی حاصله از مدولاسیون DSB-SC را نشان می‌دهد.



شکل (۵): صورت کلی طیف حاصله از مدولاسیون DSB-SC

– مدولاسیون دو کنار باندی با حامل کاهش یافته (DSB-RC)^۲

چنانچه حذف کامل مولفه حامل موجود در طیف سیگنال DSB میسر نباشد، به تضعیف آن (تا حد قابل قبول) بسنده می‌شود. در این حالت مدولاسیون DSB-RC حاصل می‌گردد.

(II) مدولاسیون تک کنار باندی یا SSB (Single-Side Band)

این مدولاسیون با حذف سیگنال حامل و یکی از باندهای کناری در مدولاسیون AM به دست می‌آید. لذا علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف توان، در استفاده از پهنای باند نیز کارایی موثری دارد. بسته به حذف باند کناری پایینی یا بالایی، یکی از دو نوع مدولاسیون USB یا LSB با سیگنال‌های مدوله شده زیر انجام می‌گیرد.

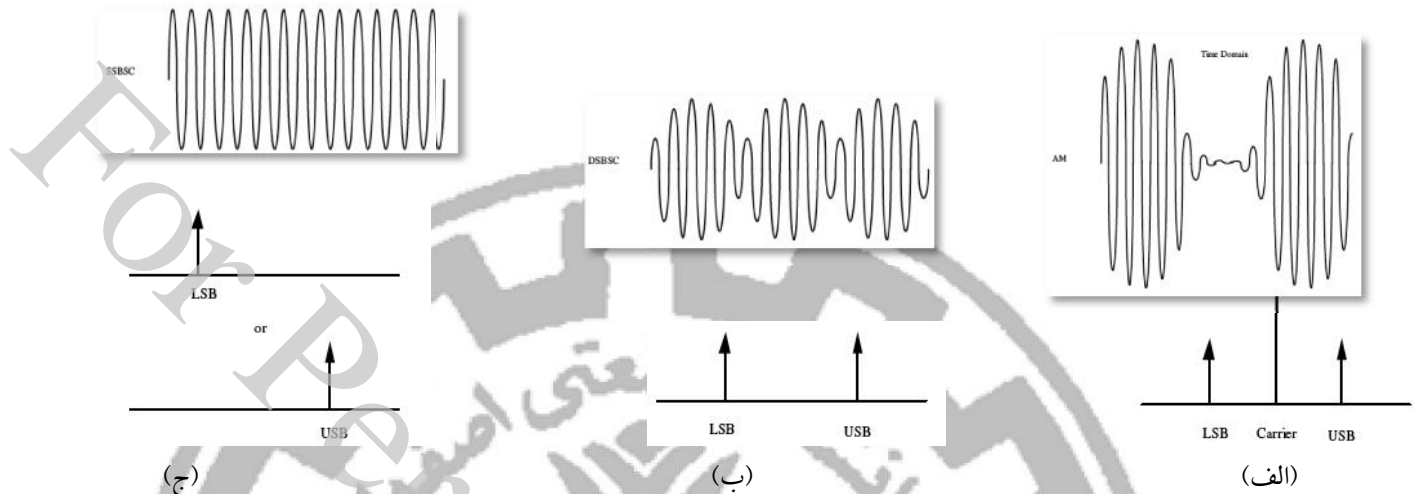
$$\text{USB : } s_{\text{USB}}(t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos(\tilde{S}_c t + \tilde{S}_m t), \quad \text{LSB : } s_{\text{LSB}}(t) = \frac{A_m A_c}{2} \cos(\tilde{S}_c t - \tilde{S}_m t)$$

^۱ Double-sideband modulation with reduced carrier

کاربرد مدولاسیون SSB نخستین بار در سال ۱۹۱۵ پیشنهاد گردیده و به دو دسته زیر طبقه‌بندی می‌شود:

الف- مدولاسیون SSB با حامل (SSB-WC)

ب- مدولاسیون SSB با حامل تضعیف شده (SSB-SC)



شکل (۶): شکل زمانی و طیف سیگنال های DSB-WC، DSB-SC و SSB-SC

(III) مدولاسیون کنار باند ردی یا VSB (Vestigial Side Band)

در سیستم‌های پخش تلویزیونی از این نوع مدولاسیون که با حذف جزئی از یکی از باندهای کناری در مدولاسیون AM به دست می‌آید، استفاده می‌شود.

(۲) مدولاسیون فرکانس یا FM (Frequency Modulation)

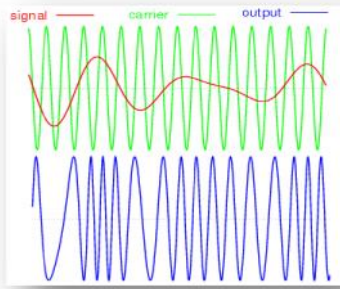
مدولاسیون فرکانس یا FM نوعی از مدولاسیون‌های نمائی آنالوگ است، که در آن اطلاعات ارسالی در فرکانس موج حامل قرار می‌گیرد. این مدولاسیون که در سال ۱۹۳۵ توسط آرمسترانگ^۱ پیشنهاد گردید، امروزه به طور وسیعی در سیستم‌های پخش رادیویی و فرستنده‌های تلویزیونی (به‌ویژه در باند VHF) استفاده می‌شود. در مدولاسیون FM که مثالی از آن در شکل (۷) آمده است، فرکانس لحظه‌ای سیگنال ارسالی متناسب با دامنه اطلاعات تغییر می‌کند. در این تکنیک، دامنه سیگنال ارسالی ثابت می‌ماند. فرض کنید $x_m(t)$ سیگنال پیام بوده و $x_c(t) = \cos(2\pi f_c t)$ نیز سیگنال حامل باشد. سیگنال ارسالی در مدولاسیون FM به صورت زیر است:

$$y(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_0^t x_m(\tau) d\tau) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta x_m(t))$$

که در آن f_Δ را انحراف فرکانسی می‌نامند. سیگنال FM را می‌توان به کمک اسلاتور کنترل‌شونده با ولتاژ یا VCO^۲ ایجاد نمود. مدولاسیون FM در دو نوع باندپهن و باندباریک مطرح است. در نوع اول پهنای باند بیشتری نسبت به مدولاسیون AM مصرف خواهد شد، که منجر به کاهش نویزپذیری و تداخل‌پذیری سیگنال می‌گردد.

^۱ Armstrong

^۲ Voltage Controlled Oscillator



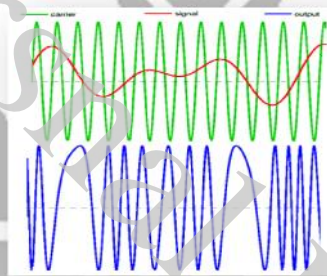
شکل (۷): تغییرات سیگنال در مدولاسیون FM

۳) مدولاسیون فاز یا PM (Phase Modulation)

مدولاسیون PM (شکل ۸) گونه ای از مدولاسیون آنالوگ است که در آن فاز لحظه‌ای سیگنال ارسالی متناسب با دامنه اطلاعات تغییر می‌کند. در این تکنیک، دامنه سیگنال ارسالی بر روی کانال ثابت می‌ماند. فرض کنید سیگنال پیام بوده و $x_c(t) = \cos(2\pi f_c t)$ نیز سیگنال حامل باشد. در این صورت، سیگنال ارسالی در مدولاسیون PM به صورت زیر خواهد بود.

$$y(t) = A \cos(2\pi f_c t + x_m(t) + \phi_c)$$

بر خلاف مدولاسیون FM، این مدولاسیون به دلیل تجهیزات پیچیده لازم برای آشکارسازی فاز از کاربرد کمتری برخوردار است. در شکل (۸)، در بالا سیگنال پیام و حامل و در پایین سیگنال مدوله شده را مشاهده می‌کنید.



