

# فصل سوم: طراحی سیگنال

تئوری و الگوریتم‌های شبکه‌های بیسیم

سید وحید ازهری

دانشگاه علم و صنعت ایران

# سرخط مباحث

- مدولاسیون
- بیت، کد، سمبل و سیگنال
- نمودار منظومه سیگنال
- کیفیت سیگنال و احتمال خطای بیت (BER)
- کران ظرفیت شانون
- محدودیت پهنای باند و توان در لینکهای بیسیم ← مباحثه ۱
- کدهای تصحیح خطا Forward Error Correction Coding (FEC)

# مدولاسیون

- مدولاسیون آنالوگ: سیگنال داده آنالوگ  $m(t)$  بر موج حامل آنالوگ سوار میشود
- مدولاسیون دیجیتال: سیگنال دیجیتال  $m(t)$  بر موج حامل آنالوگ سوار میشود
- در هر دو نوع مدولاسیون سیگنال مدوله کننده یا حامل، آنالوگ است
- تنها تفاوت دو روش مدولاسیون در نوع داده ای است که ارسال می کنند
- به سیگنال داده، سیگنال باند پایه یا Baseband نیز گفته میشود

# روشهای مدولاسیون آنالوگ

- سیگنال داده آنالوگ  $m(t)$

– در سیستم رادیو،  $m(t)$  ولتاژ تولید شده توسط میکروفن

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

- سیگنال حامل یک سینوسی ساده

- مدولاسیون دامنه (AM): دامنه سیگنال مدوله شده که روی آنتن ارسال میشود تابعی از سیگنال داده است

$$s(t) = (1 + k_a m(t)) \cos 2\pi f_c t$$

- مدولاسیون فاز (PM): فاز سیگنال مدوله شده که روی آنتن ارسال میشود تابعی از سیگنال داده است

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_p m(t))$$

- مدولاسیون فرکانس (FM): فرکانس (مشتق فاز) سیگنال مدوله شده که روی آنتن ارسال میشود تابعی از سیگنال داده است

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$$

# روشهای مدولاسیون دیجیتال

- سیگنال حامل آنالوگ توسط جریانی از بیت‌های دیجیتال مدوله می‌شود

- تغییرات در سیگنال حامل، توسط تعداد محدودی از سمبل‌های (الفبای مدولاسیون)

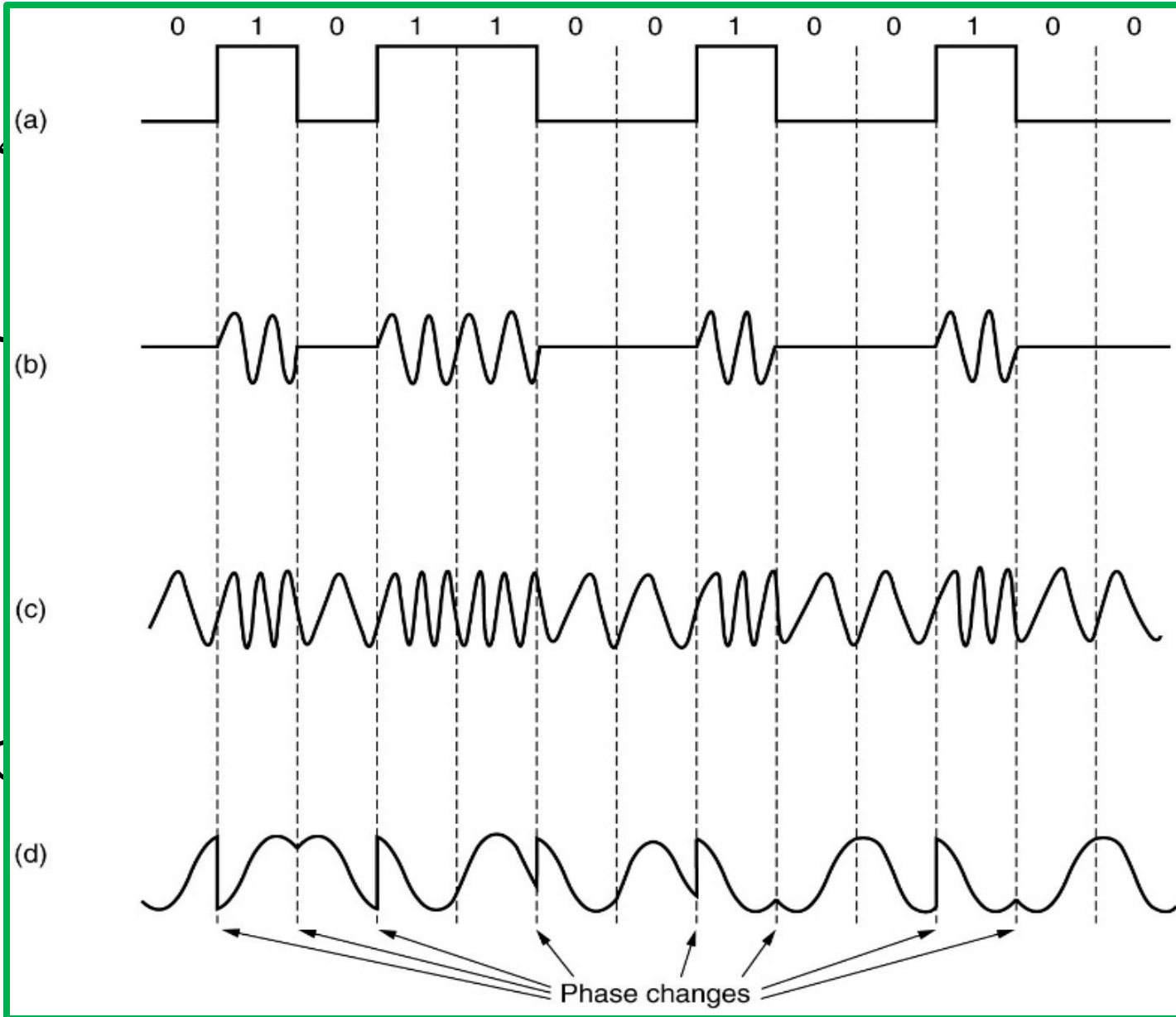
- **PSK**: هر سمبل توسط یک فاز معین ارسال میشود

- **FSK**: هر سمبل توسط یک فرکانس معین ارسال میشود

- **ASK**: هر سمبل توسط یک دامنه معین ارسال میشود

- **QAM**: ترکیب دو روش ASK و PSK است. هر سمبل توسط یک زوج دامنه و فاز معین ارسال میشود

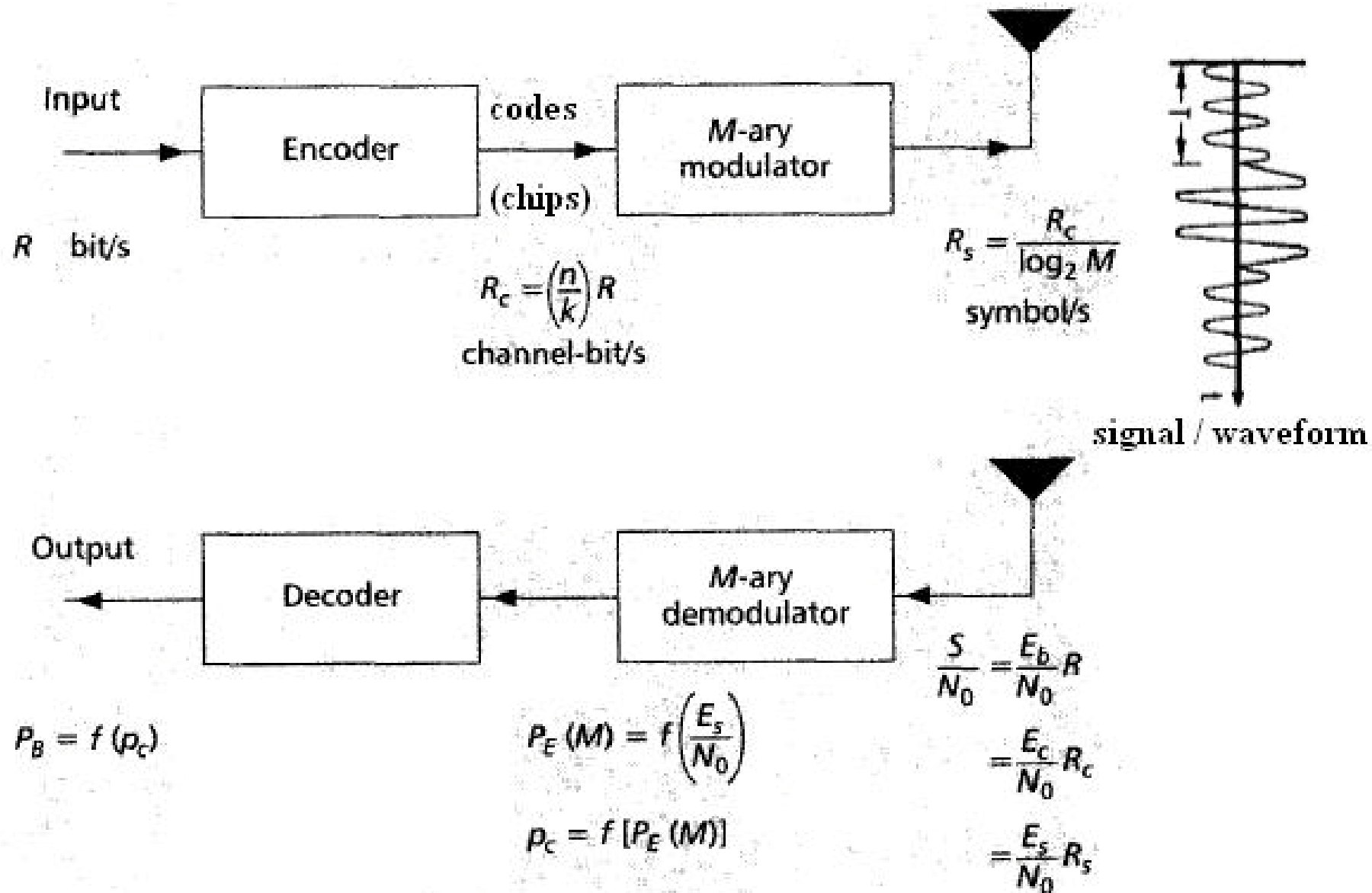
# روشهای مدولاسیون دیجیتال



- سیگنال می شود
- تغییرات (الفبای
- PSK
- FSK
- ASK
- QAM
- دامنه و

یک زوج

# بیت، کد، سمبل و سیگنال



# ... بیت، کد، سمبل و سیگنال

- دنباله بیت دیجیتالی و شکل موج تولید شده توسط BPSK
- فاز ۰ درجه بعنوان بیت یک و فاز ۱۸۰ درجه برای بیت صفر

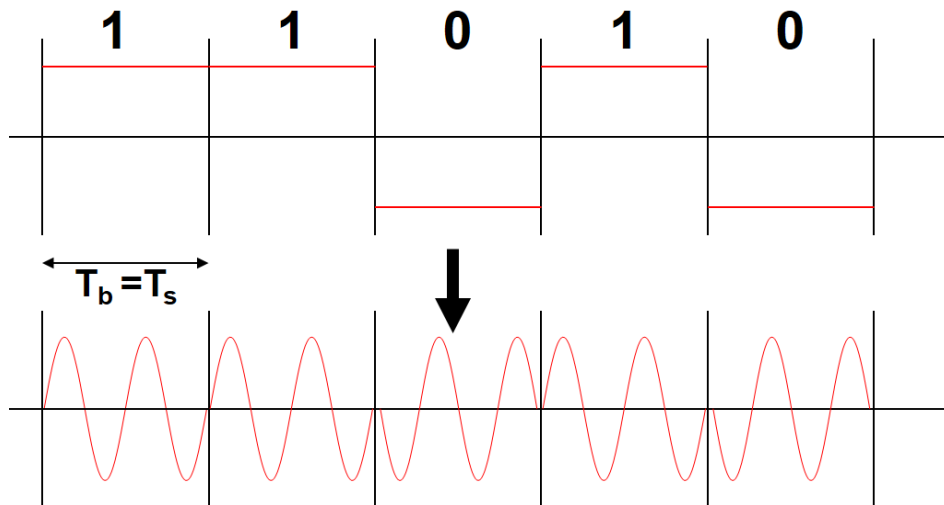
– هر سمبل نماینده یک بیت

– دو سمبل احتیاج داریم

– اگر شیوه مدولاسیون از  $M$  سمبل استفاده کند، آنگاه هر سمبل نماینده  $\log_2 M$  بیت

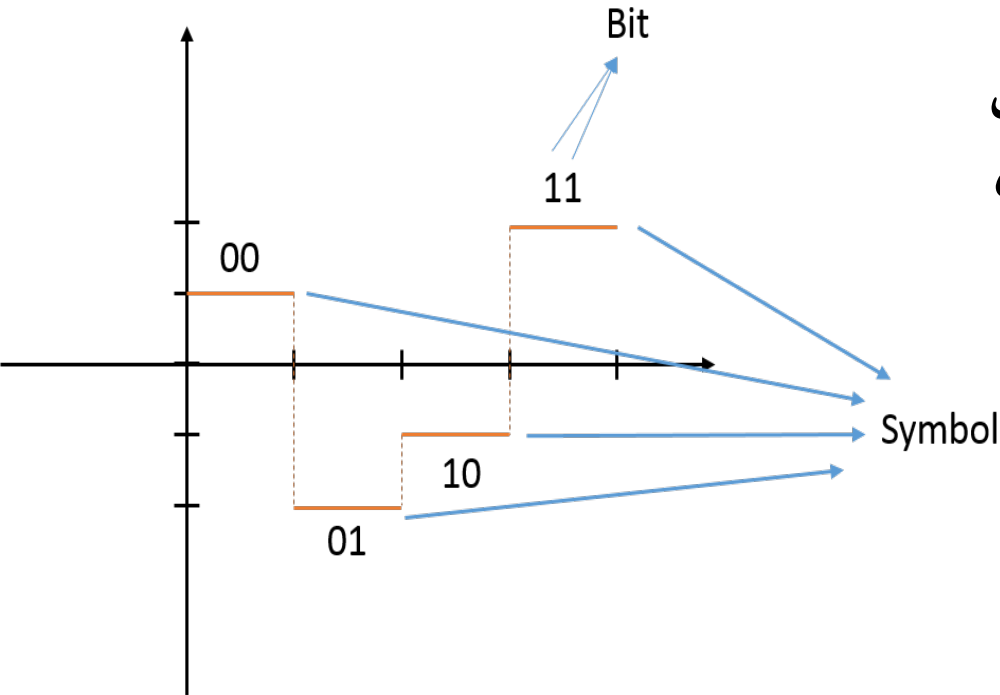
– اگر طول سمبل  $T_s$  ثانیه باشد  
طول بیت برابر

$$T_b = \frac{T_s}{\log_2 M}$$





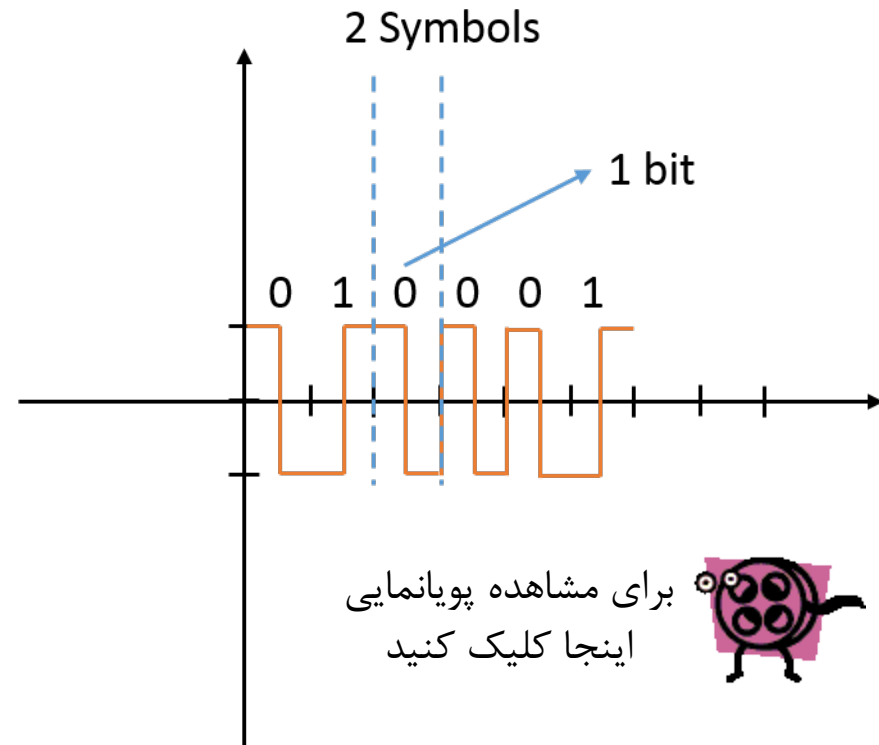
# ... بیت، کد، سمبل و سیگنال



1 Symbol = 2 bit

در این مثال، هر سمبل توسط مقدار معینی  
از دامنه ارسال شده: **ASK**

اگر یکی از سمبلها هم پس از عبور از کانال  
خراب شود، سمبل دیگر میتواند به تنهایی  
برای تشخیص بیت ارسالی بکار رود!!!



