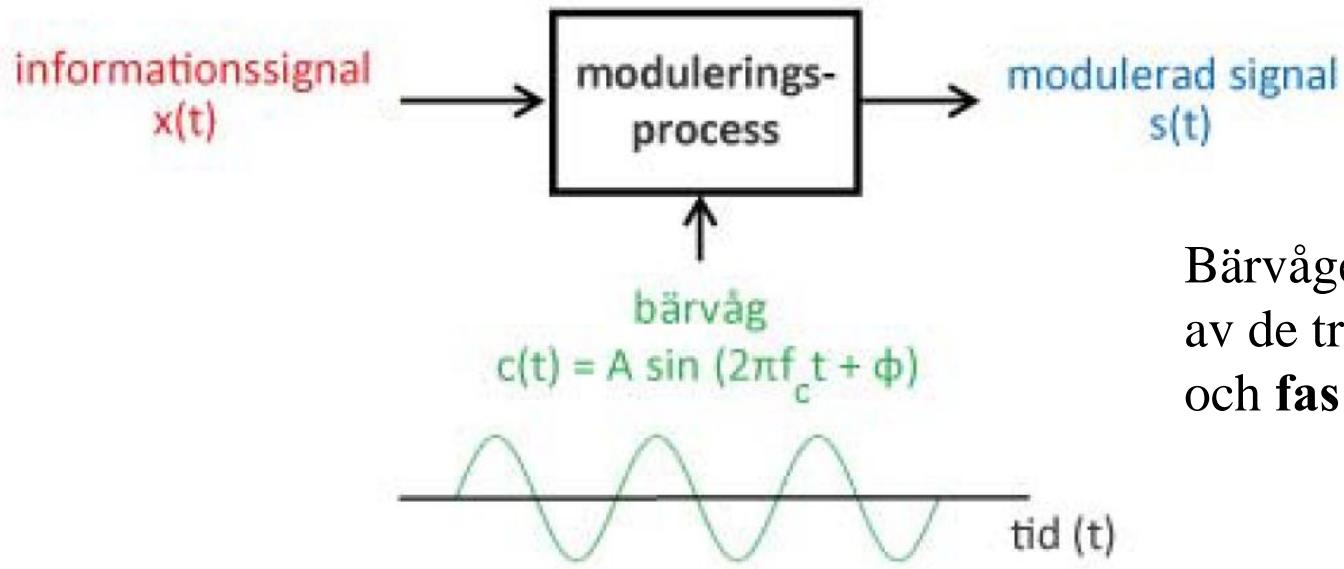


# Modulering

**Modulering** - process som får en egenskap hos en våg (bärvågen) att variera med en egenskap i en annan våg (informationssignalen).



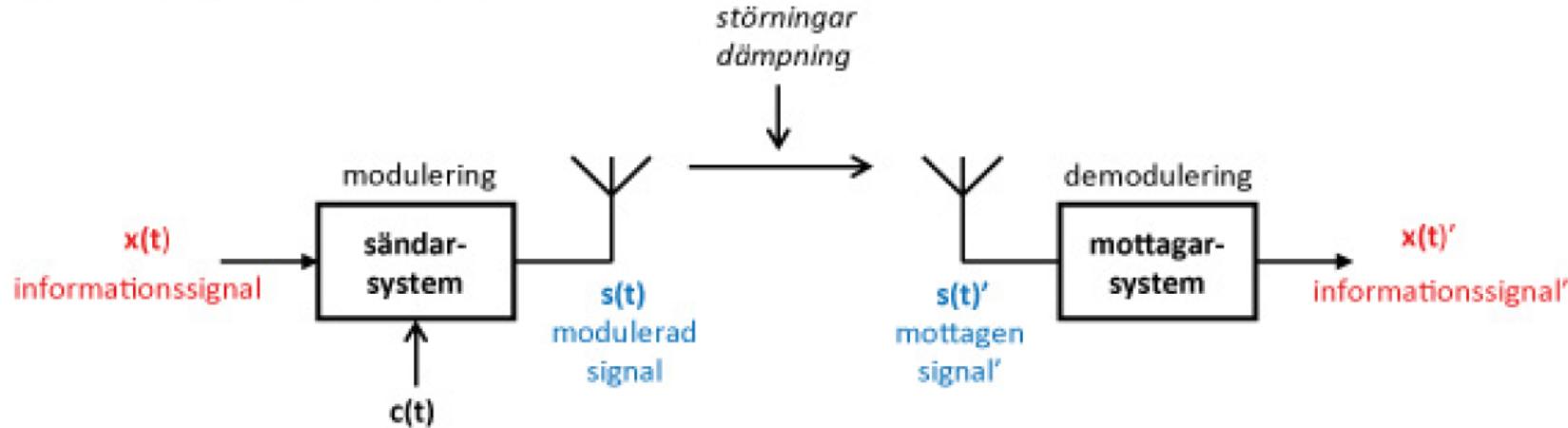
Bärvågen, i allmänhet sinusformad, karakteriseras av de tre parametrarna **amplitud (A)**, **frekvens ( $f_c$ )** och **fas ( $\phi$ )**.