شکل (۸): تغییرات سیگنال در مدولاسیون PM

بخش دوم: مدولاسیون‌های دیجیتال باند میانی

هدف از مدولاسیون دیجیتال، ارسال رشته‌ای دیجیتال از بیت‌ها بر روی یک کانال میان‌گذر آنالوگ است. به عنوان مثال، PSTN^۱ نمونه‌ای از یک کانال میان‌گذر است که در آن فیلتری میان‌گذر با باند عبور ۳۴۰۰-۳۰۰ هرتز به کار می‌رود. مدولاسیون دیجیتال را می‌توان به عنوان تبدیلی از دیجیتال به آنالوگ در نظر گرفت که در آن تغییرات ایجاد شده در سیگنال آنالوگ ارسالی از مجموعه‌ای شامل $M = 2^k$ سمبل دلخواه (الفبای مدولاسیون) انتخاب شده است. معمولاً در مدولاسیون‌های دیجیتال، هر سطح دامنه، فرکانس و یا فاز تعداد یکسانی از بیت‌ها (k) را کد خواهد کرد. چهار تکنیک اساسی برای مدولاسیون دیجیتال باند میانی وجود دارد، که عبارتند از:

- (۱) مدولاسیون ASK که در آن از تعداد محدودی سطح دامنه در هر سمبل استفاده می‌شود.
- (۲) مدولاسیون PSK که در آن از تعداد محدودی فاز حامل در هر سمبل استفاده می‌شود.
- (۳) مدولاسیون QAM که در آن از حداقل دو سطح دامنه و حداقل دو فاز حامل در هر سمبل استفاده می‌شود.
- (۴) مدولاسیون FSK که در آن از تعداد محدودی فرکانس حامل در هر سمبل استفاده می‌شود.

^۱Public Switched Telephone Network

^۲Signal Constellation

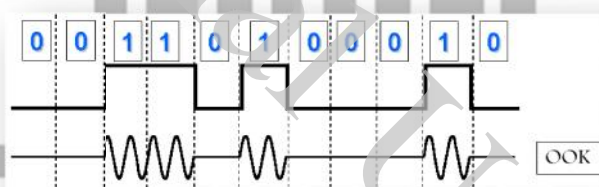
در سه روش اول، فرکانس حامل مورد استفاده در هر سمبل ثابت بوده و در نتیجه می توان الفبای مدولاسیون مورد استفاده را بر روی صفحه موسوم به صفحه تشکل سیگنال^۱ نشان داد. برای این کار کافی است سیگنال ارسالی به ازای هر یک از سمبل های ورودی ممکن به دو مولفه هم فاز و متعامد تجزیه شده و سپس دامنه مولفه هم فاز روی محور افقی و دامنه مولفه متعامد روی محور عمودی نشان داده شود.

(۱) کلید زنی تغییر دامنه یا ASK (Amplitude Shift Keying)

ASK نوعی مدولاسیون دیجیتال است که داده دیجیتال را با تغییرات دامنه موج حامل در هر سمبل نشان می دهد. در این روش، فاز و فرکانس موج حامل ثابت باقی می ماند. انواع متداول مدولاسیون ASK عبارتند از:

- کلیدزنی خاموش- روشن یا OOK (On-Off Keying):

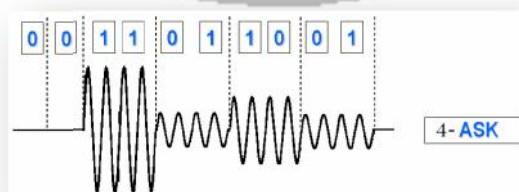
نوعی مدولاسیون دیجیتال است که داده دیجیتال را به صورت حضور یا عدم حضور موج حامل بر روی کانال نشان می دهد. بدین ترتیب، سیگنال حامل در حضور بیت یک دامنه غیر صفر (ON) و در حضور بیت صفر دارای دامنه صفر (OFF) است. مدولاسیون OOK ساده ترین نوع ASK به حساب آمده و معمولاً برای ارسال کدهای مورس از طریق کانال رادیویی به کار می رود. این روش به لحاظ راندمان طیفی (در مقایسه با روش هایی مثل FSK) کارآمد نیست و معمولاً برای مخابره داده در سرعت های پایین تا متوسط استفاده می شود. از دیگر موارد استفاده OOK می توان به سیستم های مخابرات نوری (به ویژه سیستم های مادون قرمز) اشاره کرد. شکل (۹) مدوله شدن یک رشته بیت را به روش OOK نشان می دهد.



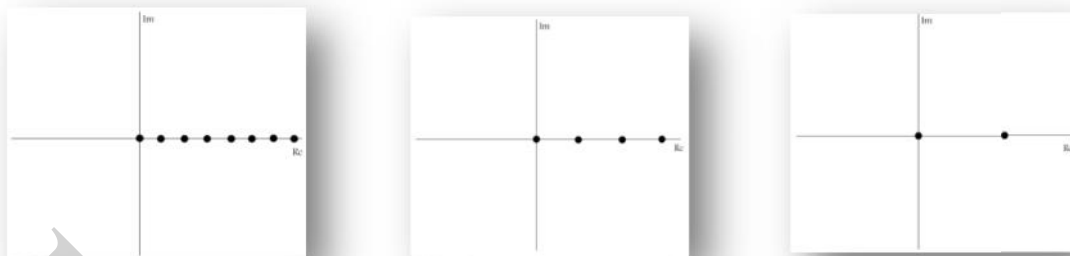
شکل (۹): مدولاسیون OOK

- مدولاسیون M-ASK (M-ary ASK)

با افزایش تعداد سطوح دامنه در سیگنال ارسالی می توان طرح کدینگ پیچیده تر و در نتیجه تعداد بیت بیشتری را ارسال نمود. به عنوان مثال، اگر M برابر ۴ باشد (وجود ۴ سطح دامنه)، هر سطح دامنه مبین ۲ بیت خواهد بود. لذا، در این حالت می توانیم در هر سمبل ۲ بیت (در حالت کلی $k = \log_2^M$ بیت) ارسال کنیم. روشن است که با افزایش M و با فرض ثابت ماندن سطح توان ارسالی، میزان تاثیرپذیری سیگنال ارسالی از نویز افزایش می یابد. شکل (۱۰) مدولاسیون 4-ASK بر روی یک رشته بیت را نشان می دهد.



شکل (۱۰): مدولاسیون ASK در چهار سطح



شکل (۱۱): تشکیل سیگنال برای مدولاسیون ASK در دو، چهار و هشت سطح

۲) کلید زنی تغییر فاز یا PSK (Phase Shift Keying)

مدولاسیون PSK نوعی از مدولاسیون دیجیتال است که داده دیجیتال (دنباله بیت) را با تغییرات فاز موج حامل (در هر سمبل) نشان می‌دهد. در این مدولاسیون دامنه و فرکانس موج حامل همواره ثابت باقی می‌ماند. فرم کلی سیگنال ارسالی به صورت زیر می‌باشد.

$$s_i(t) = a_{i1}\mathcal{E}_1(t) + a_{i2}\mathcal{E}_2(t) \quad i = 1, \dots, M$$

$$\mathcal{E}_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\tilde{\omega}_c t) \quad \mathcal{E}_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T}} \sin(\tilde{\omega}_c t)$$

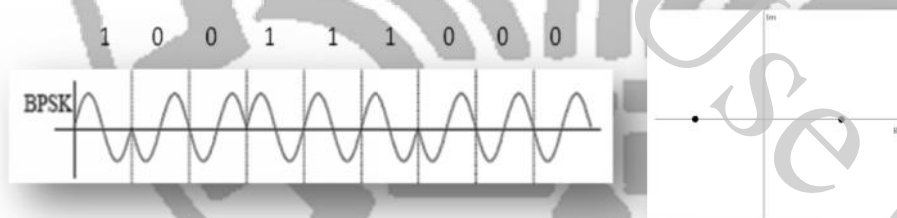
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(\tilde{\omega}_c t + \frac{2\pi f_i}{M}\right) \quad \text{یا}$$

$$a_{i1} = \sqrt{E_s} \cos\left(\frac{2\pi f_i}{M} + \theta_0\right) \quad a_{i2} = \sqrt{E_s} \sin\left(\frac{2\pi f_i}{M} + \theta_0\right)$$

$$E_s = E_i = \|\mathbf{s}_i\|^2$$

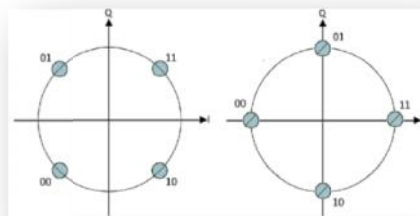
انواع متداول تکنیک‌های مرتبط با مدولاسیون PSK عبارتند از:

- مدولاسیون PSK دوتایی یا BPSK (Binary PSK): که در آن تعداد سمبل‌ها برابر $M=2$ بوده و حامل در هر سمبل با یکی از دو فاز صفر یا π ارسال می‌گردد.