2 Symbol = 1bit

برای مشاهده پویانمایی  
اینجا کلیک کنید



# پهنای باند سیگنال: رابطه نایکوئیست

- حداقل پهنای باند لازم برای ارسال سیگنالی با نرخ سمبل  $R_s$  برابر است با  $B=R_s$  هرتز

– در عمل مقدار پهنای باند مورد نیاز بیش از این است  
– بستگی به نحوه فیلتر سیگنال توسط فرستنده دارد

- **بهره پهنای باند:** برابر مقدار نرخ بیتی است بر حسب بیت بر ثانیه که به ازای هر هرتز از پهنای باند حاصل میشود

$$\eta = \frac{R_b}{B} \text{ (bps/Hz)}$$

– شیوه مدولاسیون  
– فیلتر کردن سیگنال در سمت فرستنده

**در شرایط ایده آل قضیه نایکوئیست (فیلتر ایده آل نایکوئیست)، بهره پهنای باند برابر تعداد بیت هر سمبل یا همان مرتبه مدولاسیون خواهد بود**

# فرکانس سیگنال حامل

- برای مدوله نمودن یک سیگنال با نرخ سمبل  $R_s$  به یک سینوسی حامل با فرکانسی حداقل دو برابر یعنی  $f_c = 2R_s$  احتیاج است
- اگر نرخ سمبل مثلا  $1\text{Mpsps}$  باشد به سیگنال حاملی با فرکانس حداقل  $1\text{MHz}$
- شرایط فیلتر ایده‌آل نایکوسیت با پهنای باند  $B = R_s = 1\text{MHz}$
- در عمل فرکانس مرکزی بسیار بزرگتر از پهنای باند سیگنال  $\leftarrow$  دچار اعوجاج نشویم

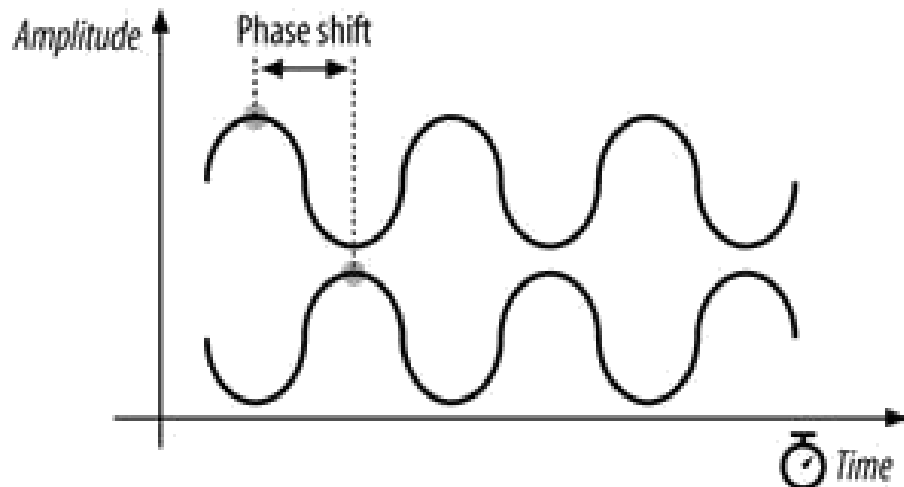
# مدولاسیون های فاز (PSK) Phase Shift Keying

## • Coherent

- داده ارسالی مستقیماً خود فاز را تعیین میکند
- گیرنده باید کاملاً با فرستنده سنکرون باشد

## • Differential

- داده بصورت تغییرات فاز نمایش داده میشود
- بیت ۱ با تغییر فازی برابر  $180^\circ$  درجه
- بیت صفر با تغییر فاز صفر
- گیرنده براحتی میتواند تغییر فاز را تشخیص دهد
- نیازی به همفاز کردن آن با فرستنده نیست



# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

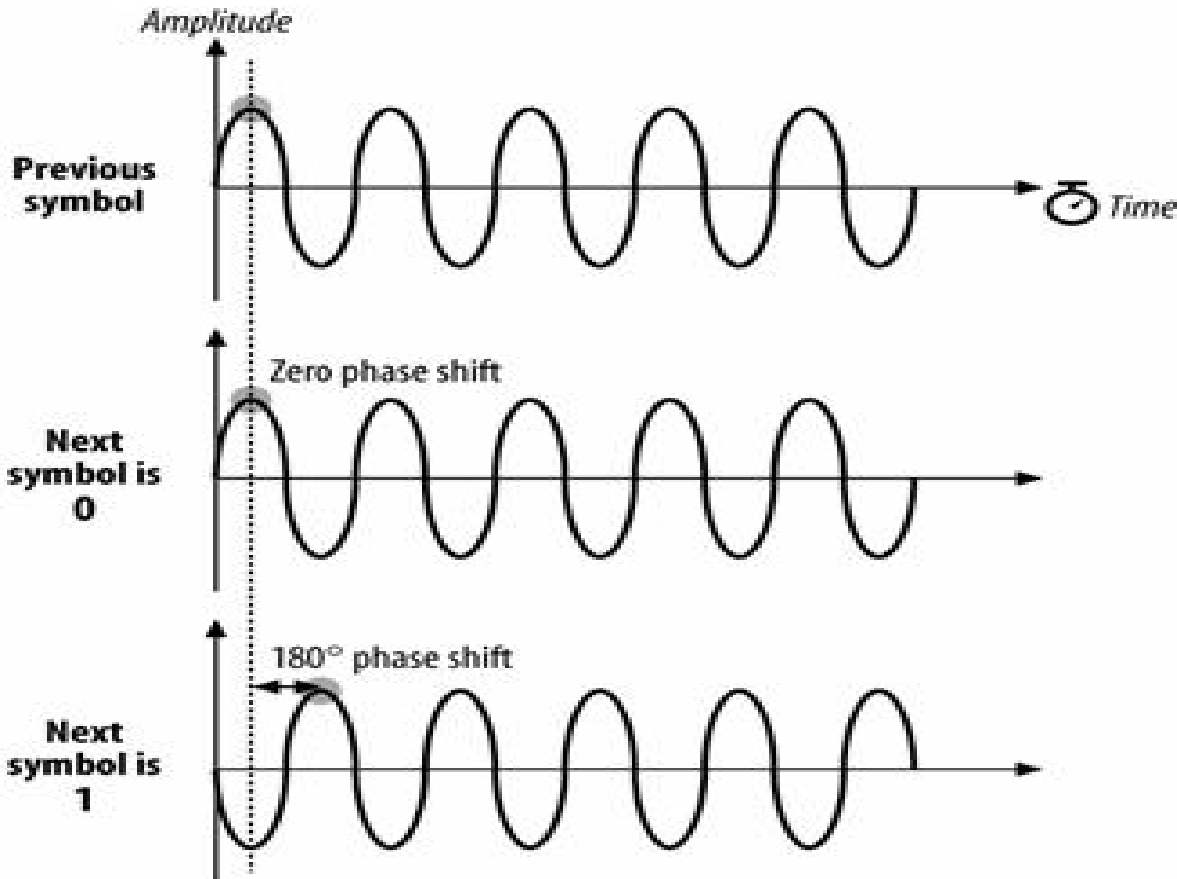
دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)



سمبل اول:

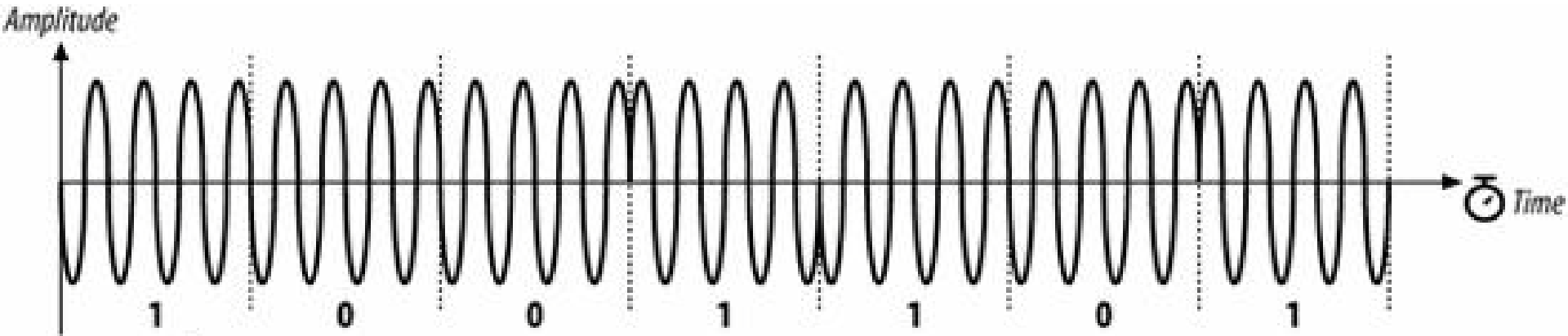
سمبل دوم چون صفر است، سیگنال  
ارسالی نسبت به سیگنال قبلی همفاز  
است

سمبل دوم چون یک است، سیگنال  
ارسالی نسبت به سیگنال قبلی ۱۸۰  
درجه از نظر فاز اختلاف دارد

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)



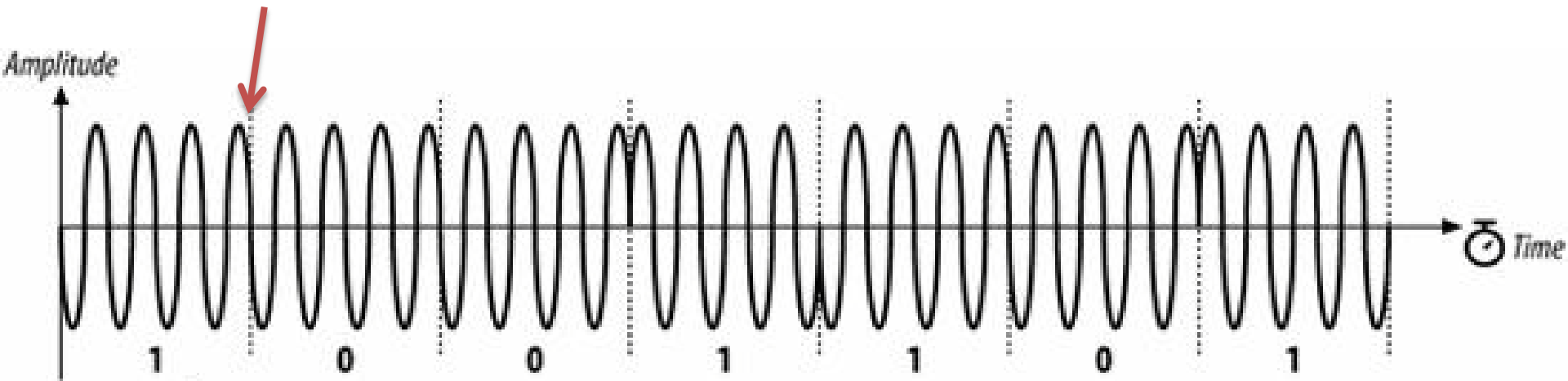
نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)

تغییر فاز صفر



نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

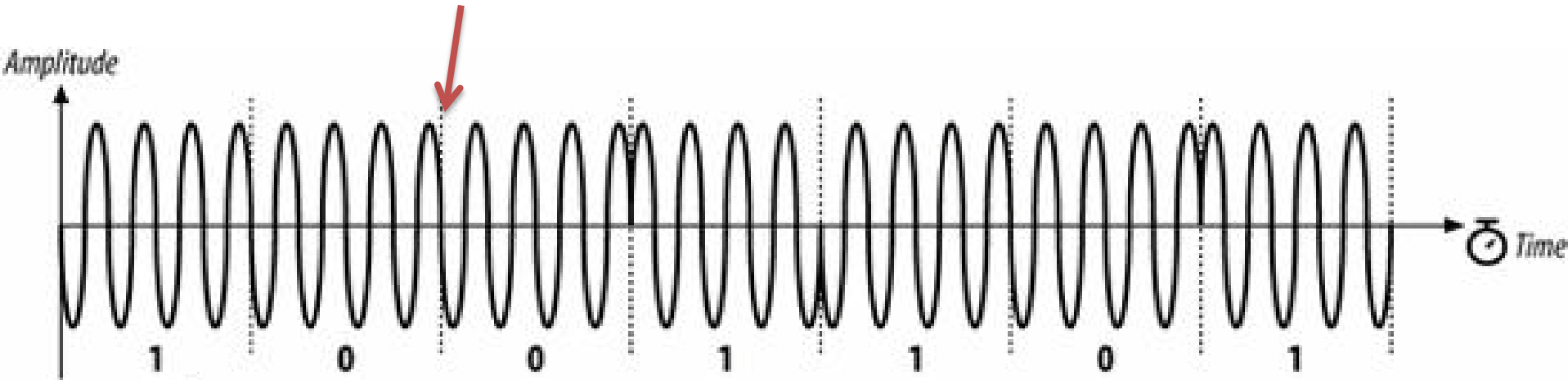


# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)

تغییر فاز صفر



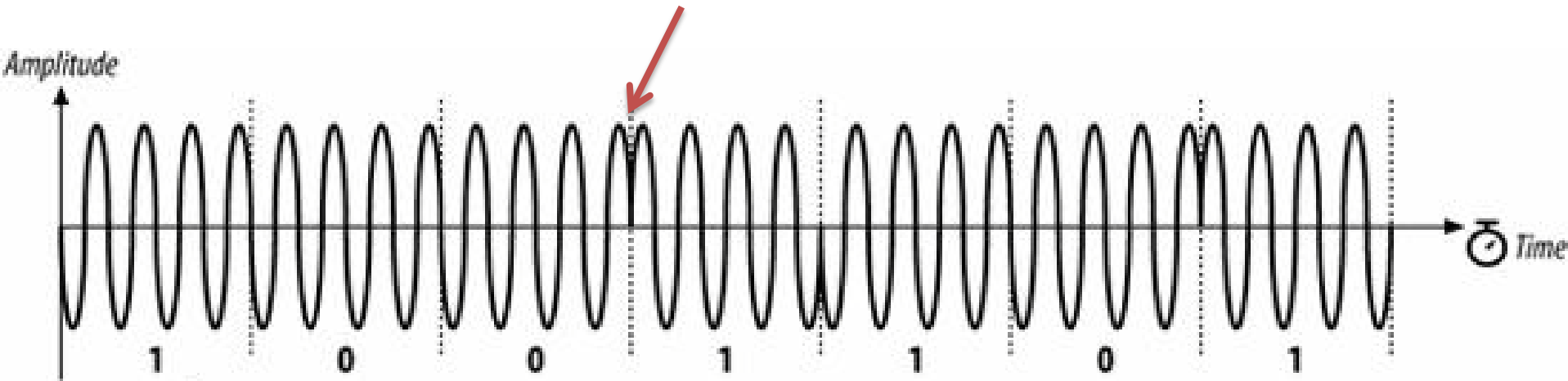
نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)