Syftet med modulering är att överföra en informationssignal med relativt låg frekvens, en så kallad **basbandssignal**, på en **bärvåg** med betydligt högre frekvens som lämpar sig bättre för själva transmissionen. Kanalen för transmissionen kan till exempel vara en elektrisk ledning, koaxialkabel, optisk fiber eller radioförbindelse.

## 5G NR PARAMETERS FOR DIFFERENT FREQUENCY BANDS

5G NR PARAMETER	FR1	FR2
Bandwidth options per carrier	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 MHz	50, 100, 200, 400 MHz
Subcarrier spacing	15, 30, 60 kHz	60, 120, 240 kHz
Maximum number of subcarriers	3300 (FFT 4096)	
Carrier Aggregation	Up to 16 carriers	
Moodulation schemes	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, uplink also allows $\pi/2$ -BPSK (only for DFT-s-OFDM).	
Radio frame length	10ms	
Subframe duration	1ms	
Duplex mode	FDD, TDD	TDD

# Radiokommunikationssystem



Ett förenklat blockschema för ett typiskt **radiokommunikationssystem** bestående av en sändare och en mottagare. Systemet kan bestå av till exempel en mobil och en basstation, en FM radiosändare och en radiomottagare i bilen, en satellit och en mottagare för digital TV i hemmet eller en accesspunkt för WiFi och en läsplatta.