شکل (۱۲): تشکیل سیگنال و یک نمونه سیگنال تولیدی برای مدولاسیون BPSK

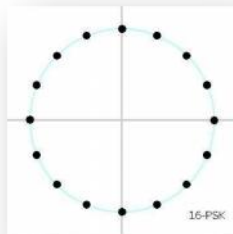
- مدولاسیون PSK چهارتایی یا QPSK (Quadrature PSK): که در آن تعداد سمبل‌ها برابر $M=4$ بوده و حداقل اختلاف فاز متناظر با دو سمبل مختلف در آن برابر با $\pi/2$ است.



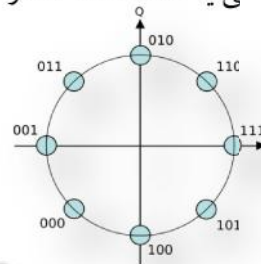
$$I = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\tilde{\omega}_c t) \quad Q = -\sqrt{\frac{2}{T}} \sin(\tilde{\omega}_c t)$$

شکل (۱۳): دو تشکیل سیگنال ممکن برای مدولاسیون QPSK

- مدولاسیون PSK هشت تایی یا 8-PSK: که در آن تعداد سمبل‌ها برابر $M=8$ است.
- مدولاسیون PSK شانزده تایی یا 16-PSK: که در آن تعداد سمبل‌ها برابر $M=16$ می‌باشد.



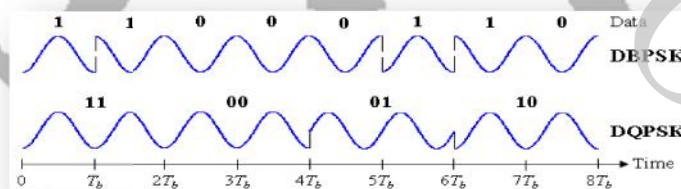
شکل (۱۵): تشکیل سیگنال مدولاسیون 16-PSK



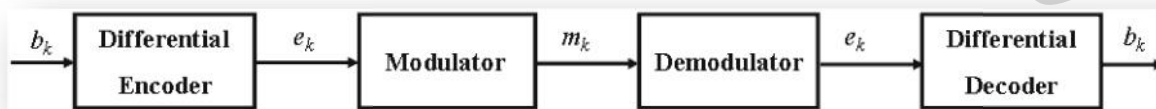
شکل (۱۴): تشکیل سیگنال مدولاسیون 8-PSK

- مدولاسیون BPSK تفاضلی یا DBPSK (Differential BPSK):
در مدولاسیون‌های فاز دیجیتال همواره این امکان وجود دارد که چرخش فاز اضافه شده توسط کانال (با مقدار نامعلوم) موجب چرخش شکل و در نتیجه ابهام در فاز سیگنال دریافتی شود. یک راه حل برای این مشکل آن است که داده ورودی به جای تعیین فاز سیگنال ارسالی، جهت تعیین تغییرات فاز سیگنال ارسالی نسبت به سمبل قبلی مورد استفاده قرار گیرد (مدولاسیون DPSK). مثلاً در BPSK تفاضلی یا DBPSK بیت یک با افزودن 180° درجه و بیت صفر با افزودن صفر درجه به فاز سیگنال در سمبل قبلی ارسال می‌شود.

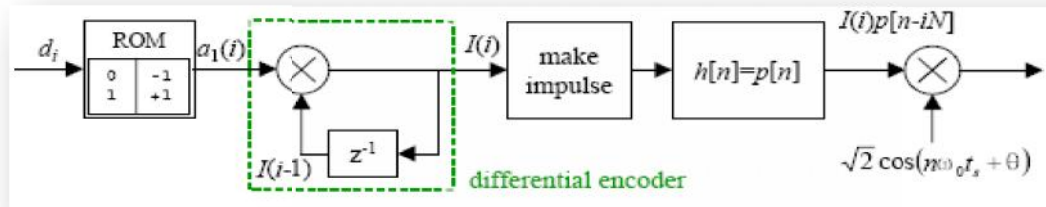
- مدولاسیون QPSK تفاضلی یا DQPSK (Differential QPSK):
در مدولاسیون QPSK تفاضلی یا DQPSK شیفتهای فاز صفر، 90° و 180° درجه به ترتیب در تناظر با داده‌های "00"، "01"، "11" و "10" مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدولاتور، سیگنال دریافتی به یکی از چهار نقطه فوق دمدوله شده و سپس تفاضل فاز بین سیگنال فعلی و قبلی محاسبه شده و بر اساس آن تصمیم‌گیری می‌شود. این رویکرد به راحتی به M سطح فاز $k = \log_2(M)$ بیت در سمبل قابل تعمیم است. شکل (۱۶) نمونه سیگنال مدوله شده برای مدولاسیون‌های DBPSK و DQPSK را نشان می‌دهد. شکل (۱۷) ساختار کلی یک سیستم مبتنی بر مدولاسیون PSK با ایده تفاضلی را نشان می‌دهد.



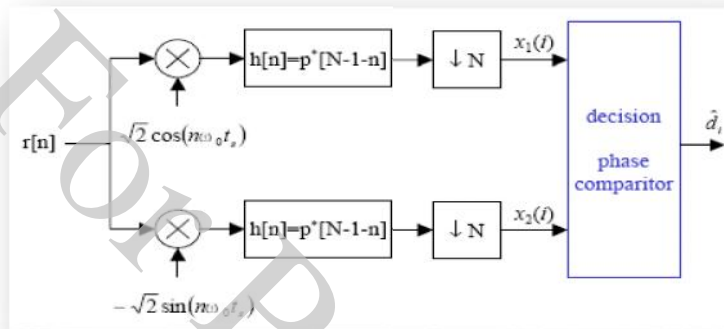
شکل (۱۶): یک نمونه از سیگنال مدوله شده برای مدولاسیون‌های DBPSK و DQPSK



شکل (۱۷): ساختار کلی یک سیستم مبتنی بر مدولاسیون PSK با ایده تفاضلی



شکل (۱۸): ساختار یک مدولاتور DPSK



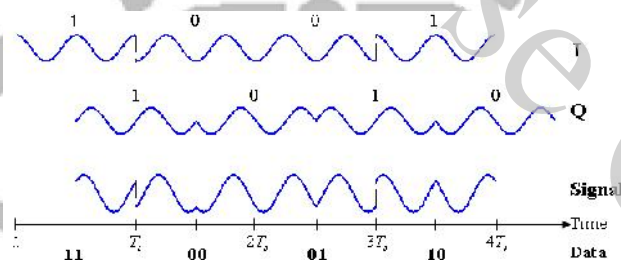
شکل (۱۹): ساختار یک دمدولاتور DPSK

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_2(i)}{x_1(i)} \right)$$

$$\hat{d}_i = \begin{cases} 0 & |\theta_i - \theta_{i-1}| \geq \pi/2 \\ 1 & |\theta_i - \theta_{i-1}| < \pi/2 \end{cases}$$

• مدولاسیون QPSK دارای آفست یا Offset QPSK (OQPSK):

در مدولاسیون QPSK معمولی در هر سمبل یکی از چهار فاز ممکن برای سیگنال استفاده می‌شود. این امر در بعضی از موارد، موجب جهش‌های فاز به میزان ۱۸۰ درجه در شکل موج ارسالی می‌شود که عملکرد بد فرکانسی و کیفیت بد سیستم مخابراتی را در پی دارد.^۱ برای رفع این نقیصه مدولاسیون OQPSK یا SQPSK^۲ پیشنهاد شده است. در این نوع مدولاسیون، اختلاف زمانی ثابتی به اندازه یک زمان بیت (نصف زمان سمبل) بین تغییرات مربوط به بیت‌های زوج و فرد ایجاد می‌شود. به این ترتیب، مولفه‌های هم‌فاز و متعامد حامل هرگز به طور هم‌زمان تغییر نمی‌کنند. لذا جهش‌های فاز سیگنال ارسالی به ۹۰ درجه محدود می‌شود. شکل (۲۰) یک نمونه از سیگنال مدوله شده برای مدولاسیون OQPSK را نشان می‌دهد.



شکل (۲۰): یک نمونه از سیگنال مدوله شده برای مدولاسیون OQPSK

شکل (۲۱) تشکل سیگنال OQPSK و تغییرات فاز حامل برای یک ورودی نمونه در دو مدولاسیون QPSK و OQPSK را نشان می‌دهد.