تغییر فاز  $180^\circ$  درجه



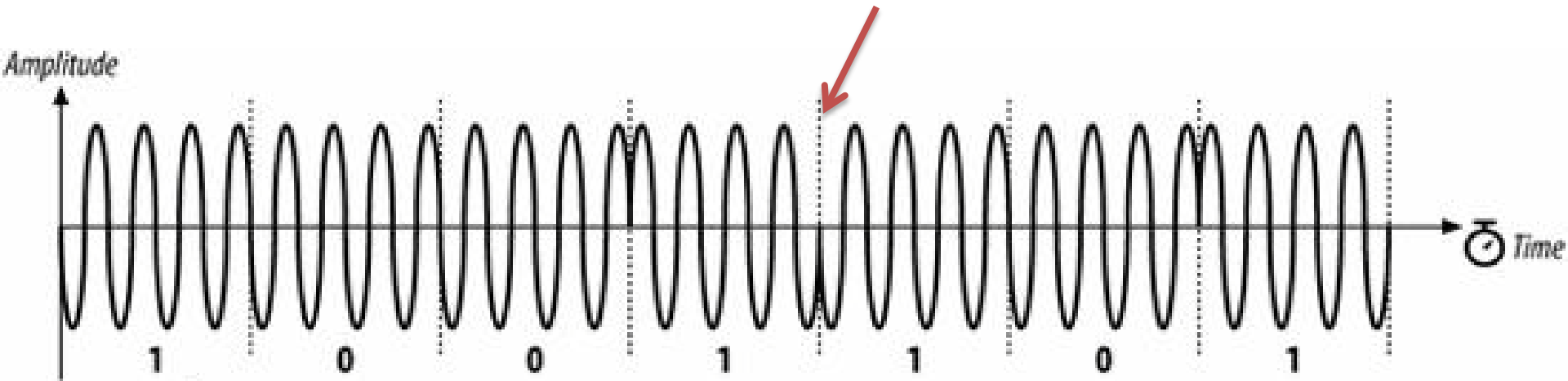
نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)

تغییر فاز  $180^\circ$  درجه

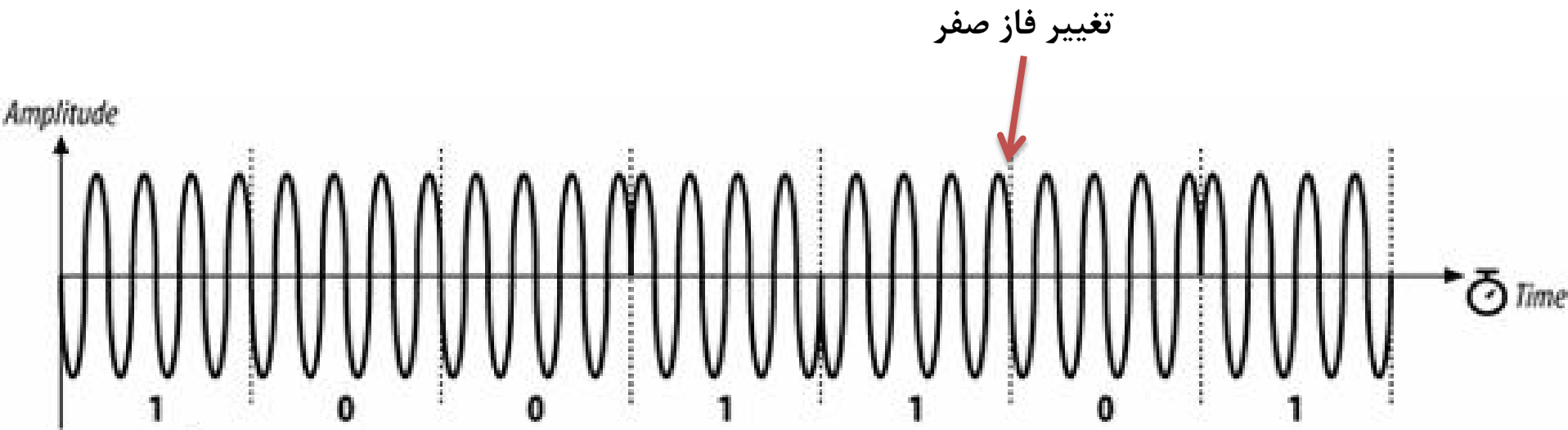


نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)

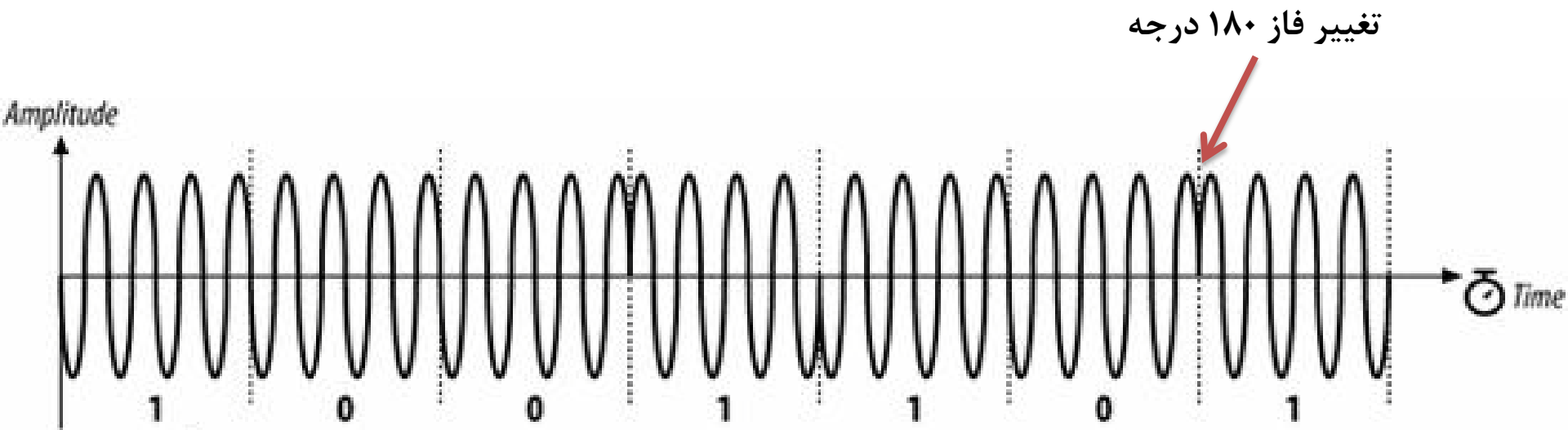


نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

# مدولاسیون دو سطحی تفاضلی فاز DBPSK

دو سمبل داریم که  
هر سمبل با یک تغییر فاز بیان میشود

Symbol	Phase shift
0	0
1	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)



نمایش کد ASCII کرکتر M و مجموعه سیگنالهای ارسالی متناظر با آن هنگامیکه مدولاسیون DBPSK بکار رود

# مدولاسیون چهار سطحی تفاضلی فاز DQPSK

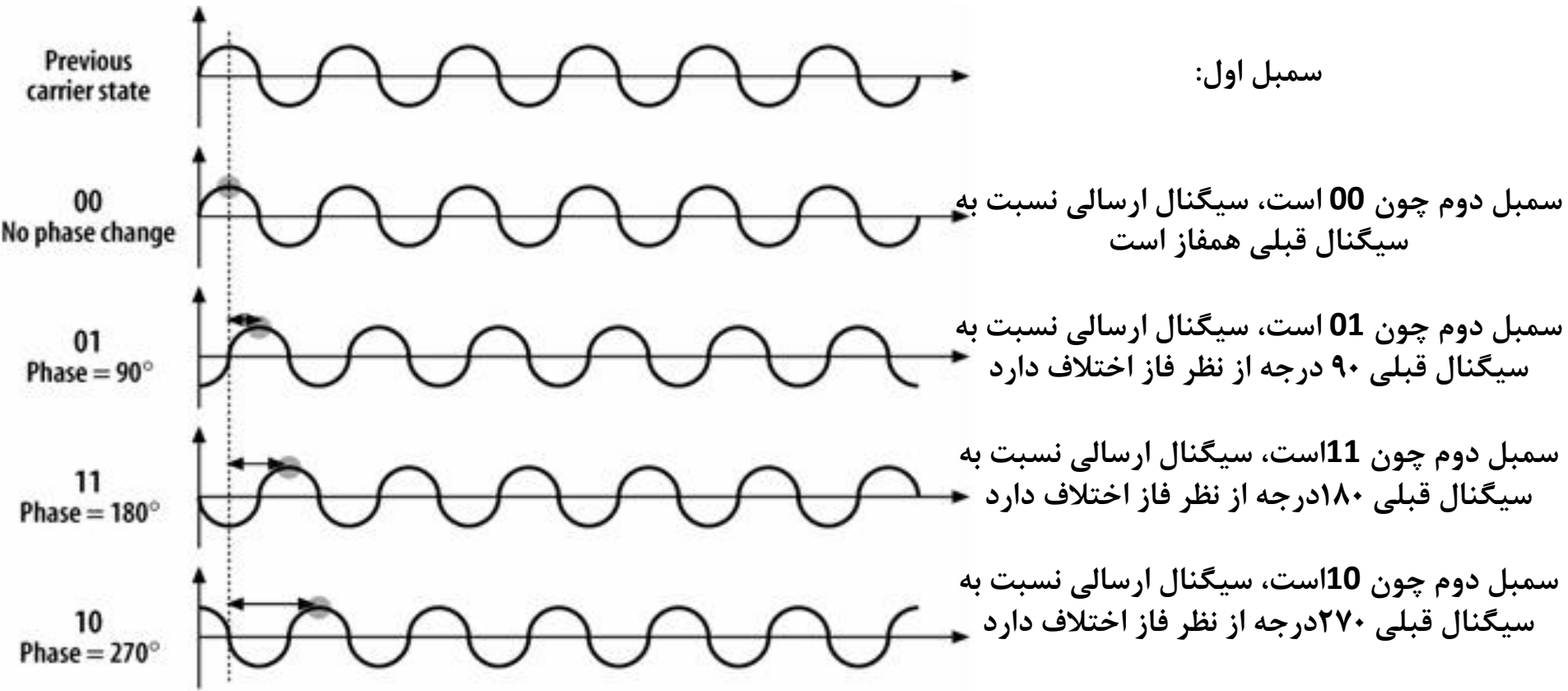
Symbol	Phase shift
00	0
01	$90^\circ (\pi/2 \text{ radians})$
11	$180^\circ (\pi \text{ radians})$
10	$270^\circ (3\pi/2 \text{ or } -\pi/2 \text{ radians})$

شامل چهار سمبل است که توسط انتقال فازهایی مطابق جدول بیان می شوند هر سمبل نماینده یک ترکیب دو بیتی است

# مدولاسیون چهار سطحی تفاضلی فاز DQPSK

Symbol	Phase shift
00	0
01	$90^\circ$ ( $\pi/2$ radians)
11	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)
10	$270^\circ$ ( $3\pi/2$ or $-\pi/2$ radians)

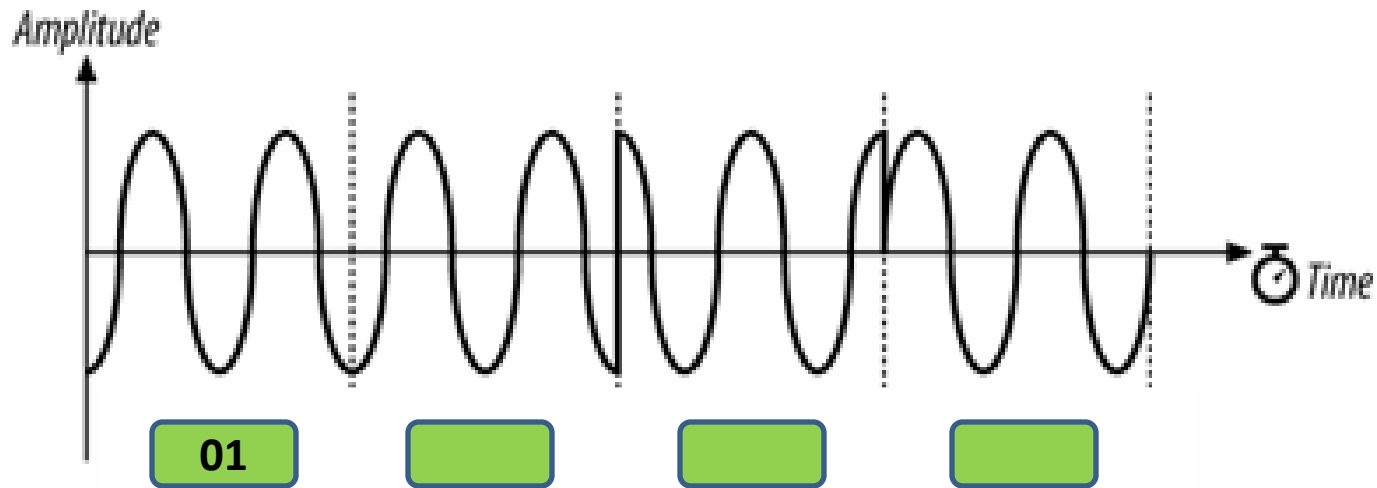
شامل چهار سمبل است که توسط انتقال فازهایی مطابق جدول بیان می‌شوند  
هر سمبل نماینده یک ترکیب دو بیتی است



# خود آزمایی

Symbol	Phase shift
00	0
01	$90^\circ (\pi/2 \text{ radians})$
11	$180^\circ (\pi \text{ radians})$
10	$270^\circ (3\pi/2 \text{ or } -\pi/2 \text{ radians})$

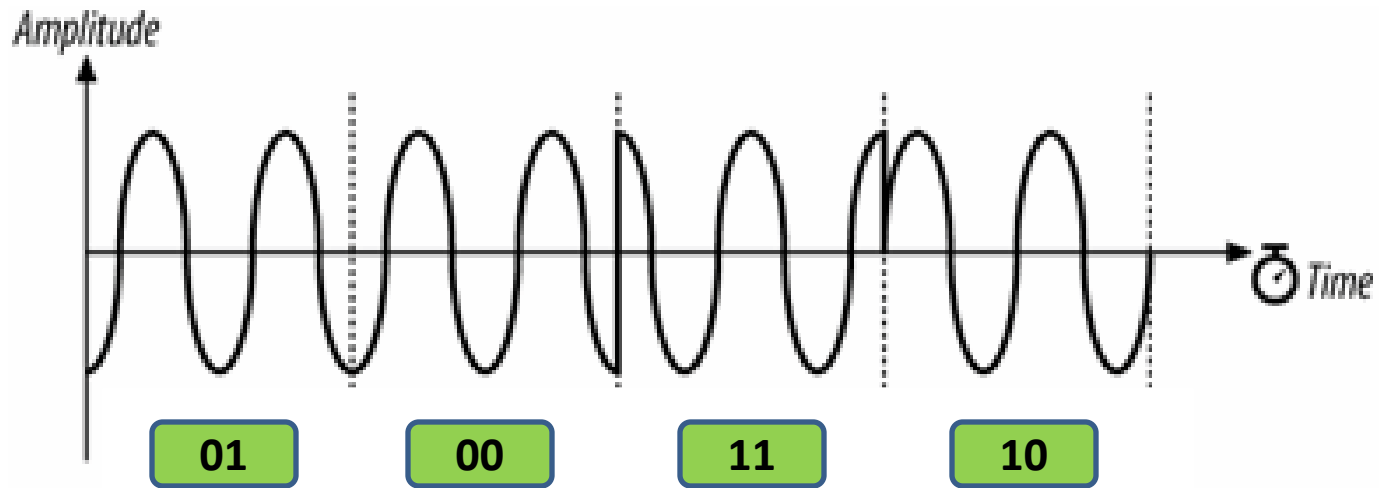
اگر سمبل اول معادل 01 باشد، با توجه به جدول داده شده رشته بیت معادل سیگنال ارسال شده را در مربع‌های سبز رنگ وارد کنید. مرز هر سمبل با خط چین مشخص شده است.





# پاسخ

Symbol	Phase shift
00	0
01	$90^\circ$ ( $\pi/2$ radians)
11	$180^\circ$ ( $\pi$ radians)
10	$270^\circ$ ( $3\pi/2$ or $-\pi/2$ radians)



برای مشاهده پویانمایی  
اینجا کلیک کنید



# خود آزمایی

در کدامیک از روشهای مدولاسیون دیجیتال انرژی سمبلها ثابت است؟

الف) ASK      ب) PSK      ج) FSK      د) ب و ج

**پاسخ)** گزینه (د) صحیح است چون در هردوی این روشها دامنه سیگنال  
و در نتیجه توان و انرژی آن ثابت می ماند.

# خود آزمایی

یک شیوه مدولاسیون از الفبایی دارای ۱۶ سمبل استفاده میکند. اگر نرخ ارسال فرستنده برابر 10Mbps باشد و هر ۱۰ بیت داده با ۱۲ بیت کدگذاری شود، در این صورت نرخ بیت (داده) و نرخ سمبل را بدست آورید.