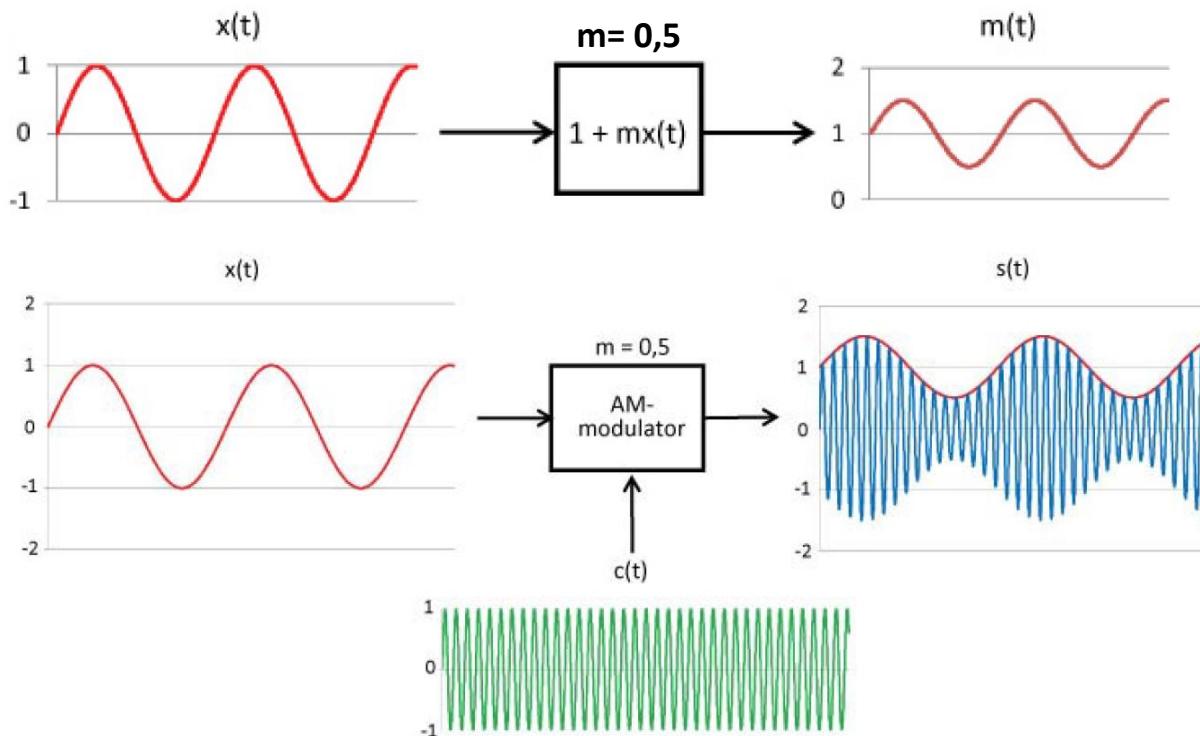
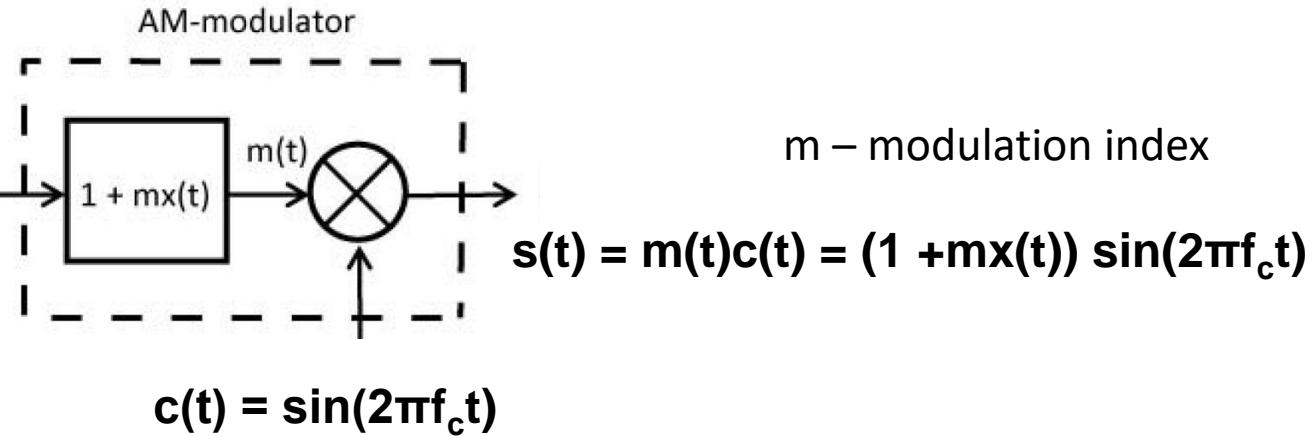
Informationssignalen  $x(t)$  moduleras med hjälp av bärvägen  $c(t)$ . Den modulerade signalen,  $s(t)$ , utsätts på vägen från sändarantenn till mottagarantenn för störningar och dämpning. I mottagaren demoduleras den mottagna signalen  $s(t)'$  (behäftad med störningar) och resultatet,  $x(t)'$ , blir en mer eller mindre exakt kopia av  $x(t)$ .