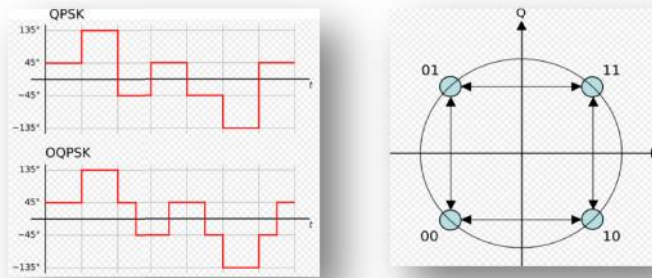
دهد.

^۱ برای مطالعه بیشتر رجوع کنید به فصل ششم از کتاب "Digital Communication" نوشته John R Barry, Edward A LeeDavid G

Messerschmitt و یا فصل چهارم از کتاب "Digital Communication" نوشته John G. Proakis

^۲Offset QPSK

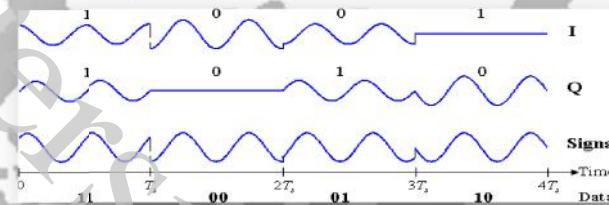
^۳Staggered QPSK



شکل (۲۱): شکل سیگنال OQPSK و تغییرات فاز حامل در دو مدولاسیون QPSK و OQPSK

• مدولاسیون $\pi/4$ -QPSK:

در این مدولاسیون دو شکل سیگنال چهارتایی مشابه که نسبت به هم به میزان 45° درجه چرخانده شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیگنال ارسالی در بیت‌های فرد، با استفاده از یکی از دو شکل سیگنال و در بیت‌های زوج با استفاده از دیگری انتخاب می‌شود. این شیوه میزان حداکثر جهش فاز ممکن را از 180° به 135° درجه کاهش می‌دهد. شکل (۲۲) نمونه‌ای از سیگنال مدوله شده $\pi/4$ -QPSK را نشان می‌دهد.

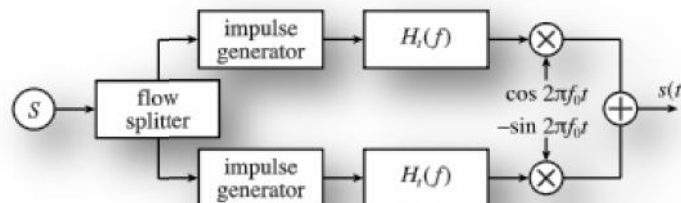


شکل (۲۲): یک نمونه از سیگنال مدوله شده برای مدولاسیون $\pi/4$ -QPSK

۳) مدولاسیون دامنه تریبی (Quadrature Amplitude Modulation) QAM

مدولاسیون QAM مدولاسیونی است که با تغییر دامنه دو حامل سینوسی دارای 90° درجه اختلاف فاز (مولفه های هم فاز و متعامد) به انتقال اطلاعات می‌پردازد. به عبارت دیگر، در این مدولاسیون از هر دو بعد صفحه شکل سیگنال استفاده می‌شود. ایده این مدولاسیون، در مورد هر دو دسته سیگنال‌های آنالوگ و دیجیتال قابل استفاده است. در واقع، مدولاسیون‌های AM، ASK، PM، PSK، FM و FSK (که بعداً توضیح داده می‌شود)، حالت‌های خاصی از QAM به حساب می‌آیند. اگر چه این مدولاسیون به دو شکل آنالوگ و دیجیتال پیاده‌سازی می‌شود، اما در این جا از ذکر جزئیات نسخه آنالوگ آن خودداری و تنها به این نکته بسنده می‌کنیم که مدولاسیون QAM آنالوگ در سیستم‌های تلویزیونی PAL و NTSC جهت ارسال اطلاعات رنگ به کار می‌رود.

صورت دیجیتال QAM را Digitized QAM گویند. ساختار شکل (۲۳) بلوک دیاگرام فرستنده یا مدولاتور QAM را نشان می‌دهد. مشابه سایر مدولاسیون‌های دیجیتال، رسم شکل سیگنال بهترین راه توصیف این تکنیک است. انواع مختلف مدولاسیون QAM بر اساس فرم شکل سیگنال آن‌ها تعریف شده است. مهم‌ترین آن‌ها عبارت هستند از:



شکل (۱۷): بلوک دیاگرام یک فرستنده یا مدولاتور QAM

- مدولاسیون QAM مربعی با فرم توری یا Grid:

در نمایش تشکل سیگنال QAM، نقاط به صورت مربعی با فواصل افقی و عمودی یکسان قرار می گیرند. از آنجائی که در مخابرات دیجیتال هدف ارسال داده های باینری است، تعداد نقاط به صورت توان هائی از دو است. به علاوه، در ساختار مربعی تعداد نقاط معمولاً به صورت توان چهار بوده و لذا مشهورترین انواع مدولاسیون QAM مربعی عبارتند از 16-QAM، 64-QAM و 256-QAM. واضح است که با افزایش مرتبه مدولاسیون QAM می توان تعداد بیت بیشتری در هر سمبل را ارسال نمود، اما با فرض ثابت ماندن انرژی سیگنال ارسالی، نقاط موجود در تشکل به یکدیگر نزدیک شده و آسیب پذیری آنها نسبت به نویز و تداخلات افزایش می یابد. ساختار تشکل QAM را می توان با بیان ریاضی به صورت زیر توصیف نمود.

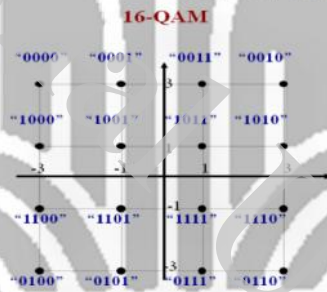
$$S_i(t) = \sqrt{2E_i/T} \cos(\tilde{S}_c t + \{i\})$$

$$S_i(t) = a_{i1}\mathbb{E}_1(t) + a_{i2}\mathbb{E}_2(t) \quad i=1, \dots, M; \quad \mathbb{E}_1(t) = \sqrt{2/T} \cos(\tilde{S}_c t) \quad \mathbb{E}_2(t) = \sqrt{2/T} \sin(\tilde{S}_c t)$$

که در آن a_{i1} و a_{i2} سمبل های PAM و $E_s = 2(M-1)/3$ است.

$$(a_{i1}, a_{i2}) = \begin{bmatrix} (-\sqrt{M}+1, \sqrt{M}-1) & (-\sqrt{M}+3, \sqrt{M}-1) & \dots & (\sqrt{M}-1, \sqrt{M}-1) \\ (-\sqrt{M}+1, \sqrt{M}-3) & (-\sqrt{M}+3, \sqrt{M}-3) & \dots & (\sqrt{M}-1, \sqrt{M}-3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-\sqrt{M}+1, -\sqrt{M}+1) & (-\sqrt{M}+3, -\sqrt{M}+1) & \dots & (\sqrt{M}-1, -\sqrt{M}+1) \end{bmatrix}$$

در شکل (۲۴)، تشکل سیگنال مدولاسیون 16-QAM آمده است.



شکل (۲۴): تشکل سیگنال مربوط به مدولاسیون 16-QAM

در این شکل از کدگذاری خاکستری یا Gray coding استفاده شده است.^۱ این مدولاسیون قادر به ارسال ۴ بیت در سمبل است. ساختارهای غیرمستطیلی نیز برای تشکل سیگنال QAM وجود دارد که به برخی از آنها اشاره می کنیم.

- مدولاسیون QAM مربعی با فرم غیر توری:

در شکل (۲۵) دو ساختار مربعی با فرم غیر توری برای تشکل سیگنال 8-QAM نشان داده شده است.