نرخ بیت داده بر حسب مگابیت بر ثانیه: \_\_\_\_\_

نرخ سمبل بر حسب مگاسمبل بر ثانیه: \_\_\_\_\_

**پاسخ)** آنچه نهایتاً روی کانال فرستاده می‌شود، کد-بیت است که در غالب سمبل قرار گرفته. بنابراین در هر ثانیه ۱۰ میلیون کد-بیت ارسال می‌شود. از طرفی از هر ۱۲ کد-بیت ارسال شده فقط ۱۰ تا بیت داده است پس نرخ بیت برابر است با  $R_b = 10\text{Mbps} \times 10/12 = 8.33\text{Mbps}$

چون از ۱۶ سمبل استفاده می‌شود، پس هر سمبل نماینده ۴ کد-بیت است. پس نرخ سمبل برابر است با  $R_s = 10\text{Mbps} \times 1/4 = 2.5\text{Msps}$

# خود آزمایی

اگر نرخ ارسال یک فرستنده بیسیم برابر 1Mbps باشد و هر ۲ بیت با یک سمبل نشان داده شود، در مورد فرکانس حامل ( $f_c$ ) و پهنای باند (B) فرستنده چه میتوان گفت؟ فرض کنید از فیلترینگ ایدهآل نایکوئیست استفاده شود.

الف)  $f_c \geq 1\text{MHz}$  ,  $B = 1\text{MHz}$

ب)  $f_c \geq 500\text{KHz}$  ,  $B = 1\text{MHz}$

ج)  $f_c \geq 1\text{MHz}$  ,  $B = 500\text{KHz}$

د)  $f_c \geq 500\text{KHz}$  ,  $B = 500\text{KHz}$

**پاسخ)** گزینه (ج) صحیح است. هر ۲ بیت یک سمبل است پس نرخ سمبل نیمی از نرخ بیت یعنی برابر 500KHz خواهد بود.

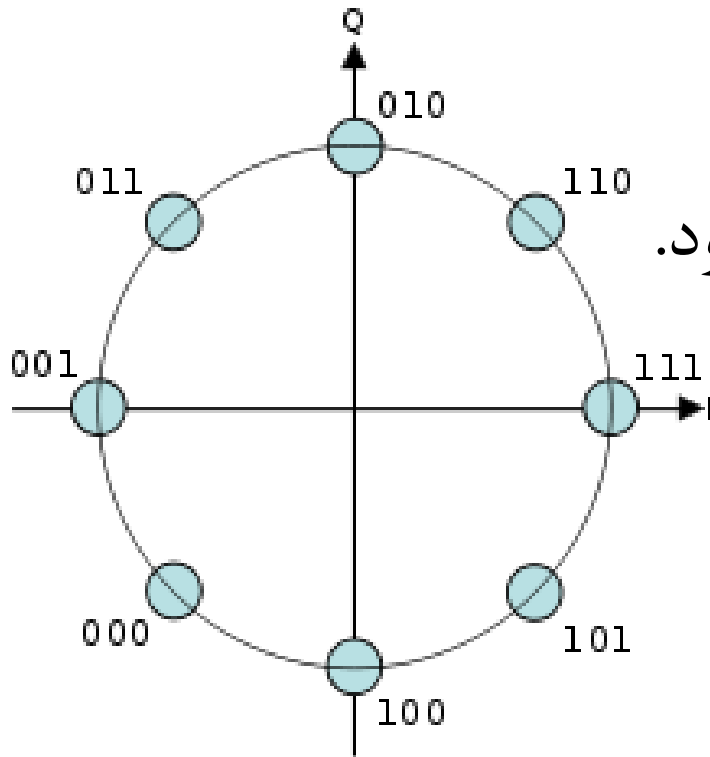
# کاربرد در تکنولوژی

- مدولاسیونهای پایه در IEEE802.11
  - اصطلاحاً بنام تجاری WiFi شناخته میشود
  - برای فراهم آوردن نرخ بیت‌های پایه از روشهای DPSK استفاده میکند
  - پایین ترین نرخ بیت 1Mbps است
- با استفاده از DBPSK و نرخ سمبل 1Msps
  - در صورت مناسب بودن کیفیت لینک، امکان گنجاندن دو بیت در هر سمبل ( $M=4, m=2$ )
- استفاده از DQPSK و ارتقای نرخ بیت به 2Mbps
- در این حالت نرخ سمبل کماکان 1Msps



# نمودار منظومه سیگنال

- می‌توان هر سمبل را در صفحه مختلط با دامنه و فاز آن نمایش داد

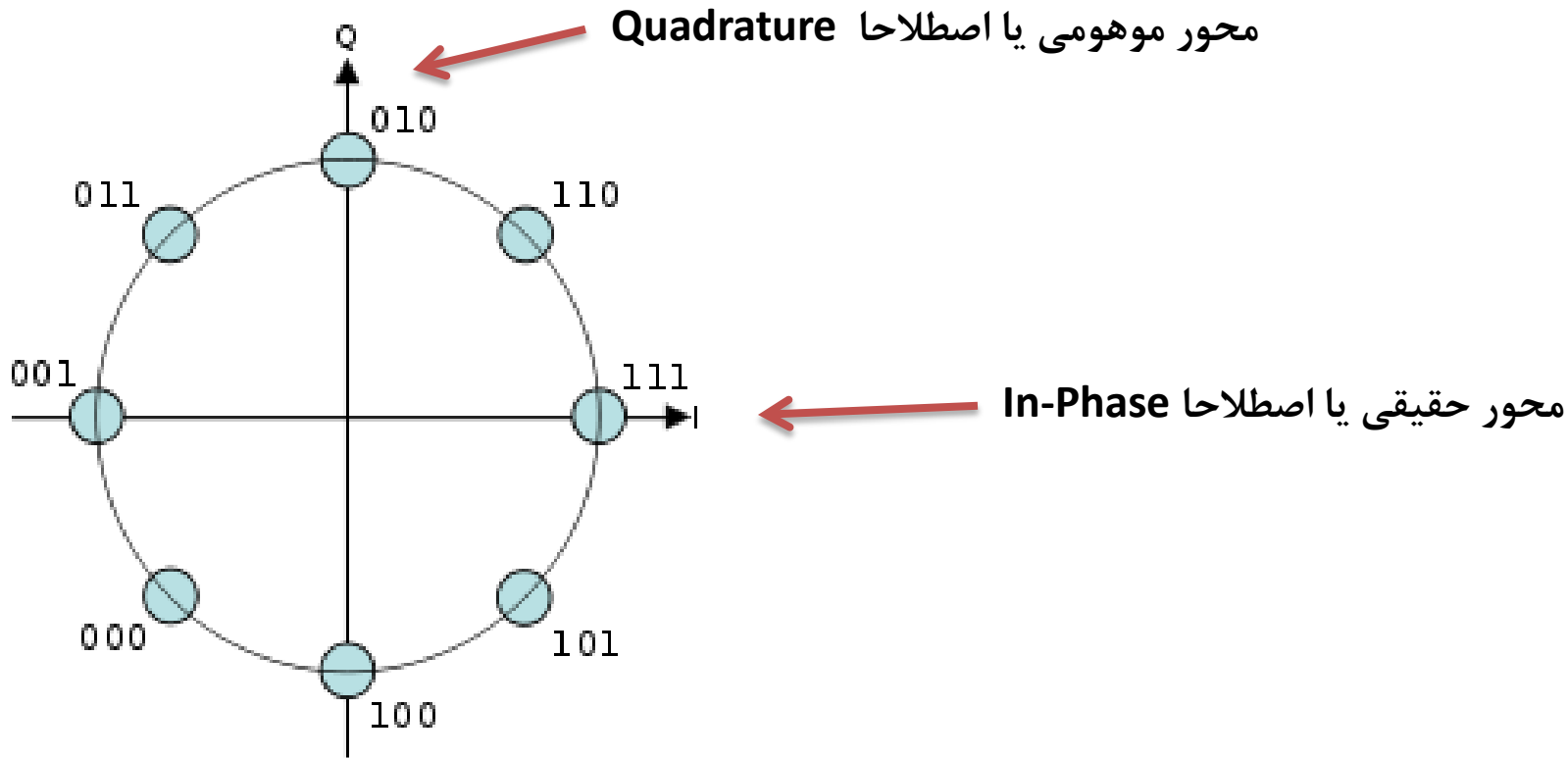


- در 8-PSK هر سمبل یک ترکیب سه بیتی است که با فاز معینی بیان می‌شود.

8-PSK Constellation Diagram

# نمودار منظومه سیگنال

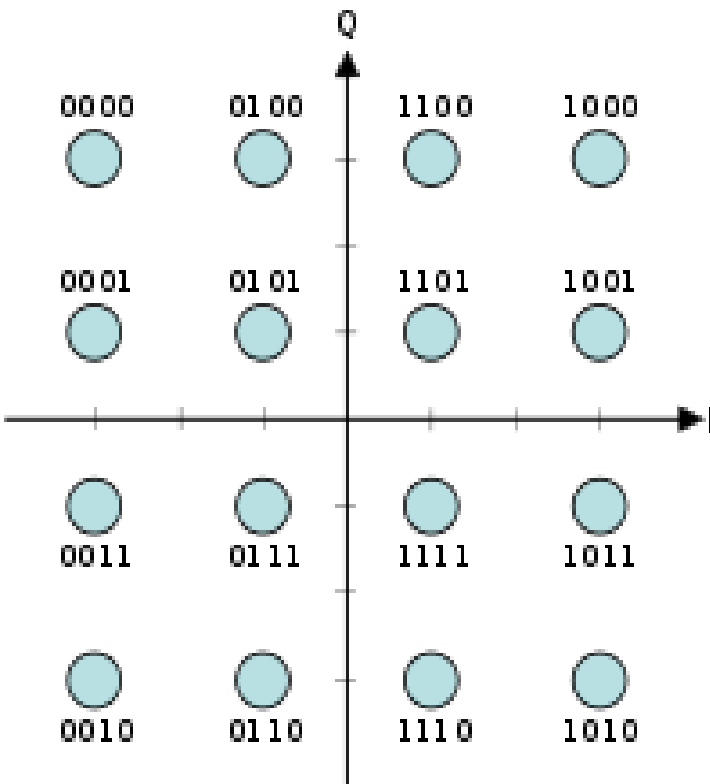
- می‌توان هر سمبل را در صفحه مختلط با دامنه و فاز آن نمایش داد



8-PSK Constellation Diagram

# نمودار منظومه مدولاسیون 16-QAM

- ۱۶ سمبل داریم، هریک نماینده ترکیب ۴ بیتی
- هر کدام توسط یک زوج دامنه و فاز منحصر به فرد نمایش داده میشوند



## • دسته روشهای QAM:

- میتوانند در یک سمبل تعداد بیت زیادی جای دهند
- مناسب برای لینکهای با نرخ بیت بالا

- ارتباطات ویدیویی
- گزینه مورد استفاده در DVB

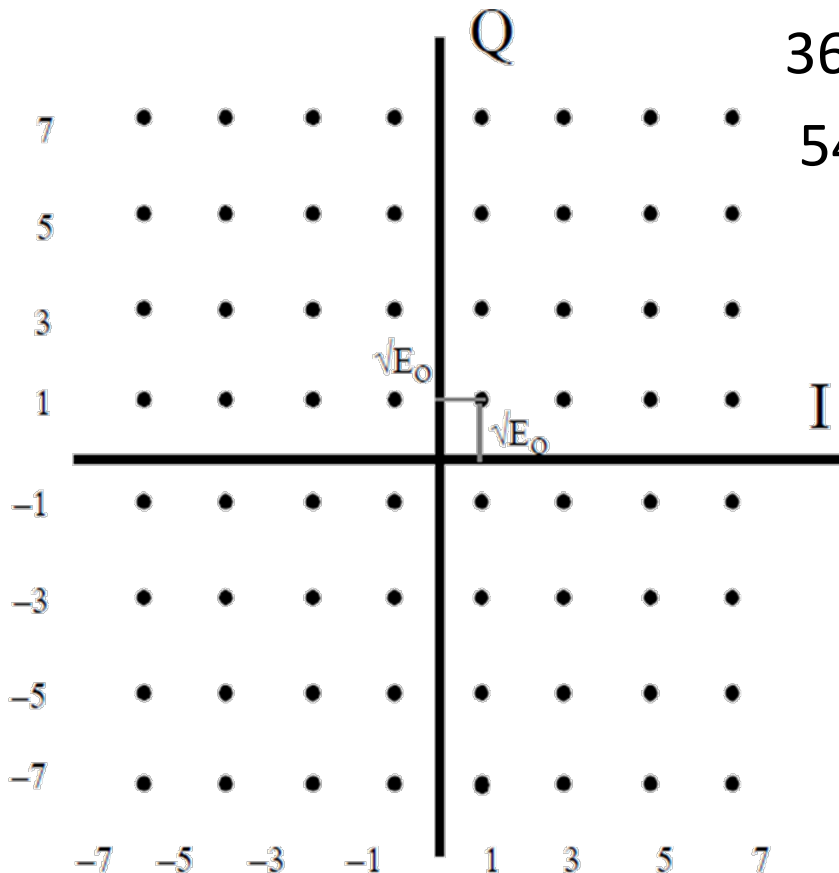
# کاربرد در تکنولوژی

• سرعت‌های بالا در IEEE802.11a/g

– برای فراهم آوردن نرخ بیت‌های سرعت بالا از QAM استفاده میکند

• 16QAM برای فراهم آوردن 36,24 Mbps

• 64QAM برای فراهم آوردن 54,48Mbps



# کیفیت سیگنال و احتمال خطای بیت (Bit Error Rate)

## • اهداف

- مفهوم احتمال خطای بیت و رابطه آن با کیفیت سیگنال
- مفهوم انرژی سیگنال به نویز و رابطه آن با کیفیت سیگنال
- ظرفیت شانون

# کیفیت سیگنال و احتمال خطای بیت

## (Bit Error Rate)

- در مخابرات، کیفیت لینک بیسیم را بر اساس نرخ خطای بیت اندازه گیری می کنند

- خطای بیت

- بیت صفر ارسال شده در طرف گیرنده بعنوان یک تلقی شود

- بیت یک ارسال شده صفر تلقی شود

- نرخ خطای بیت برابر احتمال رخداد خطا در یک بیت است هنگامیکه سیگنال از کانال عبور میکند

- اگر داشته باشیم،  $BER = 10^{-5}$  آنگاه بطور متوسط از هر ۱۰۰۰۰ بیت، ۱ بیت دچار خطا می شود