Ett stort antal tekniker för modulering av informationssignalen förekommer. Vilken teknik man väljer för ett specifikt tillämpningsområde beror huvudsakligen på **fem egenskaper**:

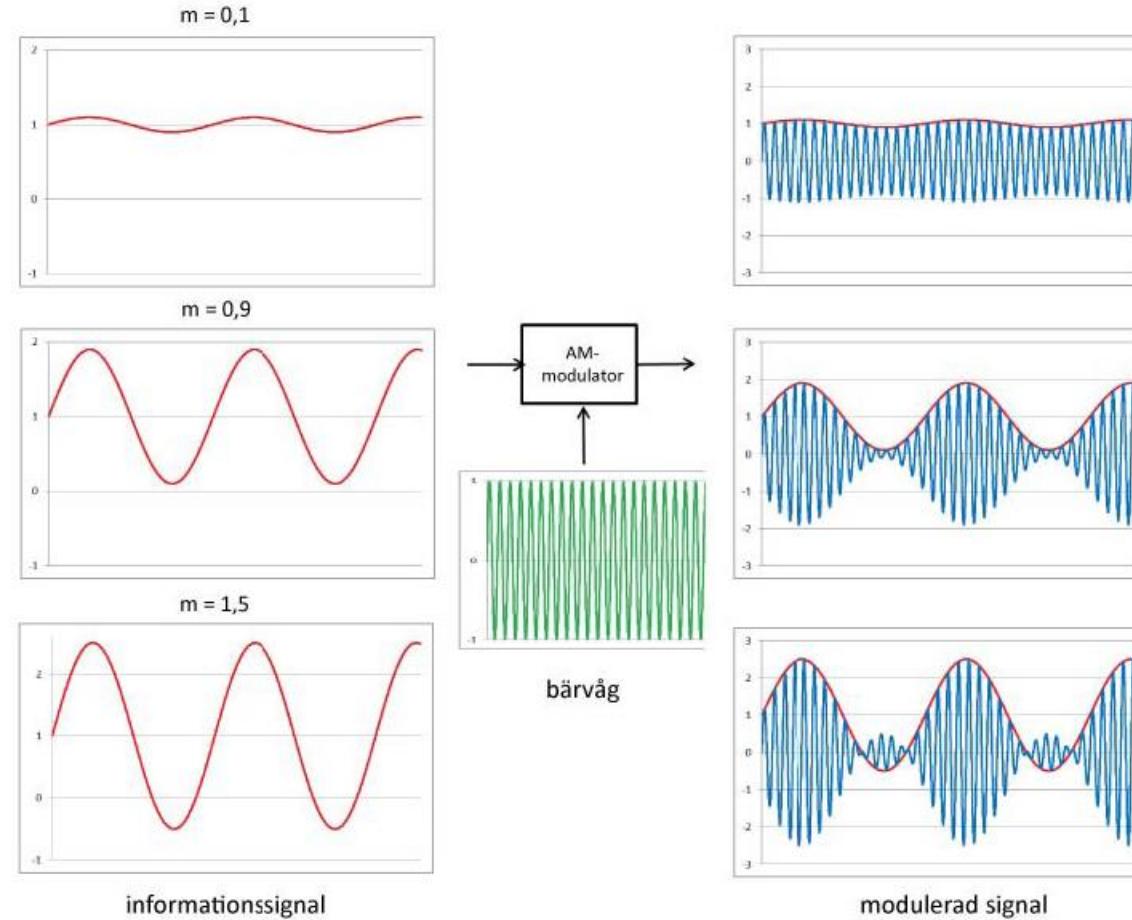
- **Bandbreddseffektivitet**: hur stor del av spektrum som upptas av den modulerade signalen (radiospektrum är en begränsad resurs). Vid exempelvis markbunden mikrovågskommunikation är det viktigare med liten bandbredd än med låg sändareffekt.
- **Energieffektivitet**: hur mycket effekt som krävs för överföring av signalen. Detta är mycket viktigt vid mobiltelefoni där batteriet är smartmobilens akilleshäl, varför man vill sända med minsta nödvändiga effekt.
- **Systemkomplexitet (priset)**: hur krävande, med avseende på elektronik eller datorkraft, är implementationen av en modulator/demodulator.
- **Störningskänslighet**: hur påverkas den modulerade signalen av miljön den befinner sig i.
- **Informationskapacitet**: hur mycket information som ska överföras per tidsintervall  
En naturlig indelning av teknikerna för modulering baseras på informationssignalens egenskaper. Om signalen är analog (till exempel ljud) talar man om **analog modulering**, om den är digital (data i form av nollor och ettor) talar man om **digital modulering**. I båda kategorierna kan samtliga tekniker för amplitud-, frekvens- och fasmodulering användas.