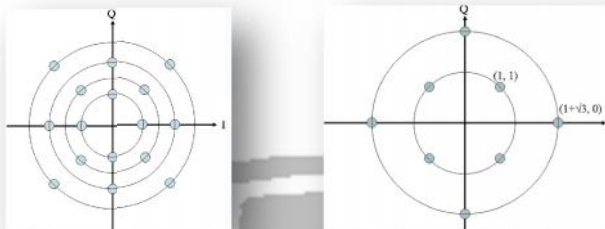


شکل (۲۵): دو ساختار مربعی با فرم غیر توری برای تشکل سیگنال مربوط به مدولاسیون 8-QAM

^۱ برای مطالعه بیشتر در مورد مفهوم کدگذاری خاکستری، مراجعه کنید به فصل چهارم از کتاب "Digital Communication" نوشته John G. Proakis

- مدولاسیون QAM غیرمربعی:

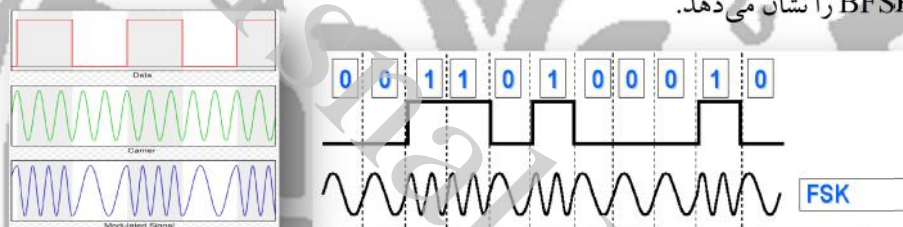
معروف ترین ساختار مدولاسیون QAM غیرمربعی، ساختار دایره‌ای است. (شکل (۲۶)) نشان داده شده است که این ساختار به لحاظ احتمال خطا در انرژی ثابت در بین ساختارهای ممکن بهینه است.



شکل (۲۶): ساختار تشکیل سیگنال دایره‌ای مربوط به مدولاسیون های 8-QAM و 16-QAM

- ۴) کلید زنی تغییر فرکانس یا FSK (Frequency Shift Keying)

در این نوع مدولاسیون، فرکانس حامل (ضمن ثابت ماندن دامنه) با توجه به تغییرات رشته بیت پیام تغییر می‌کند. ساده‌ترین نوع FSK، BFSK یا همان دوتائی است، که به وسیله آن می‌توان تنها یک بیت را ارسال نمود. شکل (۲۷) نمونه‌هایی از یک رشته بیت مدوله شده به روش BFSK را نشان می‌دهد.



شکل (۲۷): نمونه‌هایی از یک رشته بیت مدوله شده به روش FSK

بدیهی است ارسال بیش از یک بیت در هر سمبل نیز با ایده مشابه و به کارگیری بیش از دو فرکانس برای حامل میسر است. برخی دیگر از انواع متداول تکنیک‌های مرتبط با مدولاسیون FSK عبارتند از:

- AFSK یا Audio frequency-shift keying روشی مناسب برای ارسال دیجیتال صوتی از طریق رادیو/تلفن به شمار می‌رود.
- MSK یا Minimum-shift keying فرمی از مدولاسیون فاز است که به لحاظ بازده فرکانسی بسیار کارآمد می‌باشد. در این نوع مدولاسیون تفاضل بین دو فرکانس مورد استفاده برای حامل دقیقاً برابر نصف نرخ ارسال بیت است.
- MFSK یا Multi-frequency shift keying
- DTMF یا Dual-tone multi-frequency
- CPFSK یا Continuous-phase frequency-shift keying

- ۵) مدولاسیون‌های فاز پیوسته (Continuous Phase)

دسته‌ای از مدولاسیون‌های دیجیتال هستند که در آن‌ها فاز حامل هیچ‌گونه جهشی را تجربه نمی‌کند. این ویژگی رفتار مناسب مدولاسیون به لحاظ طیفی و نیز شکل مناسب سیگنال تولیدی برای مازول فرستنده را تضمین می‌کند. پاره‌ای از معروف‌ترین روش‌های مورد استفاده در مدولاسیون فاز پیوسته عبارتند از:

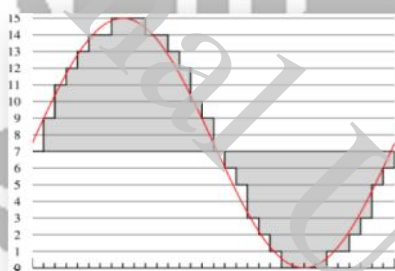
- MSK یا Minimum-shift keying: نوعی FSK همدوس و از نظر پهنای باند بهینه است که اشاره شد.
- GMSK یا Gaussian minimum-shift keying: تعمیمی از روش MSK است که در آن از شکل‌دهی پالس (Pulse Shaping)^۱ به صورت گوسی استفاده می‌شود. این روش، امروزه به‌طور گسترده‌ای در سیستم مخابرات سلولی GSM استفاده می‌شود.
- (۶) مدولاسیون تخصیص فرکانس متعامد OFDM (Orthogonal Freq. Division Multiplexing)^۲

بخش سوم: مدولاسیون‌های باند پایه

مدولاسیون باند پایه روشی برای انتقال اطلاعات در باند پایه است که از هیچ‌گونه حاملی استفاده نمی‌کند و معمولاً تنها در مورد ارسال اطلاعات دیجیتال در مسافت‌های کوتاه کاربرد دارد. در ادامه، به بررسی پاره‌ای از تکنیک‌های مدولاسیون در باند پایه می‌پردازیم (که همگی روش‌های دیجیتال هستند):

(۱) مدولاسیون پالس‌های کد شده یا PCM (Pulse-Code Modulation):

این مدولاسیون عملاً نوعی تبدیل سیگنال از آنالوگ به دیجیتال است. در واقع سیگنال PCM نمایشی دیجیتال از یک سیگنال آنالوگ است که به‌طور یکنواخت نمونه‌برداری و سپس چندی‌سازی و به صورت باینری نمایش داده شده است. این مدولاسیون به طرز گسترده‌ای در سیستم‌های تلفنی و استانداردهای تبادل اطلاعات بین کامپیوترها به کار می‌رود. شکل (۲۸) نمونه‌ای از نمونه‌برداری و چندی‌سازی سیگنال در مدولاسیون PCM در چهار بیت را نشان می‌دهد.



شکل (۲۸): نمونه‌ای از نمونه‌برداری و چندی‌سازی سیگنال در مدولاسیون PCM-4

(۲) مدولاسیون عرض پالس یا PWM (Pulse-Width Modulation):

نوعی مدولاسیون است که در آن زمان وظیفه (عرض پالس) سیگنال مربعی ارسالی متناسب با سطح سیگنال پیام تغییر می‌کند. شکل (۲۹) نمونه‌ای از سیگنال PWM را نشان می‌دهد.

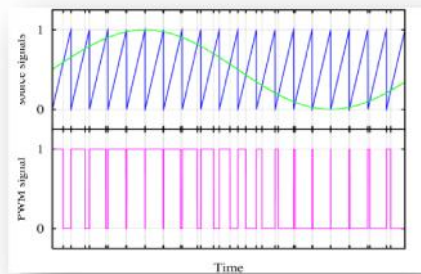
(۳) مدولاسیون موقعیت پالس یا PPM (Pulse-Position modulation):

روش مدولاسیونی است که در آن k بیت پیام به وسیله یک پالس مربعی که در یکی از $M=2^k$ بازه زمانی متوالی ممکن ارسال می‌شود، انتقال می‌یابد. این M بازه به‌طور متوالی (مثلاً در هر T ثانیه یک بار) تکرار می‌شوند.

^۱ جهت اطلاعات بیشتر در زمینه مفهوم و روش‌های شکل‌دهی پالس رجوع کنید به فصل پنجم از کتاب "سیستم‌های مخابراتی آنالوگ و دیجیتال"

نوشته سام شانموگام و ترجمه دکتر محمد رضا عارف.

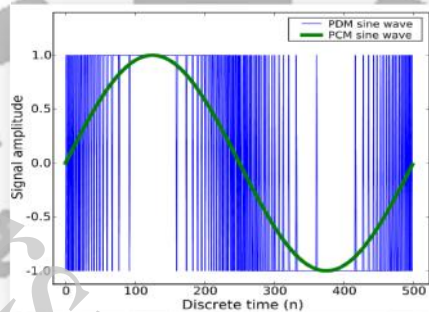
^۲ جهت اطلاعات بیشتر در زمینه OFDM رجوع کنید به کتاب "OFDM for Wireless Communications" نوشته Y. (G.) Li و G. Stüber.