برای مشاهده پویانمایی  
اینجا کلیک کنید

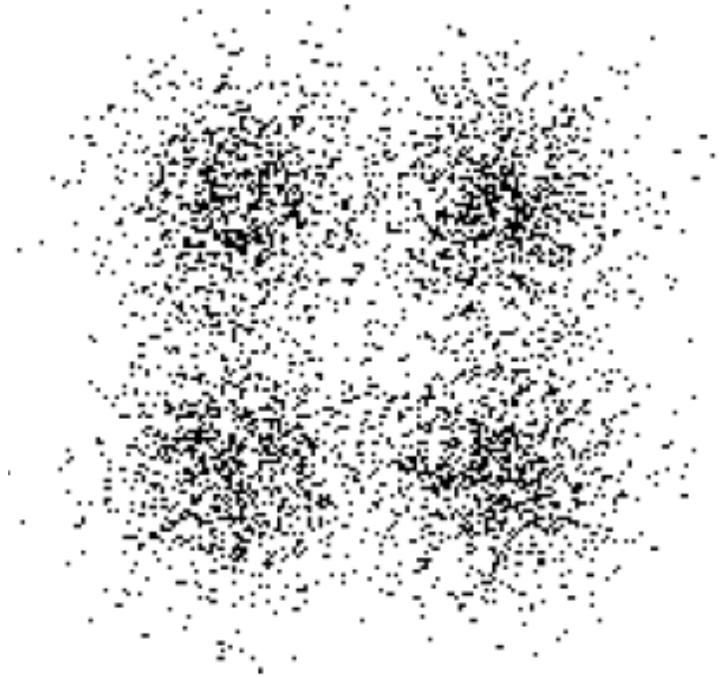


# احتمال خطای بیت

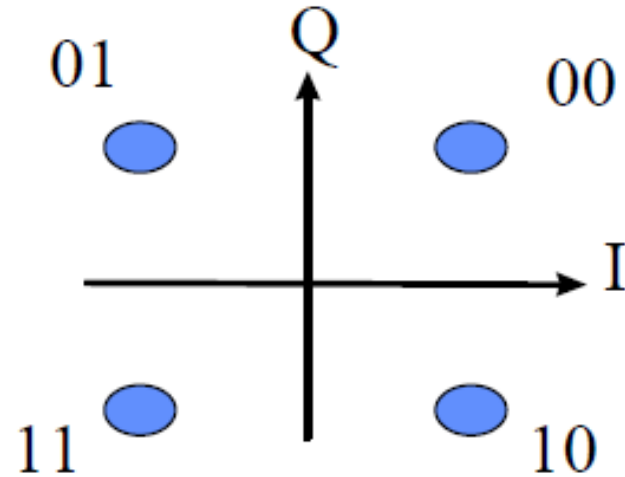
- مقدار توان سیگنال دریافتی در گیرنده:  $S$
- توان نویز سفید گوسی:  $N$
- توان تداخلات (Interference) همفرکانس:  $I$
- مربوط به دیگر لینکهای موجود در مجاورت این لینک و باعث تداخل با سیگنال مورد نظر
- هر قدر توان سیگنال دریافتی بزرگتر از نویز سفید گوسی و سایر سیگنالهای ناخواسته ی همفرکانس باشد، میزان نرخ خطای بیت کاهش می یابد
- مقدار BER تابعی صعودی از مقدار نسبت سیگنال به نویز و تداخلات

$$\text{SINR} = \frac{S}{N + I}$$

# چگونگی ایجاد خطای بیتی



اثر نویز سفید گوسی بر روی سیگنال دریافتی



نمودار منظومه سیگنال QPSK

- سیگنال دریافتی از نظر فاز و اندازه نسبت به آنچه باید دریافت شود دارای تفاوت بعضا معنی داری است.
- این تفاوت میتواند به اندازه ای باشد که سمبل ارسال شده، در محدوده سمبل مجاورش قرار بگیرد.
- در این حالت عملا خطای سمبل و در نتیجه خطای بیت اتفاق می افتد.

برای مشاهده پویانمایی  
اینجا کلیک کنید





# چند تذکر ...

- به کانالی که دارای نویز سفید گوسی است اصطلاحاً کانال Additive White Gaussian Noise یا به اختصار AWGN گفته میشود. کلمه additive از این جهت استفاده میشود که سیگنال دریافتی برابر حاصل جمع سیگنال ارسالی و سیگنال نویز است.

# چند تذکر ...

- به کانالی که دارای نویز سفید گوسی است اصطلاحاً کانال Additive White Gaussian Noise یا به اختصار AWGN گفته میشود. کلمه additive از این جهت استفاده میشود که سیگنال دریافتی برابر حاصل جمع سیگنال ارسالی و سیگنال نویز است.
- اگر در یک کانال بیسیم مقدار توان نویز سفید خیلی بزرگتر از توان تداخلات باشد در این صورت برای سادگی میتوان فرض کرد BER تابعی از نسبت توان سیگنال دریافتی به نویز تنهاست ( $S/N$ ) که به این نسبت اصطلاحاً SNR (Signal to Noise Ratio) گفته میشود و به چنین کانالی نویز-غالب اطلاق میشود.

# چند تذکر ...

- به کانالی که دارای نویز سفید گوسی است اصطلاحاً کانال Additive White Gaussian Noise یا به اختصار AWGN گفته میشود. کلمه additive از این جهت استفاده میشود که سیگنال دریافتی برابر حاصل جمع سیگنال ارسالی و سیگنال نویز است.
- اگر در یک کانال بیسیم مقدار توان نویز سفید خیلی بزرگتر از توان تداخلات باشد در این صورت برای سادگی میتوان فرض کرد BER تابعی از نسبت توان سیگنال دریافتی به نویز تنهاست ( $S/N$ ) که به این نسبت اصطلاحاً SNR (Signal to Noise Ratio) گفته میشود و به چنین کانالی نویز-غالب اطلاق میشود.
- اگر در یک کانال بیسیم مقدار توان تداخلات خیلی بزرگتر از توان نویز سفید باشد در این صورت برای سادگی میتوان فرض کرد BER تنها تابعی از نسبت توان سیگنال دریافتی به تداخلات است ( $S/I$ ) به این نسبت اصطلاحاً SIR (Signal to Interference Ratio) گفته میشود و به چنین کانالی تداخل-غالب اطلاق میشود.

# نسبت انرژی موجود در یک بیت به چگالی توان نویز بر واحد هرتز: $E_b/N_0$

- گفتیم کیفیت لینک بیسیم متناسب با SNR است

$$S = \frac{E_b}{T_b}$$

- .... و میدانیم:

$$N = N_0 B$$

# نسبت انرژی موجود در یک بیت به چگالی توان نویز بر واحد هرتز: EbN0

- گفتیم کیفیت لینک بیسیم متناسب با SNR است

$$S = \frac{E_b}{T_b} \quad \Rightarrow \quad \frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{R_b}{B}$$
$$N = N_0 B$$

- .... و میدانیم:

# نسبت انرژی موجود در یک بیت به چگالی توان نویز بر واحد هرتز: EbN0

- گفتیم کیفیت لینک بیسیم متناسب با SNR است

- .... و میدانیم:

$$S = \frac{E_b}{T_b} \quad \Rightarrow \quad \frac{S}{N} = \frac{E_b}{N_0} \times \frac{R_b}{B}$$

$N = N_0 B$

بهره وری پهنای باند  $\times \text{EbN0} = \text{SNR}$

- بهره وری پهنای باند مقداری ثابت است و وابسته به نوع مدولاسیون می باشد.

- برای 8PSK برابر است با ۳
- برای 64QAM برابر است با ۶

# رابطه $E_b/N_0$ با BER

آنچه تاثیر مستقیم در BER دارد، مقدار  $E_b/N_0$  است

SNR از آن جهت در BER موثر است که با  $E_b/N_0$  رابطه دارد

Modulation Scheme	BER
BPSK	$Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
BFSK	$Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$

# رابطه $E_b/N_0$ با BER

آنچه تاثیر مستقیم در BER دارد، مقدار  $E_b/N_0$  است

SNR از آن جهت در BER موثر است که با  $E_b/N_0$  رابطه دارد

صرفاً از روی SNR نمیتوان به مقایسه کیفیت دو لینک پرداخت، بلکه باید مقدار  $E_b/N_0$  دو لینک با یکدیگر سنجیده شود

Modulation Scheme	BER
BPSK	$Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
BFSK	$Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$



# رابطه EbN0 با BER

آنچه تاثیر مستقیم در BER دارد، مقدار EbN0 است

SNR از آن جهت در BER موثر است که با EbN0 رابطه دارد

صرفا از روی SNR نمیتوان به مقایسه کیفیت دو لینک پرداخت، بلکه باید مقدار EbN0 دو لینک با یکدیگر سنجیده شود

Modulation Scheme	BER
BPSK	$Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
BFSK	$Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$

اندازه گیری EbN0 بطور مستقیم بسیار پیچیده تر

# رابطه $E_b/N_0$ با BER

آنچه تاثیر مستقیم در BER دارد، مقدار  $E_b/N_0$  است

SNR از آن جهت در BER موثر است که با  $E_b/N_0$  رابطه دارد

صرفا از روی SNR نمیتوان به مقایسه کیفیت دو لینک پرداخت، بلکه باید مقدار  $E_b/N_0$  دو لینک با یکدیگر سنجیده شود

Modulation Scheme	BER
BPSK	$Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$
BFSK	$Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$

پارامتر SNR دارای اهمیت بسزایی است زیرا آنرا میتوان عملا در محیط اندازه گیری نمود

اندازه گیری  $E_b/N_0$  بطور مستقیم بسیار پیچیده تر

# خود آزمایی

در برگه اطلاعات یک کارت WiFi منطبق با IEEE802.11b/g مقدار حساسیت گیرنده (Receiver Sensitivity) برابر  $-95\text{dBm}$  درج شده است. این مقدار برابر حداقل توان سیگنالی است که کارت WiFi می تواند آنرا بدرستی دریافت نماید. اطلاعات موجود در سیگنالهایی که توان دریافتی شان کمتر از این حد باشد احتمالا توسط کارت WiFi قابل دیکد شدن نخواهد بود.

الف) برای این کارت، مقدار SNR معادل را بدست آورید.

ب) مقدار  $E_b/N_0$  را بدست آورید. فرض کنید نرخ بیت برابر  $1\text{Mbps}$  باشد.

پاسخ) همانطور که قبلا هم اشاره شد پهنای باند کانالهای IEEE802.11a/b/g برابر 20MHz است که توان نویز موجود در آن تقریبا -100dBm خواهد شد. بنابراین داریم:

$$\text{SNR [dB]} = S - N = -95 - (-100) = 5 \text{ dB}$$

$$\text{EbN0 [dB]} = \text{SNR} - R_b/B \text{ [dB]} = 5 - 10\log(1/20) = 5 + 10\log(20) = 18 \text{ dB}$$

# خود آزمایی

استخراج آستانه  $E_b/N_0$  موردنیاز برای نرخ بیت‌های مختلف در IEEE802.11a:

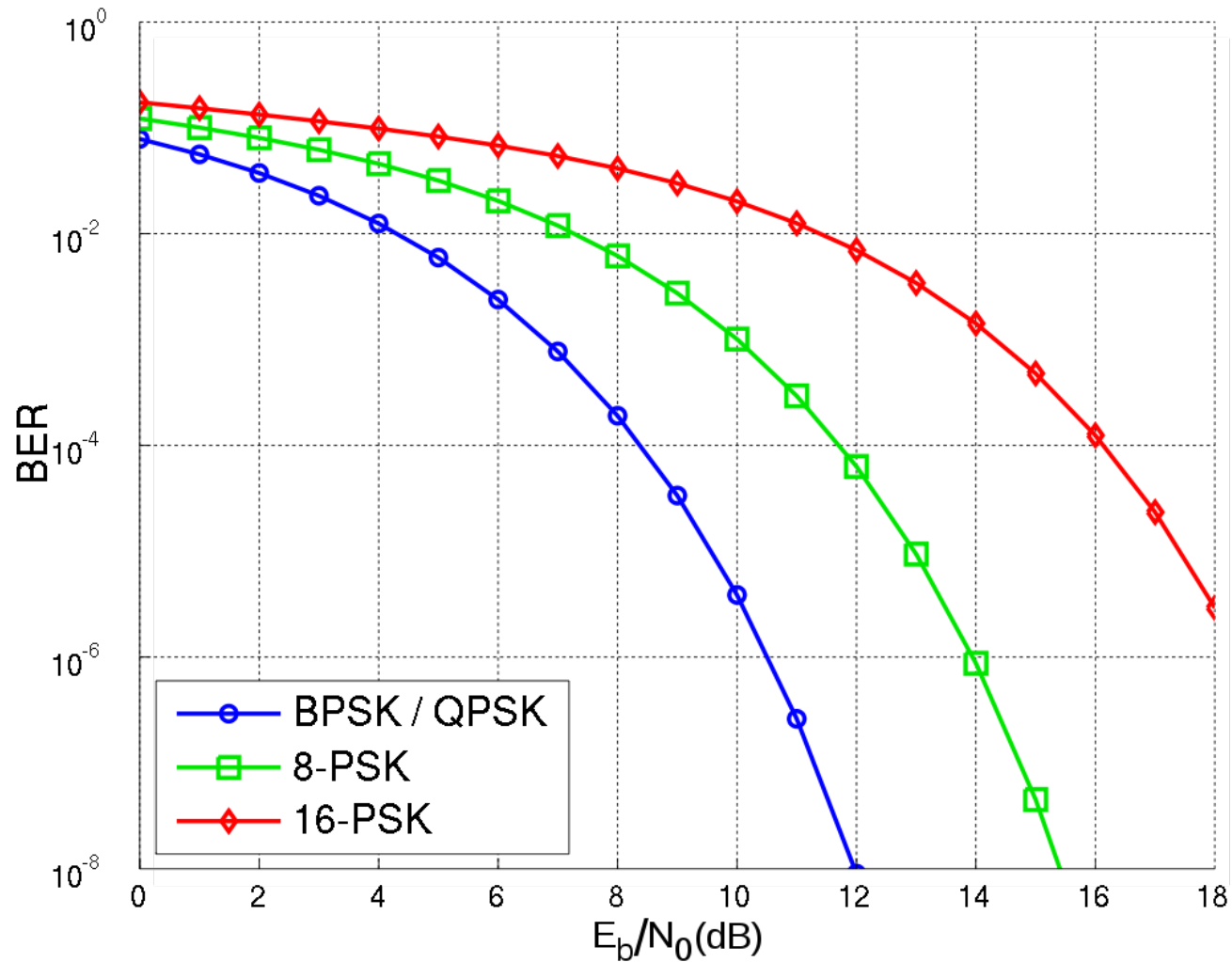
طبق استاندارد، یک کارت باند a باید حداقل های نشان داده شده در جدول زیر را از جهت حساسیت گیرنده فراهم نماید. در این صورت مقدار SNR و  $E_b/N_0$  لازم برای هر نرخ بیت را بدست آورید.

Data rate (Mbps)	Minimum sensitivity (dBm)
6	-82
9	-81
12	-79
18	-77
24	-74
36	-70
48	-66
54	-65

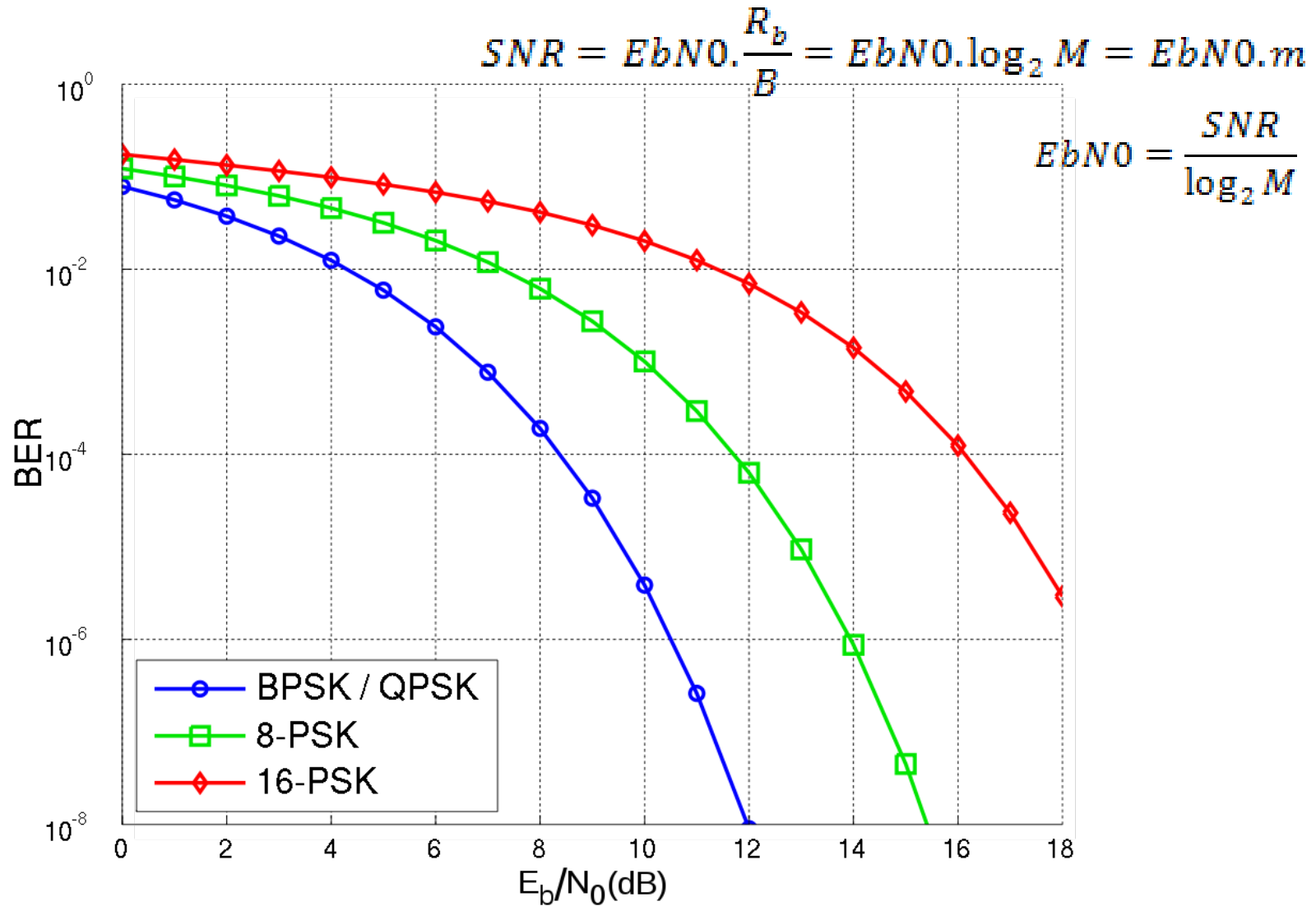
**پاسخ)** با توجه به اینکه  $B=20\text{MHz}$  و  $E_bN_0 [\text{dB}] = \text{SNR} - 10\log(R_b/B)$  میباشد، مقدار  $\text{SNR}$  و  $E_bN_0$  مورد نیاز در ستون سوم در جدول مقابل اضافه شده است. لازم به ذکر است با توجه به پهنای باند 20 مگاهرتزی برای کانالها میزان توان نویز کماکان  $-100\text{dBm}$  است.