# Analog modulering – Amplitudmodulering

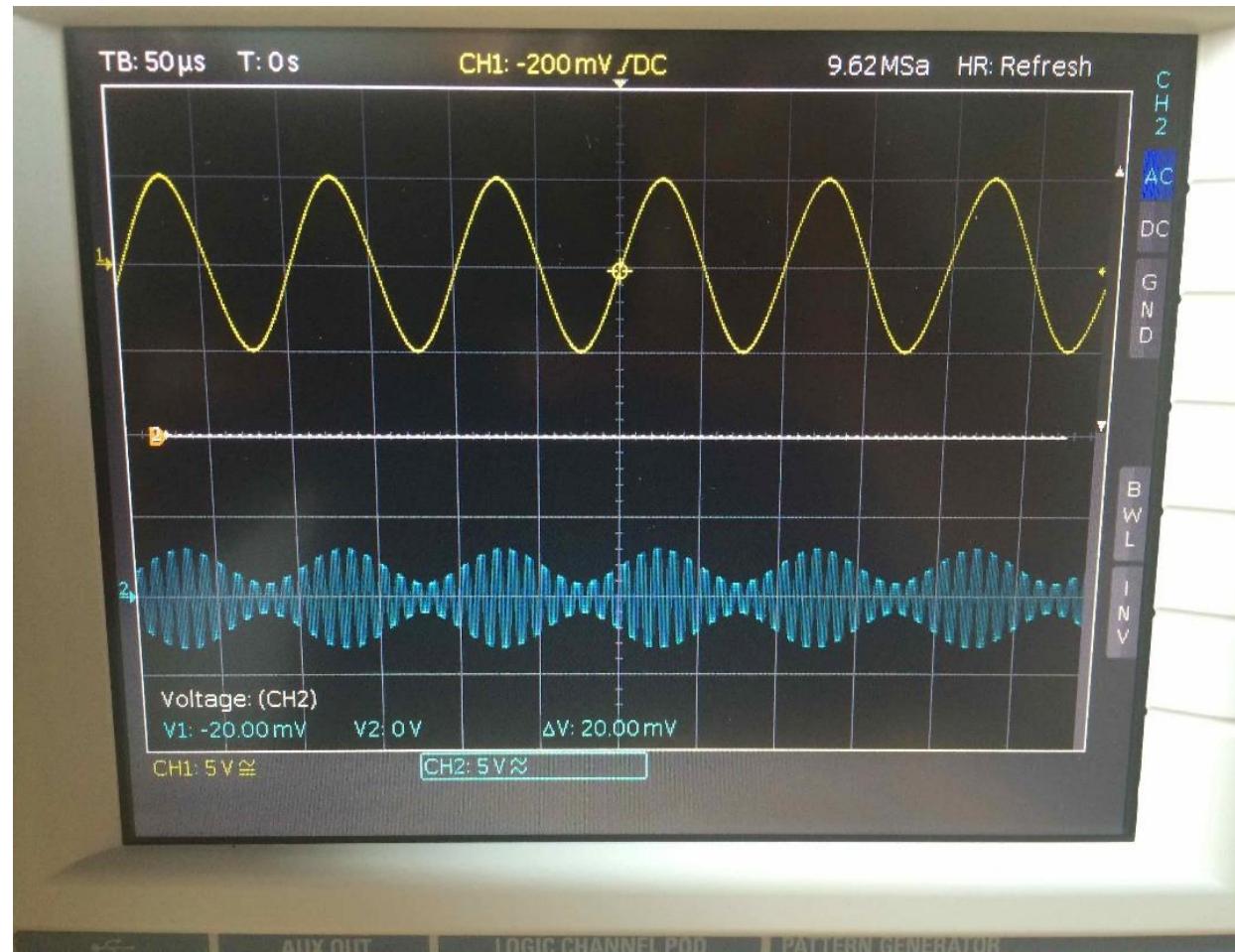
Flera varianter. (A3E variant):  $x(t)$