شکل (۲۹): نمونه ای از سیگنال PWM

(۴) مدولاسیون چگالی پالس یا PDM (Pulse-Density modulation)

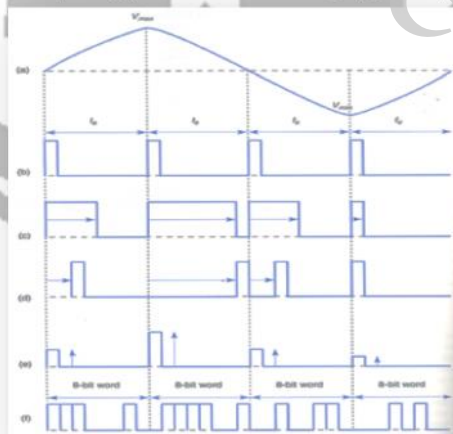
نوعی از مدولاسیون باند پایه است که در آن چگالی تعداد پالس‌های موجود در هر بازه زمانی از سیگنال مدوله شده با دامنه سیگنال پیام متناسب است. شکل (۳۰) مدولاسیون PDM یک دوره سینوسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳۰) مدولاسیون یک دوره سینوسی به روش PDM

(۵) مدولاسیون دلتا:

تبدیلی از آنالوگ به دیجیتال (و بالعکس) است، که برای ارسال سیگنال صوت در مواردی که کیفیت سیگنال چندان مهم نیست مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش در واقع ساده‌ترین نسخه تفاضلی از PCM است که در آن تفاضل بین هر دو نمونه متوالی از سیگنال صوت به یک دنباله n بیتی کد می‌شود. در مدولاسیون دلتا، تفاضل هر نمونه با نمونه قبلی صرفاً در یک بیت کد می‌شود. به عبارت دیگر اگر روند سیگنال افزایشی باشد، یک بیت یک و در غیر این صورت یک بیت صفر روی کانال ارسال می‌شود. این روش موجب کاهش گستره دینامیکی سیگنال پیام و در نتیجه افزایش دقت در ارسال آن برای سیگنال‌های لخت (مثل سیگنال صوت) می‌شود.



شکل (۳۱) مقایسه مدولاسیون‌های دیجیتال باند پایه: سیگنال آنالوگ (b) پالس نمونه‌برداری (c) PWM (d) PPM (e) PAM (f) PCM

۲- دستور کار

بخش اول: مدولاسیون‌های آنالوگ باند میانی

آزمایش ۱

در این قسمت به بررسی دو مدولاسیون آنالوگ AM و FM می‌پردازیم. نخست، تمرکز خود را بر مدولاسیون AM معطوف می‌کنیم. آزمایش ۱-۱: تابع زیر را در نظر بگیرید:

```
function [s,t]=waveform(f,Ts,Tm,WF)
if Ts>1/(100*f),
    msgbox('Ts*f must be less than 0.01'); s=0; t=0;
else
    i=0;
    for time=0:Ts:Tm,
        i=i+1;
        t(i)=time;
        switch WF,
            case 'Sine', s(i)=(1+sin(2*pi*f*time))/2;
            case 'Square', s(i)=1-(mod(floor(time*f*2),2)>0);
            case 'Triangle', n=floor(time*f); ttime=time-(n+0.5)/f; s(i)=2*f*abs(ttime);
        end
    end
end
end
end
```

با استفاده از این تابع پنج پریود از سه شکل موج مربعی، سینوسی و مثلثی با فرکانس $f=100\text{ Hz}$ تولید و به ترتیب در s_1 ، s_2 و s_3 ذخیره نمائید. (به منظور داشتن شکل موج‌های مناسب جهت مراحل بعدی، مقادیر آرگومان‌های ورودی را طوری تنظیم کنید که در هر پریود سیگنال حداقل ۱۰۰ نمونه گرفته شود.) (R.1) سه شکل موج حاصله را ثبت کرده و سپس به کمک تابع زیر آن‌ها را با فرکانس حامل F_c مدوله نمائید. (مقدار F_c بزرگ‌تر از دو برابر فرکانس سیگنال اطلاعات و کوچک‌تر از یک‌دهم فرکانس نمونه‌برداری یعنی $0.1/T_s$ انتخاب شود.) نتایج حاصله را مشاهده و با دقت مناسب ثبت کنید. (R.2)

```
function [S,T]=AMmod(s,t,Fc)
Ts=t(2); Tm=t(numel(t)); k=0;
if Ts>1/(10*Fc),
    msgbox('Fc must be between 2*f & 0.1/Ts'); S=0; T=0;
else
    C=sin(2*pi*Fc*[0:Ts:Tm]); S=s.*C; T=t;
end
end
```

آزمایش ۱-۲: تابع $[s,t]=\text{Envelope_detector}(S,T)$ را بنویسید که شکل موج‌های مدوله‌شده را به‌روش آشکارساز پوش بازسازی کند. با این تابع حاصل بازسازی شکل موج‌های مدوله‌شده را مشاهده و ثبت کنید. حدود مطرح شده برای F_c و T_s را توجه کنید. (R.3)

دامنه سیگنال‌های s_1 ، s_2 و s_3 بین چه حدودی تغییر می‌کند؟ چرا؟ (R.4) تابع مولد این سیگنال‌ها را طوری تغییر دهید که سیگنال‌ها بین ۱ و -۱ تغییر کنند. تابع جدید را با نام مناسب ذخیره کنید. (R.5) مراحل مدولاسیون و بازسازی را مجدداً انجام دهید. (R.6) چه اشکالی می‌بینید؟ راه حل مورد استفاده در عمل برای این مشکل چیست؟ (R.7) بر اساس این مشاهده، مزایا و معایب بازسازی با آشکارساز پوش را مورد بحث قرار دهید. (R.8)

آزمایش ۱-۳: عمل دمدولاسیون سه شکل موج قبلی را بار دیگر با تابع AMdemod (از توابع پیش فرض MATLAB) انجام دهید. (R.9) این کار را در حالت تغییرات سیگنال بین ۱ و -۱ نیز تکرار و نتایج را مقایسه کنید. (R.10) مشاهده خود را در دو حالت شرح دهید. با مراجعه به ساختار AMdemod این مشاهده را توجه کنید. (R.11)

آزمایش ۲

در این آزمایش مدولاسیون فاز آنالوگ (FM) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

آزمایش ۱-۲: مجدداً سه شکل مربعی، سینوسی و مثلثی قسمت قبل را این بار با فرکانس ۱۰ و نرخ نمونه‌برداری 10^5 تولید کرده و با استفاده از تابع زیر به‌شیوه FM با فرکانس مرکزی 100 Hz مدوله نمایید.

```
function [S,T]=FMmod(s,t,Fc,df)
Ts=t(2);      ss=s*2-1;      Tm=t(numel(t));
phi=cumsum(ss)*Ts; S=sin(2*pi*Fc*t+2*pi*df*phi);      T=t;
end
```

df را از ۱۰ تا ۹۰ تغییر داده و تغییرات تدریجی خروجی را مشاهده و به‌صورت مناسب ثبت کنید. (R.12)

تابع $[s,t]=\text{FMdmod}(S,T,Fc,df)$ را به نحوی بنویسید که نخست از شکل موج مدوله شده مشتق گرفته و سپس به کمک تابع Envelope_detector که قبلاً نوشته بودید پوش شکل موج حاصل را استخراج کرده و از این طریق دمدولاسیون FM را به انجام رساند. شکل موج‌های حاصله از این روش بازسازی را ثبت و با سیگنال‌های اولیه مقایسه کنید. (R.13)

آزمایش ۲-۲: این کار را مجدداً با استفاده از تابع آماده MATLAB به نام `fmdemod` انجام داده (در تنظیم آرگومان ورودی به فاز اولیه (`ini_phase`) دقت کنید) و نتایج دو روش را مقایسه کنید. (R.14) با مراجعه به بدنه دو تابع مورد استفاده، اختلاف عملکرد آنها را (به ویژه در مورد موج مربعی) توجیه کنید. (R.15) (تذکر: برای رسم خروجی می توانید از `plot()` استفاده نمایید).

آزمایش ۲-۳: کلیه مراحل فوق را با نرخ نمونه برداری 10^4 نمونه بر ثانیه، $f_c=1000\text{ Hz}$ ، $f=100\text{ Hz}$ و $df=500\text{ Hz}$ تکرار و عملکرد دو تابع را در مدولاسیون FM ملاحظه کنید. (R.16) علت مشاهدات خود را (با توجه به ساختار توابع) توضیح دهید. (R.17)

بخش دوم: مدولاسیون های آنالوگ باند میانی - تحلیل طیفی و نویز

آزمایش ۳

در این قسمت به طیف فرکانسی سیگنال های AM و FM می پردازیم.