<b>Data rate (Mbps)</b>	<b>Minimum sensitivity (dBm)</b>	<b>Minimum SNR (dB)</b>	<b>Minimum EbN0 (dB)</b>
<b>6</b>	<b>-82</b>	<b>18</b>	<b>23.23</b>
<b>9</b>	<b>-81</b>	<b>19</b>	<b>22.47</b>
<b>12</b>	<b>-79</b>	<b>21</b>	<b>23.22</b>
<b>18</b>	<b>-77</b>	<b>23</b>	<b>23.46</b>
<b>24</b>	<b>-74</b>	<b>26</b>	<b>25.21</b>
<b>36</b>	<b>-70</b>	<b>30</b>	<b>27.45</b>
<b>48</b>	<b>-66</b>	<b>34</b>	<b>30.20</b>
<b>54</b>	<b>-65</b>	<b>35</b>	<b>30.69</b>

# نمودار BER را بر حسب $E_b/N_0$ برای M-PSK

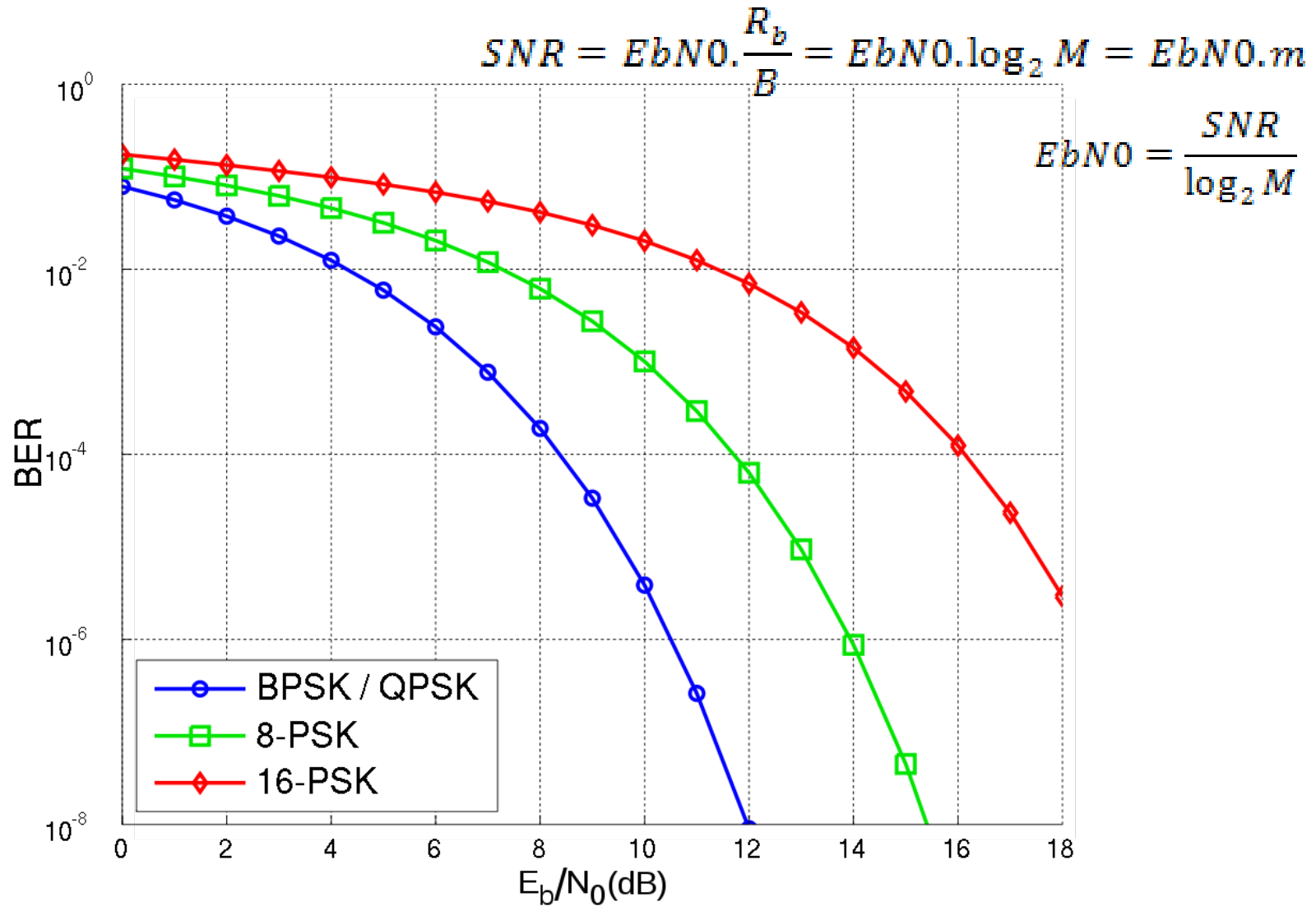


# نمودار BER را بر حسب EbN0 برای M-PSK



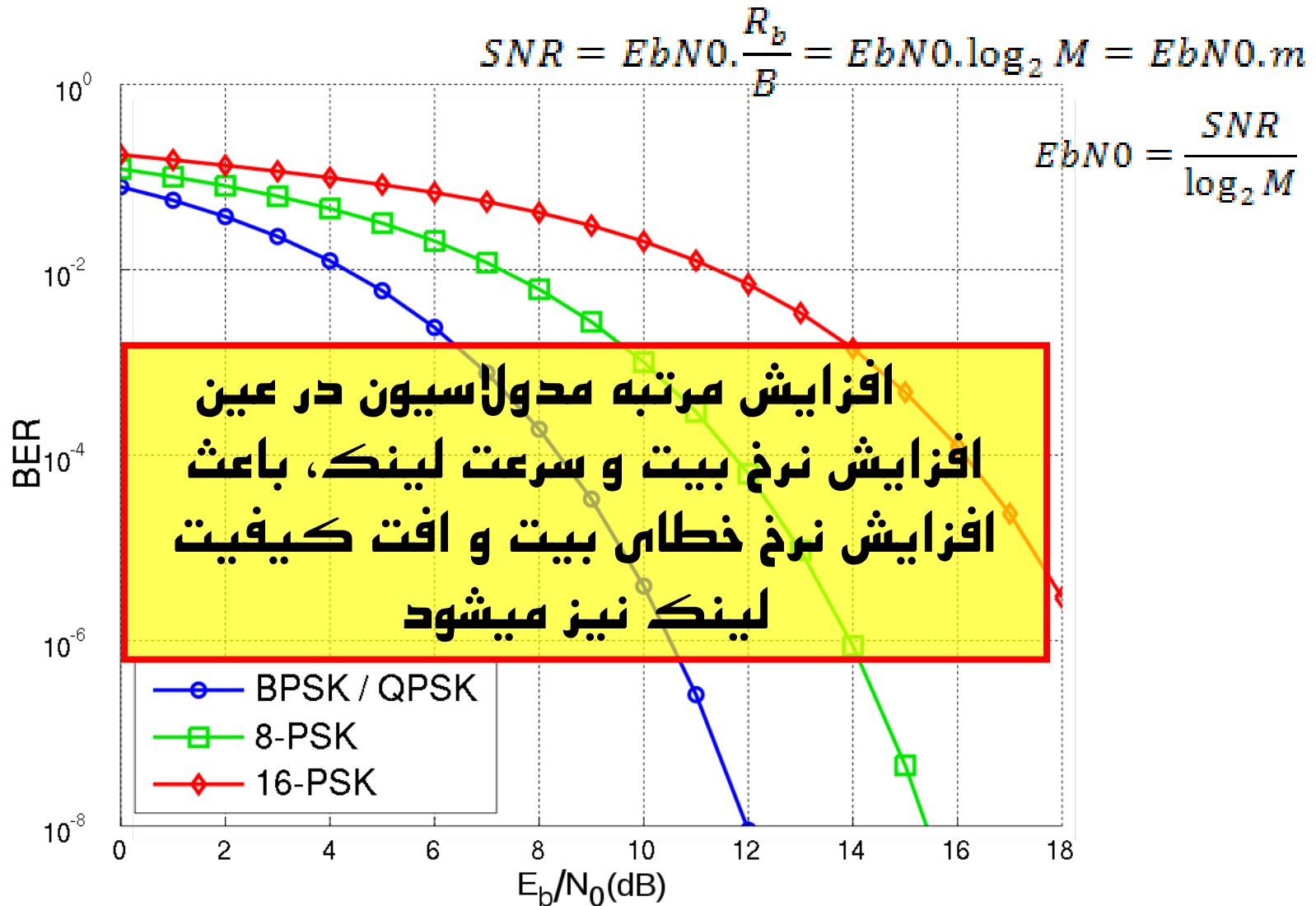


# نمودار BER را بر حسب EbN0 برای M-PSK



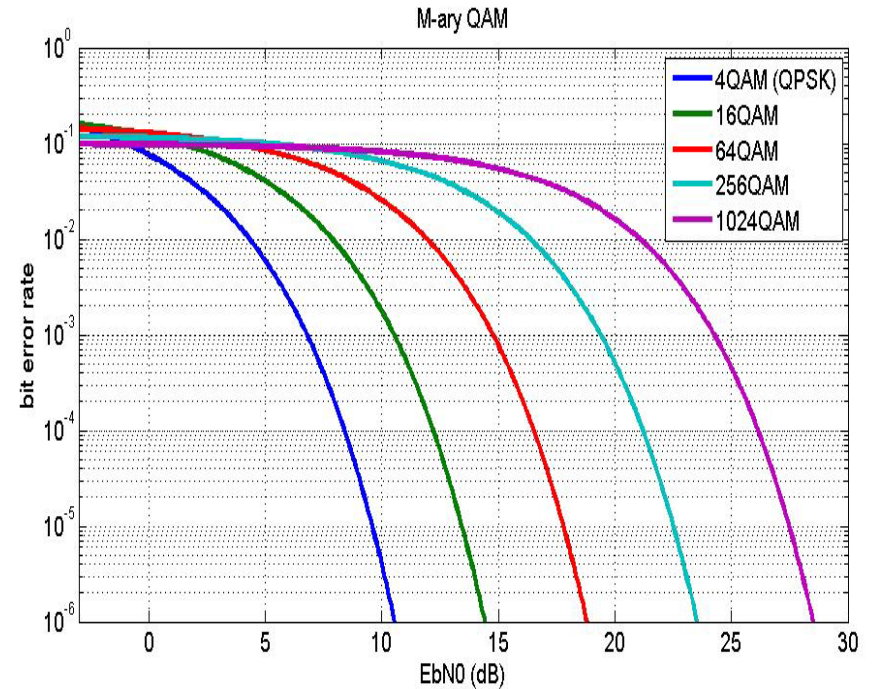
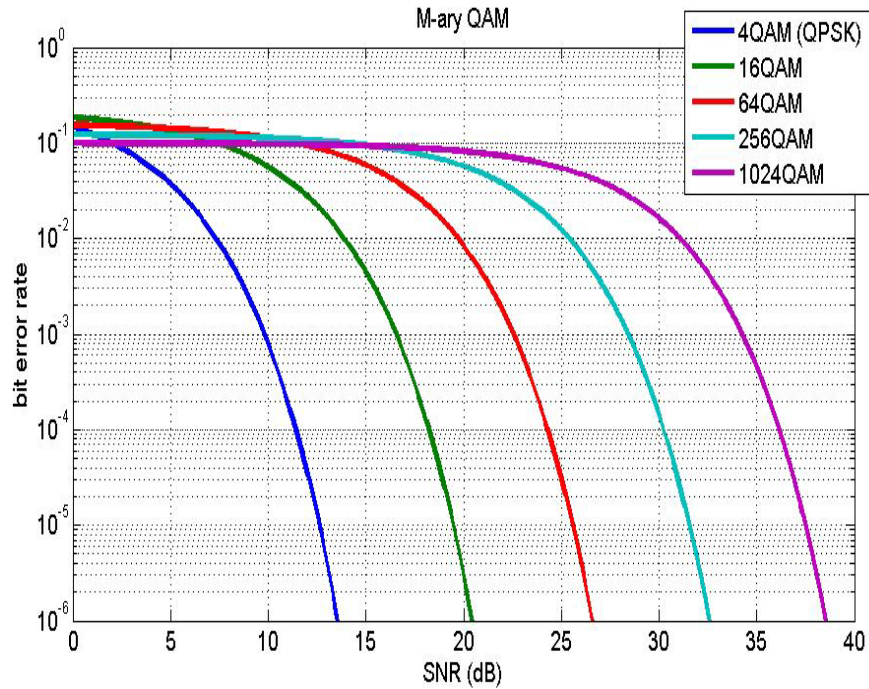
اگر مقدار  
ثابت SNR  
باشد، آنگاه  
با افزایش  
مرتبه  
مدولاسیون  
(M)، کیفیت  
سیگنال افت  
میکند