آزمایش ۳-۱: با قرار دادن $f_c=1000\text{ Hz}$ ، $f=100\text{ Hz}$ و $df=500\text{ Hz}$ و نرخ نمونه برداری 10^4 نمونه بر ثانیه و با استفاده از توابع مناسب MATLAB (و احتمالاً نوشتن کدهای لازم) طیف هر یک از دو سیگنال مدوله شده AM و FM را برای هر یک از سه شکل - موج تولید شده در بندهای قبل مشاهده و ثبت کنید. آیا نتایج مطابق انتظار شماست (R.18)؟ اثر کاهش (افزایش) فرکانس سیگنال اطلاعات (f) و df بر طیف های حاصله را بررسی کرده و توضیح دهید. (R.19)

آزمایش ۴

حال به بررسی اثر نویز بر عملکرد مدولاسیون های AM و FM می پردازیم. با استفاده از توابع قبلی با $f=10\text{ Hz}$ و $T_s=0.0001$ شکل موج مثلی مناسب را تولید کنید.

آزمایش ۴-۱: حال با استفاده از تابع زیر حاصل عبور سیگنال AM از کانال AWGN و بازسازی آن به دو روش قبلی را در مقادیر مختلف SNR از ۵۰ تا صفر دسی بل مشاهده و ثبت و کیفیت سیگنال های بازسازی شده را مقایسه کنید. (R.20)

```
function [s1,t1,s2,t2]=AMnoise(s,t,Fc,Ts,SNR)
```

```
[SS,T]=AMmod(s,t,Fc); S=awgn(SS,SNR,'measured');
```

```
[s1,t1]=envelope_detector(S,T); s2=amdemod(S,Fc,1/Ts,-pi/2); t2=t1;
```

```
end
```

آزمایش ۴-۲: با به کارگیری تابع `FMnoise(s,t,Fc,Ts,df,SNR)` که خود مشابه تابع `AMnoise` و به کمک توابع قبلی می نویسد، (به ازای $f_c=1000\text{ Hz}$ و $df=400\text{ Hz}$) مراحل فوق را برای روش مدولاسیون FM تکرار کنید. (R.21)

آزمایش ۵

در این قسمت مدولاسیون OOK به عنوان ساده ترین مدولاسیون دیجیتال باند پایه مورد بررسی قرار می گیرد. تابع زیر را در نظر بگیرید

```
function [bitstream,N,RATIO]=My_modem(bit_stream,Fc,Tsym,Ts,Mod_Type,M,SNR)
k=log2(M); len=numel(bit_stream);
if mod(len,k)>0,
    z=zeros(1,k-mod(len,k)); bit_stream=[bit_stream,z];
end
N=numel(bit_stream);
[B,A]=Baseband_mod(bit_stream, Mod_Type,k);
v=base2pass(B,A,Fc,Tsym,Ts);
vv=awgn(v,SNR,'measured');
[BB,AA]=pass2base(vv,Fc,Tsym,Ts);
bitstream=Baseband_dmod(BB,AA, Mod_Type,k);
[NUMBER,RATIO]=biterr(bit_stream,round(bitstream));
End
```

که در آن دو تابع فراخوانده شده به صورت زیر هستند. دو تابع

```
function v=base2pass(B,A,Fc,Tsym,Ts)
n=0:Tsym/Ts-1; I=cos(2*pi*Fc*n*Tsym); Q=sin(2*pi*Fc*n*Tsym); v=[];
for k=1:length(A), vk=B(k)*I+A(k)*Q; v=[v,vk]; end
end

function [B,A]=pass2base(v,Fc,Tsym,Ts)
len=Tsym/Ts; n=0:len-1; I=cos(2*pi*Fc*n*Tsym); Q=sin(2*pi*Fc*n*Tsym);
for k=1:(length(v)/len), B(k)=2*sum(v((k-1)*len+1:k*len).*I)/len;
A(k)=2*sum(v((k-1)*len+1:k*len).*Q)/len;
end
end
```

دو تابع Baseband_dmod و Baseband_mod را به نحوی بنویسید که نوع مدولاسیون Mod_Type را که یکی از مقادیر OOK, PSK, ASK یا QAM را دارد گرفته و با دریافت ورودی k که معرف تعداد بیت ارسالی بر هر سمبل است، به ترتیب عمل مدولاسیون و دمدولاسیون باند پایه را از نوع متناظر انجام می دهند.

آزمایش ۵-۱: حال یک دنباله بیت تصادفی به طول مناسب را در متغیر bit_stream ذخیره کنید. مقادیر فرکانس حامل مدولاسیون F_c ، دوره زمانی سمبل T_{sym} و زمان نمونه برداری T_s را در حدود مناسبی مقداردهی کنید. به عنوان مثال، $F_c=1000\text{ Hz}$ ، T_{sym} ، $T_s=0.0001\text{ Sec}$ و $=0.01\text{ Sec}$ می تواند یک انتخاب مناسب باشد. به کمک تابع نوشته شده فوق، دنباله bit_stream را حداقل در پنج نسبت سیگنال به نویز (SNR) مختلف بین 20- تا 30dB (مثلاً در ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۰ و ۱۰- و ۲۰- دسی بل) به روش OOK مدوله نموده و پس از عبور از کانال AWGN بازسازی نمائید. در هر مرحله، شکل سیگنال در مدولاتور (بدون نویز)، شکل زمانی سیگنال OOK خروجی مدولاتور، شکل زمانی سیگنال OOK نویزی پس از عبور از کانال و شکل سیگنال نویزی (پس از عبور از کانال) را در SNR داده شده، رسم کنید. شکل های حاصله در هر مرحله را بررسی و به دقت (با نامگذاری مناسب) ثبت نمائید. اثر افزایش نویز (کاهش SNR) را بر شکل سیگنال باند میانی و هم چنین بر شکل سیگنال حاصله در دمدولاتور شرح دهید و نمودار میزان تغییرات خطا (RATIO) نسبت به تغییرات SNR را رسم نمائید. (R.22) (راهنمایی: برای تولید رشته بیت می توانید از تابع $x=\text{randint}(1,n)$ استفاده کنید. این تابع یک رشته از اعداد تصادفی به طول n تولید و در x ذخیره می کند).

آزمایش ۵-۲: اکنون استفاده از آشکارساز پوش در مدولاسیون OOK را بررسی می کنیم. در این مرحله و به طور موقت در تابع My_modem سه خط آخر قبل از پایان تابع را با خطوط زیر جایگزین کنید.

```
Pw=vv.*vv;
for n=1:N, S(n)=sum(Pw(ceil((n-1)*(Tsym/Ts))+1:ceil(n*(Tsym/Ts))))/(Tsym/Ts); end
bitstream=round(S);
[NUMBER,RATIO]=biterr(bit_stream,bitstream);
```

روند و مراحل طی شده در بند قبل را مجدداً با وجود این تغییر تکرار کنید. روش آشکارسازی سیگنال در این حال به چه صورت است و نسبت به قبل چه مزایا و چه معایبی دارد (R.26)؟ روند تغییر شکل سیگنال تولیدی در دمدولاتور با کاهش SNR در این حالت را با حالت قبل مقایسه کنید. از این مقایسه چه نتایجی می توان گرفت؟ (R.27) عدم تقارن مشهود در شکل سیگنال را چگونه توجیه می کنید؟ (R.28)

بخش چهارم: مدولاسیون های دیجیتال باند میانی-۲

آزمایش ۶

در این بخش مدولاسیون ASK در M سطح را مورد کاوش قرار می دهیم.