# نمودار BER را بر حسب EbN0 برای M-PSK



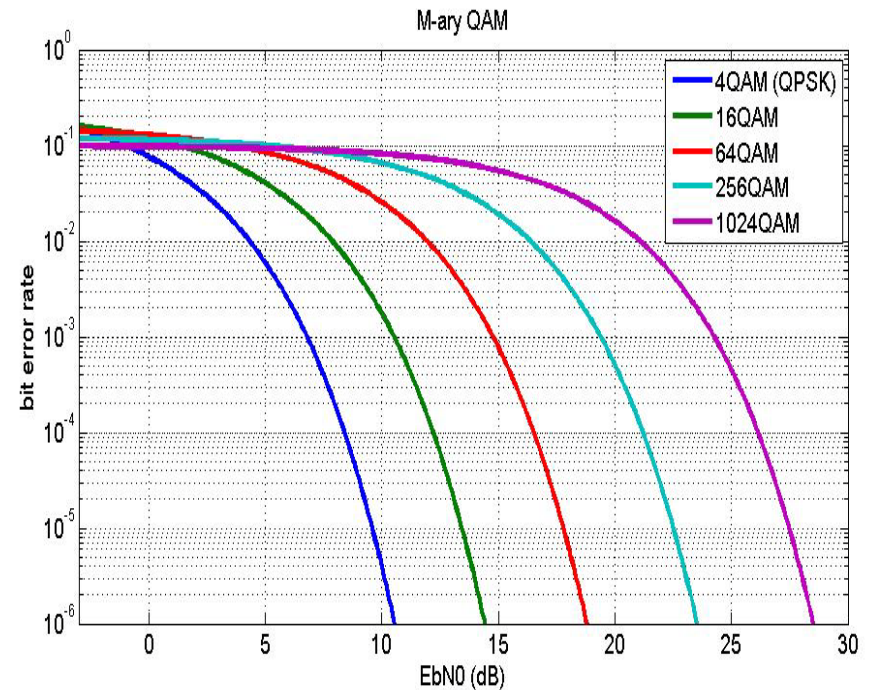
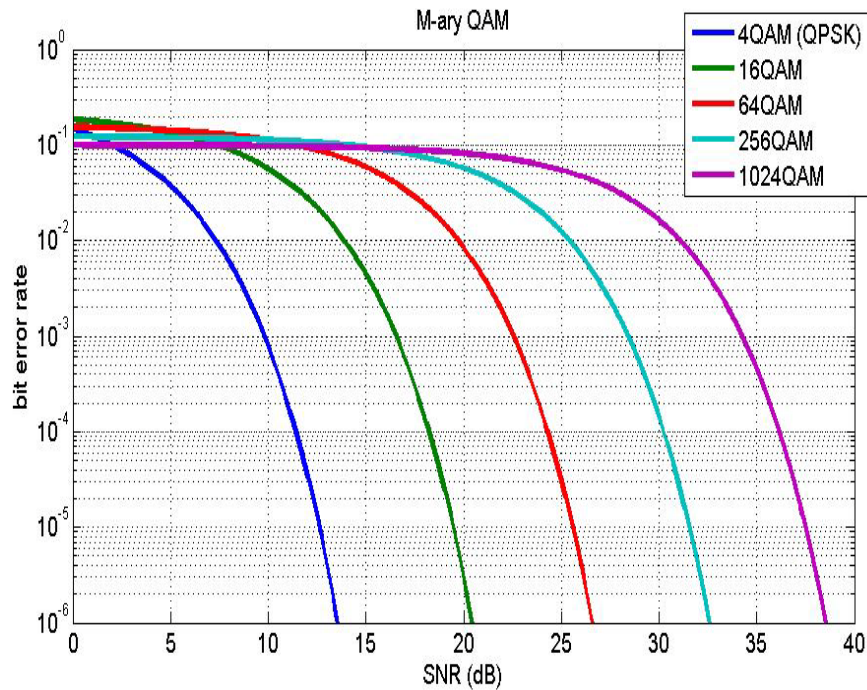
اگر مقدار  
ثابت SNR  
باشد، آنگاه  
با افزایش  
مرتبه  
مدولاسیون  
(M)، کیفیت  
سیگنال افت  
میکند

# مدولاسیون M-QAM



به ازای مقدار یکسان  $E_b/N_0$  در نمودار سمت راست،  
مقدار SNR برای مرتبه های مختلف M-QAM متفاوت  
است، زیرا نرخ بیت متفاوت است

# مدولاسیون M-QAM



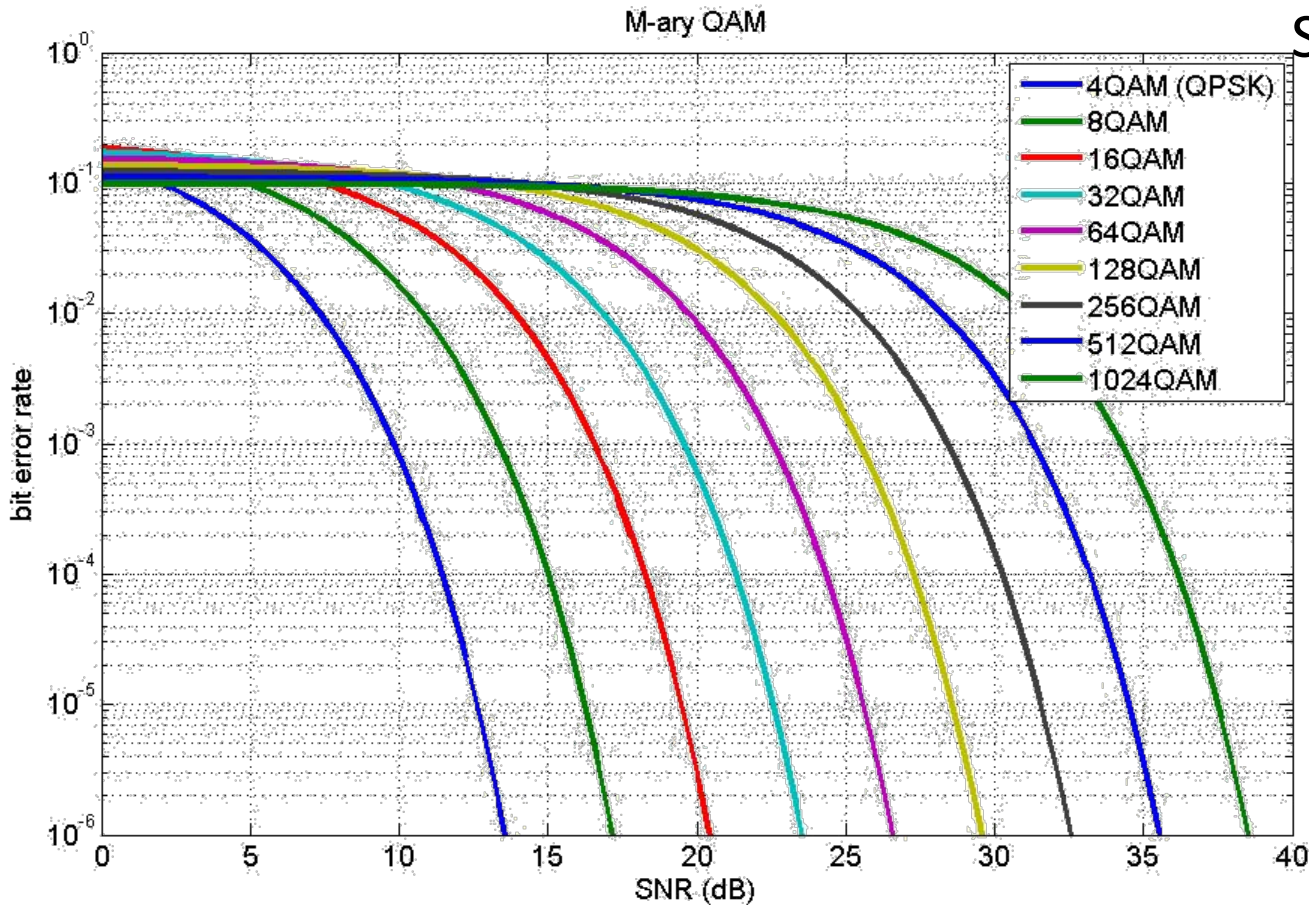
به ازای مقدار یکسان  $E_b/N_0$  در نمودار سمت راست، مقدار SNR برای مرتبه های مختلف M-QAM متفاوت است، زیرا نرخ بیت متفاوت است

SNR کمیتی مستقل از روش مدولاسیون و وابسته به شرایط محیطی است. اما  $E_b/N_0$  غالبا از منظر تئوری اطلاعات کاربرد دارد

# خود آزمایی

بدست آوردن مرتبه مناسب در مدولاسیون:

لینک بیسیمی با مدولاسیون QAM مفروض است. میدانیم مقدار SNR در مرز ناحیه پوشش شبکه برابر ۳۰ دسیبل می باشد. بسته های ارسالی روی این لینک ۱۰,۰۰۰ بیتی هستند.



الف) مرتبه مدولاسیون و SNR  
متناظر با  $BER=10^{-6}$   
را بدست آورید.

ب) اگر مقدار packet loss  
قابل قبول برابر ۱٪ باشد،  
حداکثر چه تعداد بیت را  
میتوان با یک سمبل  
نشان داد؟

# تطبیق لینک Link Adaptation

- اگر کیفیت لینک را با مقدار BER آن بسنجیم
- خودآزمایی قبل نشان می دهد که برای ثابت نگه داشتن کیفیت لینک و جلوگیری از کاهش آن بهنگام افت SNR، لازمست مرتبه مدولاسیون نیز کاهش یابد.
- تاثیر مستقیم کاهش مرتبه مدولاسیون کم شدن نرخ بیت ( $R_b$ ) است
- به این شگرد اصطلاحاً تطبیق لینک گفته میشود.
- از همین روست که با دور شدن از فرستنده از سرعت لینک کاسته میشود.
- در حالت کلی الگوریتمهای تطبیق لینک، علاوه بر کنترل M میتوانند سایر پارامترهای انتقال همچون نرخ کد و نرخ سمبل را نیز تغییر دهند.
- یکی از چالشهای طراحی یک الگوریتم تطبیق لینک خوب، تشخیص شرایطی است که تحت آن پارامترهای آن باید تغییر کنند.
- اگر حساسیت الگوریتم زیاد باشد، نرخ بیت مرتباً نوسان خواهد نمود
- در صورتیکه به اندازه کافی حساس نباشد، لینک برخی اوقات با کیفیت پایین (BER زیاد) و گاهی با سرعت پایین ( $R_b$  کوچک) کار خواهد کرد.
- یک روش ساده اما نه چندان موثر برای تطبیق نرخ بیت، استفاده از جدولی مشابه خودآزمایی قبل و نظارت مستمر بر SNR در کارت بیسیم است.

# کران ظرفیت شانون

- ظرفیت کانال به حد بالای میزان نرخ بیتی گویند که از یک کانال مخابراتی عبور می کند
- شانون توانست برای این ظرفیت یک کران بالا بدست آورد

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$



# کران ظرفیت شانون

- ظرفیت کانال به حد بالای میزان نرخ بیتی گویند که از یک کانال مخابراتی عبور می‌کند
- شانون توانست برای این ظرفیت یک کران بالا بدست آورد

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

- در رابطه شانون مقدار نسبت سیگنال به نویز بر حسب دسیبل نیست.
- ظرفیت شانون برای کانالهای ساده و غیر MIMO است. یعنی برای کانالهایی که یک آنتن فرستنده و گیرنده دارد.
- ظرفیت شانون برای کانالهای AWGN بدست آمده و تحت شرایط واقعی که محو شدگی وجود دارد ظرفیت کاهش می‌یابد.



# ظرفیت روش مدولاسیون!

- منظور از ظرفیت فلان روش مدولاسیون به ازای فلان مقدار SNR چیست؟

– مثلاً ظرفیت QAM به ازای  $SNR=25dB$  چقدر است؟

– پاسخ به این سوال تنها در سایه میزان BER قابل قبول روشن میشود

# ظرفیت روش مدولاسیون!

- منظور از ظرفیت فلان روش مدولاسیون به ازای فلان مقدار SNR چیست؟
  - مثلاً ظرفیت QAM به ازای  $SNR=25dB$  چقدر است؟
  - پاسخ به این سوال تنها در سایه میزان BER قابل قبول روشن میشود
- اگر مقدار قابل قبول BER برابر  $10^{-6}$  باشد، آنگاه ظرفیت QAM به ازای  $SNR=25dB$ 
  - نرخ سمبل 1Mps و پهنای باند 1MHz
  - ظرفیت حداکثر میتواند 5Mbps باشد
  - زیرا حداکثر میتوان از 32-QAM استفاده نمود

# معنی ظرفیت شانون چیست؟

- در مثال قبل ظرفیت QAM حداکثر میتواندست 5Mbps باشد
- اما طبق فرمول شانون کران ظرفیت شانون برابر است با:

$$C = 10^6 \log_2(1+10^{2.5}) = 8.3\text{Mbps}$$

- چرا؟

# معنی ظرفیت شانون چیست؟

- در مثال قبل ظرفیت QAM حداکثر میتواندست 5Mbps باشد
- اما طبق فرمول شانون کران ظرفیت شانون برابر است با:

$$C = 10^6 \log_2(1+10^{2.5}) = 8.3\text{Mbps}$$

• چرا؟

- در واقع قضیه شانون اثبات میکند که وجود دارد روش کدینگ و مدولاسیونی که می تواند نرخ بیت  $C$  را فراهم کند و BER را به سمت صفر سوق دهد.

# معنی ظرفیت شانون چیست؟

- در مثال قبل ظرفیت QAM حداکثر میتواندست 5Mbps باشد
- اما طبق فرمول شانون کران ظرفیت شانون برابر است با:

$$C = 10^6 \log_2(1+10^{2.5}) = 8.3\text{Mbps}$$

• چرا؟

- در واقع قضیه شانون اثبات میکند که وجود دارد روش کدینگ و مدولاسیونی که می تواند نرخ بیت  $C$  را فراهم کند و BER را به سمت صفر سوق دهد.
- اما چگونگی پیدا نمودن این روش کدینگ و مدولاسیون را مشخص نمی کند.

# معنی ظرفیت شانون چیست؟

- در مثال قبل ظرفیت QAM حداکثر میتواندست 5Mbps باشد
- اما طبق فرمول شانون کران ظرفیت شانون برابر است با:

$$C = 10^6 \log_2(1+10^{2.5}) = 8.3\text{Mbps}$$

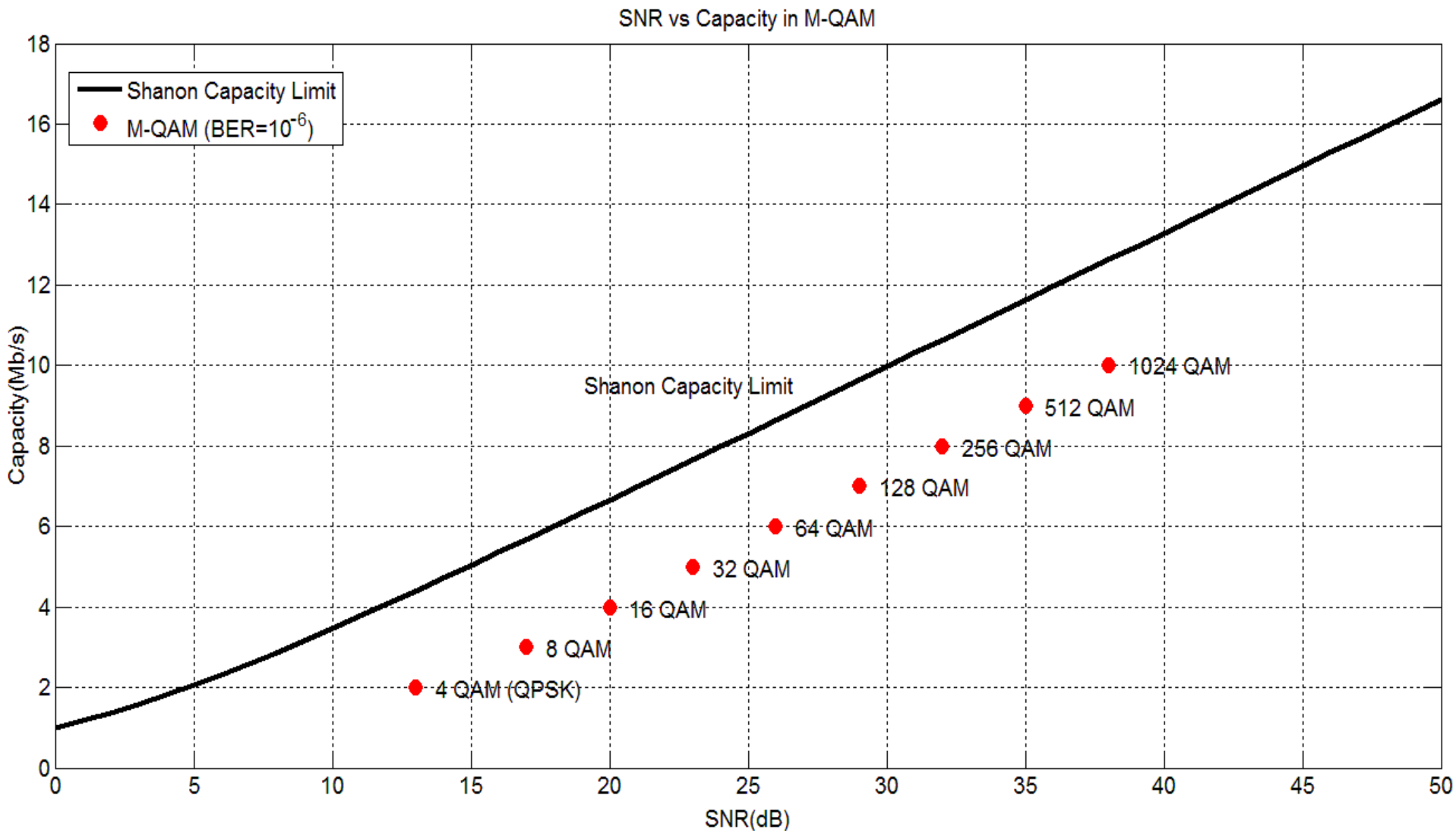
• چرا؟

- در واقع قضیه شانون اثبات میکند که وجود دارد روش کدینگ و مدولاسیونی که می تواند نرخ بیت C را فراهم کند و BER را به سمت صفر سوق دهد.
- اما چگونگی پیدا نمودن این روش کدینگ و مدولاسیون را مشخص نمی کند.
- این درحالی است که BER لینک 32-QAM به ازای ظرفیت 5Mbps در حد  $10^{-7}$  بدست می آید که فاصله قابل توجهی با صفر دارد.

# تکلیف

**مقایسه کران شانون با ظرفیت QAM:** کانالی با پهنای باند 1MHz و فیلترینگ ایده آل نایکویست مفروض است. در این صورت کران ظرفیت شانون را برای مقادیر مختلف SNR توسط MATLAB ترسیم نمایید. همچنین فرض کنید BER قابل قبول  $10^{-6}$  باشد، در این صورت برای مدولاسیونهای QAM، مقدار ظرفیت کانال را که میتوان BER هدف را برآورده نمود برحسب SNR لازم درکنار نمودار مذکور رسم نمایید و با هم مقایسه کنید.

# تكليف





# خطوط راهنمای کلی در طراحی سیگنال

- لینک منحصر محدود به پهنای باند، لینکی است که میتوان کمبود پهنای باند کانال را با افزایش مرتبه مدولاسیون و در نتیجه افزایش  $E_b/N_0$  مورد نیاز جبران نمود
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-QAM, M-PSK
- لینک منحصر محدود به توان، لینکی است که میتوان کمبود  $E_b/N_0$  آنرا با افزایش پهنای باند سیگنال جبران نمود
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-FSK
  - راهکار ساده تر: استفاده از کدهای تصحیح خطا
- لینک محدود به توان و پهنای باند، لینکی است که هرگاه بخواهیم کمبود  $E_b/N_0$  آنرا جبران کنیم از پهنای باند کانال تخطی میشود و نیز هرگاه بخواهیم اضافه پهنای باند آنرا بکاهیم با افزایش کمبود  $E_b/N_0$  مواجه میشویم
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-QAM, M-PSK و حذف محدودیت پهنای باند
  - تبدیل به لینک محدود به توان ← استفاده از کدهای تصحیح خطا برای جبران BER

# خطوط راهنمای کلی در طراحی سیگنال

- لینک منحصر محدود به پهنای باند، لینکی است که میتوان کمبود پهنای باند کانال را با افزایش مرتبه مدولاسیون و در نتیجه افزایش  $E_b/N_0$  مورد نیاز جبران نمود
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-QAM, M-PSK
- لینک منحصر محدود به توان، لینکی است که میتوان کمبود  $E_b/N_0$  آنرا با افزایش پهنای باند سیگنال جبران نمود
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-FSK
  - راهکار ساده تر: استفاده از کدهای تصحیح خطا
- لینک محدود به توان و پهنای باند، لینکی است که هرگاه بخواهیم کمبود  $E_b/N_0$  آنرا جبران کنیم از پهنای باند کانال تخطی میشود و نیز هرگاه بخواهیم اضافه پهنای باند آنرا بکاهیم با افزایش کمبود  $E_b/N_0$  مواجه میشویم
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-QAM, M-PSK و حذف محدودیت پهنای باند
  - تبدیل به لینک محدود به توان ← استفاده از کدهای تصحیح خطا برای جبران BER

# خطوط راهنمای کلی در طراحی سیگنال

- لینک منحصر محدود به پهنای باند، لینکی است که میتوان کمبود پهنای باند کانال را با افزایش مرتبه مدولاسیون و در نتیجه افزایش  $E_b/N_0$  مورد نیاز جبران نمود
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-QAM, M-PSK
- لینک منحصر محدود به توان، لینکی است که میتوان کمبود  $E_b/N_0$  آنرا با افزایش پهنای باند سیگنال جبران نمود
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-FSK
  - راهکار ساده تر: استفاده از کدهای تصحیح خطا
- لینک محدود به توان و پهنای باند، لینکی است که هرگاه بخواهیم کمبود  $E_b/N_0$  آنرا جبران کنیم از پهنای باند کانال تخطی میشود و نیز هرگاه بخواهیم اضافه پهنای باند آنرا بکاهیم با افزایش کمبود  $E_b/N_0$  مواجه میشویم
  - راهکار: استفاده از مدولاسیونهای M-QAM, M-PSK و حذف محدودیت پهنای باند
  - تبدیل به لینک محدود به توان ← استفاده از کدهای تصحیح خطا برای جبران BER

# خودآزمایی: در مورد محدودیت هر کدام از سیستمهای زیر اظهار نظر فرمایید

1. شبکه WiFi درون ساختمان برای کاربرد اینترنت
2. شبکه WiFi درون ساختمان با کاربرد اینترنت که علاوه بر صاحبان laptop، دارندگان گوشی های موبایل مجهز به WiFi نیز از آن استفاده می کنند
3. موشواره و صفحه کلید بیسیم
4. شبکه بیسیم سلولی مشابه GSM با کاربرد تماس صوتی

# شبکه WiFi درون ساختمان برای کاربرد اینترنت

- کاربردهای اینترنت اغلب سرعت بالا هستند همچنین تعداد کاربران هم خیلی کم نیست پس در مجموع پهنای باند زیادی لازم است ← محدود به پهنای باند
- برد لینکها کوچک و در حد ابعاد یک طبقه است بنابراین حتی با توان ارسال نه چندان بزرگی می توان  $E_b/N_0$  مناسبی دریافت نمود ← غیر محدود به توان
- راهکار: استفاده از خانواده مدولاسیون QAM و PSK که اتفاقا تکنولوژی WiFi مبتنی بر استاندارد IEEE802.11 هم از همین روشها استفاده میکند.

## شبکه WiFi درون ساختمان با کاربرد اینترنت که علاوه بر صاحبان laptop، دارندگان گوشی های موبایل مجهز به WiFi نیز از آن استفاده می کنند

- همانطور که قبلا استدلال شد ← محدود به پهنای باند

- اگرچه برد لینکها کوچک است و برای لینک طرف AP به کلاینت مشکل کمی EbN0 دریافتی وجود ندارد، اما بدلیل اینکه گوشی های موبایل باتری کوچکی دارند باید با توان بسیار کمتری از AP ها ارسال نمایند تا باتریشان زود تخلیه نشود. از این رو EbN0 دریافتی در سمت AP برای لینکهای کلاینت به AP می تواند ناکافی باشد ← محدود به توان

- راهکار: استفاده از مدولاسیونهای QAM یا PSK و کدهای تصحیح خطا

- در IEEE802.11 از کدهای کانولوشن استفاده میشود

# موشواره و صفحه کلید بیسیم

- پهنای باند مورد نیاز متناسب با سرعت تایپ و تکان دادن موشواره است بنابراین پهنای باند ناچیزی مورد نیاز است ← غیر محدود به پهنای باند
- اگرچه فاصله صفحه کلید یا موشواره با گیرنده بسیار کم و در حد یکی دو متر است، اما باتوجه به اینکه صفحه کلید و موشواره بیسیم هردو با باتری کار میکنند، لازمست توان ارسالی تا حد امکان ناچیز باشد. بنابراین  $E_b/N_0$  دریافتی میتواند خیلی کوچک باشد ← محدود به توان
- راهکار: استفاده از مدولاسیونهایی چون BFSK که اتفاقا در عمل همینطور هم هست. جالب اینجاست که استاندارد Bluetooth هم که از ابتدا برای این گونه کاربردها طراحی شده بود، از مدولاسیون FHSS استفاده میکند که از برخی جهات مشابه FSK عمل می نماید.

# شبکه بیسیم سلولی مشابه GSM با کاربرد تماس صوتی

- پهنای باند سیگنال صوتی کم است، اما تعداد کاربران تحت پوشش بسیار زیاد است بنابراین در مجموع به پهنای باند بزرگی احتیاج است ← محدود به پهنای باند
- از آنجا که برد پوشش یک BTS میتواند خیلی وسیع و در حد چندین کیلومتر باشد، توان دریافتی در مرز ناحیه پوشش کم خواهد بود. همچنین از آنجا که گوشی ها از باتری استفاده میکنند با توانی بسیار کمتر از BTS ارسال میکنند و لذا در سمت BTS توان دریافتی از جانب گوشی ها ناچیز است ← محدود به توان
- اگر بخواهیم دقیقتر بیان کنیم:
- لینک BTS به گوشی در وسط ناحیه پوشش : محدود به پهنای باند
- لینک BTS به گوشی در مرز پوشش : محدود به توان و پهنای باند
- لینک گوشی به BTS: محدود به توان و پهنای باند
- از اینروست که در عمل هم از شیوه های متنوع کدینگ و مدولاسیون در GSM استفاده میشود.



# کدهای تصحیح خطا

## Forward Error Correction Coding (FEC)

- برای بهبود BER:
  - افزایش توان سیگنال دریافتی ( $E_b/N_0$ )
  - کاهش مرتبه مدولاسیون ( $M$ ) و در نتیجه کاهش نرخ بیت ( $R_b$ )
  - استفاده از کدهای تصحیح خطا
- رشته ای Convolutional Codes
- بلوکی BCH Codes
- اساس کار: افزودن بیت‌هایی به داده تا با ایجاد افزونگی تعداد مشخصی خطای بیتی در سمت گیرنده قابل تصحیح باشد
  - کدهای تصحیح خطا باعث افزایش جزئی پهنای باند سیگنال می شوند

# کدهای تصحیح خطای خانواده BCH

- یک بلوک  $k$  تایی از بیت‌های داده را با یک بلوک  $n$  تایی از داده کد شده جایگزین می کنند
- تعداد خطاهای قابل تصحیح در هر بلوک  $k$  بیتی داده برابر  $t$ 
  - سیستم کدگذاری مربوطه با سه تایی مرتب  $(n, k, t)$  نمایش داده میشود
  - نرخ کد-بیت برابر با  $R_c = (n/k)R_b$
  - پهنای باند سیگنال  $(n/k)$  برابر

<b>N</b>	<b>k</b>	<b>t</b>
<b>7</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
<b>15</b>	<b>11</b>	<b>1</b>
	<b>7</b>	<b>2</b>
	<b>5</b>	<b>3</b>
<b>31</b>	<b>26</b>	<b>1</b>
	<b>21</b>	<b>2</b>
	<b>16</b>	<b>3</b>
	<b>11</b>	<b>4</b>
<b>63</b>	<b>57</b>	<b>1</b>
	<b>51</b>	<b>2</b>
	<b>45</b>	<b>3</b>
	<b>39</b>	<b>4</b>
	<b>36</b>	<b>5</b>
	<b>30</b>	<b>6</b>
<b>127</b>	<b>120</b>	<b>1</b>
	<b>113</b>	<b>2</b>
	<b>106</b>	<b>3</b>
	<b>99</b>	<b>4</b>
	<b>92</b>	<b>5</b>
	<b>85</b>	<b>6</b>
	<b>78</b>	<b>7</b>
	<b>71</b>	<b>8</b>
	<b>64</b>	<b>9</b>

- اگر نرخ خطای بیت برابر BER باشد، پس از استفاده از کد  $BCH(n,k,t)$ ، مقدار BER جدید چه خواهد بود؟

- احتمال خطای بلوک برابر است با احتمال اینکه حداقل  $t+1$  بیت از  $n$  بیت آن دچار خطا شود

$$BER_{block} = \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} BER^i (1 - BER)^{n-i}$$

- از طرفی احتمال خطای بلوک بطور یکسان بین تمام بیت‌های داده اصلی قابل تقسیم است

$$BER' = \frac{BER_{block}}{k} = \frac{1}{k} \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} BER^i (1 - BER)^{n-i}$$

# بهره کدینگ

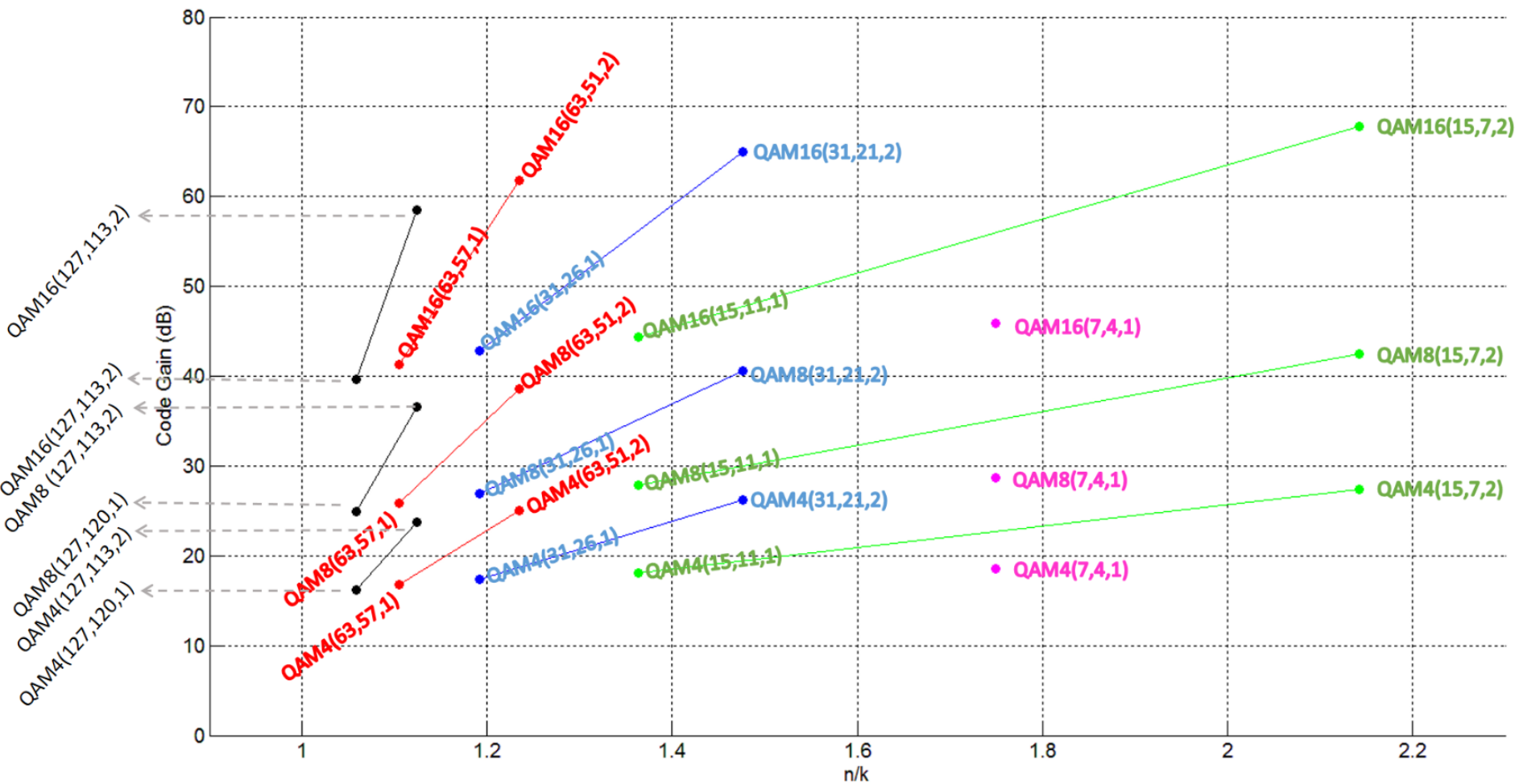
- میتوان اثر کدهای تصحیح خطا را معادل افزایش  $E_b/N_0$  تصور نمود.
- این شبه افزایش در  $E_b/N_0$  را بهره کدینگ می نامیم.
- بهای بهره کدینگ، افزایش جزئی پهنای باند است.

# بهره کدینگ

- میتوان اثر کدهای تصحیح خطا را معادل افزایش  $E_bN_0$  تصور نمود.
- این شبه افزایش در  $E_bN_0$  را بهره کدینگ می نامیم.
- بهای بهره کدینگ، افزایش جزئی پهنای باند است.

کدهای تصحیح اجازه میدهند پهنای باند را با  $E_bN_0$  مصالحه کنیم، بدون اینکه نیازمند تغییر مدولاسیون باشیم

# تكليف



# تكليف

Error Correction