آزمایش ۶-۱: آزمایش ۵-۱ را به طور کامل برای مدولاسیون ASK در $M = 4, 8$ سطح تکرار کنید. از مقادیر F_c ، T_{sym} و T_s قبلی استفاده کنید. (R.29) نتایج را با مدولاسیون OOK مقایسه و به نقاط ضعف و قوت هر روش اشاره کنید. (طول دنباله بیت bit_stream بزرگ تر از آزمایش های قبلی انتخاب شود تا تشکل سیگنال به طور کامل قابل مشاهده باشد). (R.30)

آزمایش ۶-۲: حال به بررسی کاربرد آشکارساز پوش در مدولاسیون ASK می پردازیم. موارد خواسته شده در بند قبل را بار دیگر به طور کامل تکرار کنید، اما این بار با اعمال تغییراتی مشابه آزمایش ۵-۲ در متن کد مورد استفاده از روش غیرهمزمان (آشکارساز پوش) برای این کار استفاده کنید. (R.31) روش آشکارسازی مزایا و معایب این روش را شرح داده و روند تغییرات تشکل سیگنال در این روش با کاهش SNR را با روش قبل مقایسه کنید. (R.32) نحوه پراکنده شدن نقاط تشکل سیگنال با کاهش SNR چه تفاوتی با بند قبل دارد؟ (R.33) توضیح دهید که به جای قاعده تصمیم گیری نزدیک ترین همسایه، می توان از چه ضابطه یا رویکرد دیگری استفاده کرد تا احتمال خطا در این حالت کاهش یابد. (S.2) تأثیر این تغییر را در احتمال خطای متناظر با $SNR = 5 \text{ dB}$ مشاهده و ثبت کنید. (R.34)

آزمایش ۷

در این آزمایش مدولاسیون های فاز را مورد بررسی قرار می دهیم.

آزمایش ۷-۱: آزمایش ۵-۱ را عیناً و به طور کامل در مورد BPSK انجام داده و نتایج را ثبت و با قسمت های قبلی (OOK و MASK) مقایسه کنید. (R.35)

آزمایش ۷-۲: برای بررسی و ارزیابی روش مدولاسیون QPSK، آزمایش ۵-۱ را با به کارگیری مناسب تابع My_modem تکرار کنید. نتایج را با آزمایش های قبلی به ویژه مدولاسیون (BPSK) مقایسه نمائید. (R.36) (تذکر: طول دنباله بیت ورودی را کمی افزایش دهید).

آزمایش ۸

در این آزمایش به بررسی روش مدولاسیون دامنه تریبی (QAM) به عنوان کلی ترین فرم از مدولاسیون های دیجیتال باند میانی (در بین مدولاسیون های نوع PAM) می پردازیم. در این قسمت تنها به بررسی QAM با تشکل سیگنال توری (Grid) خواهیم پرداخت.

آزمایش ۸-۱: در این قسمت، هدف تکرار روندی مشابه آزمایش‌های قبل در مورد QAM در ۱۶ و ۶۴ سطح و در مقادیر مختلف SNR است. با استفاده از تابع My_modem این کار را انجام دهید. نتایج به دست آمده را با بندهای قبلی، مقایسه و توجیه کنید.

(R.38) (تذکر: طول دنباله بیت ورودی در این قسمت را بیشتر انتخاب کنید).

آزمایش ۹

آزمایش ۹-۱: دو شکل سیگنال مناسب ۴ و ۸ تایی دلخواه (متفاوت از ساختارهای بررسی شده) پیشنهاد کنید. (R.44) پس از موافقت مربی آزمایشگاه، تابعی بنویسید که دنباله بیت ورودی، فرکانس حامل، زمان هر سمبل، زمان نمونه برداری، تعداد نقاط، شکل سیگنال و نسبت سیگنال به نویز کانال AWGN را دریافت کرده و با استفاده از آن‌ها دنباله ورودی را به روش مورد نظر مدوله کرده و پس از عبور از کانال AWGN بازسازی نماید. لازم است که تابع نوشته شده، علاوه بر شکل زمانی سیگنال باند میانی قبل و بعد از کانال و شکل سیگنال در مدولاتور و دمدولاتور، دنباله بازسازی شده، طول آن و نسبت خطای بیت رخ داده را برگرداند. در نوشتن این تابع از ساختار مازولاری نظیر توابع مورد استفاده قبلی استفاده کنید. به ویژه با استفاده از دو تابع $v = \text{base2pass}(B, A, F_c)$ و $[B, A] = \text{base2pass}(v, F_c)$ تنها نوشتن دو تابع جهت مدولاسیون و دمدولاسیون در باند پایه (مطابق شکل سیگنال پیشنهادی) کافی خواهد بود. (R.45) (S.4)

بخش پنجم: ارزیابی عملکرد انواع مدولاسیون‌های دیجیتال باند میانی روی کانال AWGN-۱

آزمایش ۱۰

تابع زیر را در نظر بگیرید.

```
function My_curve(No_of_bits, No_of_runs, Fc, Tsym, Ts, Mod_Type, M)
SNRmax=10;      SNRmin=-20;      Res=1;      m=0;
for S=SNRmin:Res:SNRmax,
    for n=1:No_of_runs,
        bitstream=randint(1, No_of_bits);
        [number, RATIO(n)] = My_modem(bit_stream, Fc, Tsym, Ts, Mod_Type, M, S);
    end
    m=m+1;      BER(m)=mean(RATIO);      SNR(m)=S;
end
```

حال به بررسی عملکرد و کارآیی مدولاسیون‌های مختلف بر روی کانال AWGN در قالب رسم و ارزیابی منحنی معروف خطای بیت (BER) بر حسب نسبت سیگنال به نویز (SNR) می‌پردازیم.

آزمایش ۱۰-۱: به کمک تابع My_curve منحنی خطای بیت بر حسب نسبت سیگنال به نویز مدولاسیون OOK را برای حداقل ۵ بار اجرا از دنباله به طول حداقل ۲۵۰۰ بیت با $F_c = 1000$ ، $T_{sym} = 0.01$ و $T_s = 0.0001$ رسم کنید. به گستره تغییرات SNR و BER توجه و محدوده SNR را در حد مناسب تنظیم کنید. منحنی حاصله و زمان لازم برای اجرای برنامه را ثبت نمایید.

آزمایش ۱۰-۲: بند قبل را برای مدولاسیون MASK تکرار کنید. M را تغییر دهید. چنانچه منحنی‌های به دست آمده مناسب نیستند، حدود تغییرات SNR را برای هر مقدار M، در متن تابع تغییر داده و به طور مناسب تنظیم نمایید. (R.47)

آزمایش ۱۰-۳: بند قبل را برای مدولاسیون MPSK تکرار کنید. M را تغییر دهید. چنانچه منحنی‌های به دست آمده مناسب نیستند، حدود تغییرات SNR را برای هر مقدار M، در متن تابع تغییر داده و به طور مناسب تنظیم نمایید. (R.48)

آزمایش ۱۰-۴: بند قبل را برای مدولاسیون QAM تکرار کنید. M را تغییر دهید. چنانچه منحنی‌های به دست آمده مناسب نیستند، حدود تغییرات SNR را برای هر مقدار M، در متن تابع تغییر داده و به طور مناسب تنظیم نمایید. (R.49)

بخش ششم: ارزیابی عملکرد انواع مدولاسیون‌های دیجیتال باند میانی روی کانال AWGN-۲

آزمایش ۱۱

آزمایش ۱۱-۱: تابع My_Curve را طوری اصلاح کنید که شبیه‌سازی منحنی BER-SNR را به روش Monte-Carlo^۱ انجام دهد. (تعداد بیت خطای لازم در هر SNR حداقل برابر ۱۰۰ بیت باشد). (R.55) (S.7) به کمک این توابع جدید آزمایش قبل را تکرار کنید. در هر مرحله زمان لازم برای رسم منحنی را ثبت کرده و با منحنی مشابه در آزمایش قبل مقایسه کنید. (R.56)

آزمایش ۱۲

آزمایش ۱۲-۱: صفحه مربوط به توصیف کانال AWGN و نحوه مرتبط کردن پارامتر SNR به مقدار انرژی ارسالی برای هر بیت یا سمبل در یک مدولاسیون دیجیتال را یافته و به دقت مطالعه کنید. برداشت خود از این صفحه را شرح دهید. به کمک اطلاعات دریافتی از این صفحه تابع My_mdem و به تبع آن تابع My_curve را به نحوی تغییر دهید که شبیه‌سازی را به طور کامل در باند پایه انجام دهد. به کمک این تابع جدید آزمایش ۱۰ را تکرار کنید. در هر مرحله زمان لازم برای رسم منحنی را ثبت کرده و با منحنی مشابه در آزمایش قبل مقایسه کنید.

^۱ روش Monte-Carlo روشی برای حل مسایل با تولید اعداد تصادفی مناسب است، به صورتی که بخشی از این اعداد منجر به بروز ویژگی یا نتیجه خاصی شوند. در این جا، منظور آن است که در هر روش مدولاسیون، ارسال دنباله بیت تا رخ دادن تعداد خاصی خطای بیت ادامه یابد. بدیهی است در این حالت انجام شبیه‌سازی در SNR های بالاتر زمان بیشتری به طول خواهد انجامید.