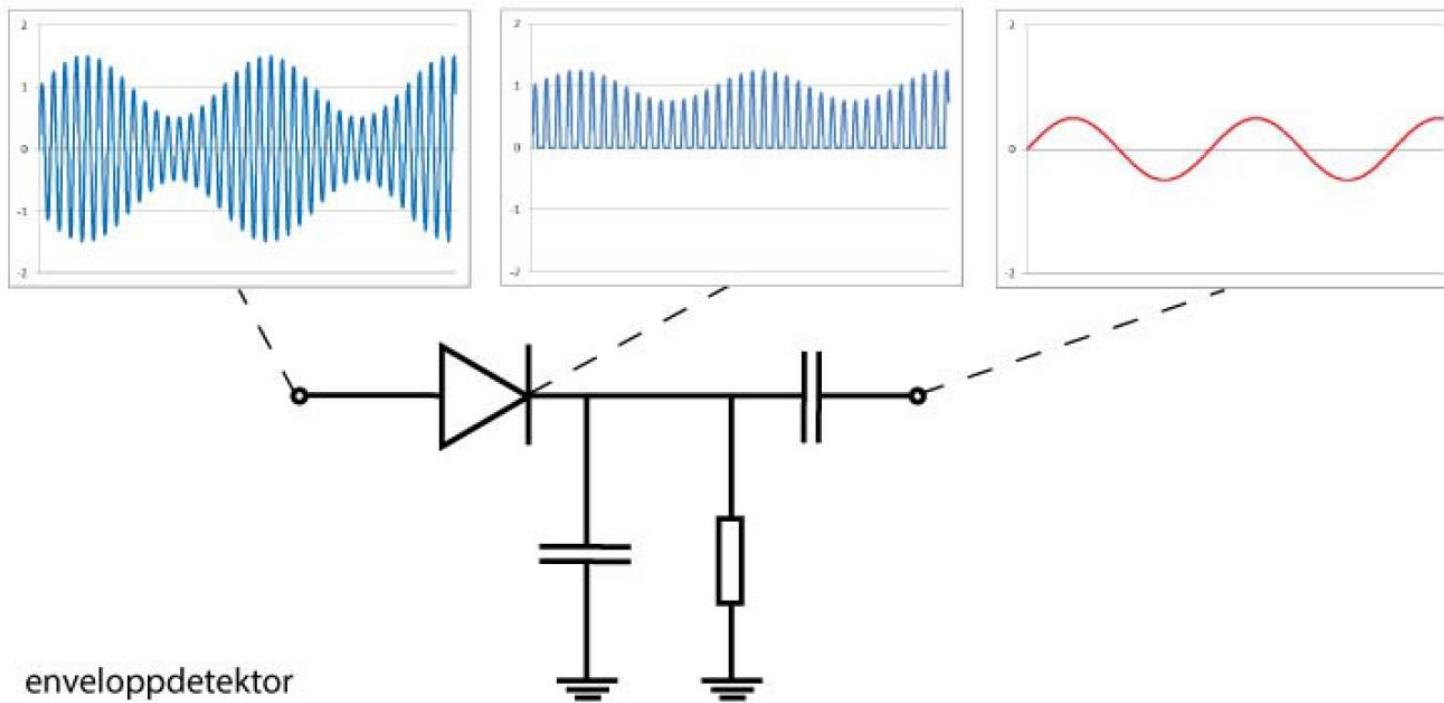
# Påverkan av modulationsindex



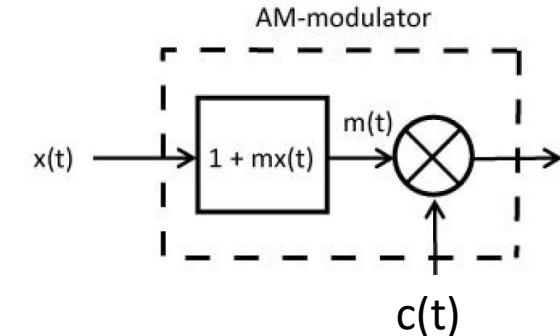
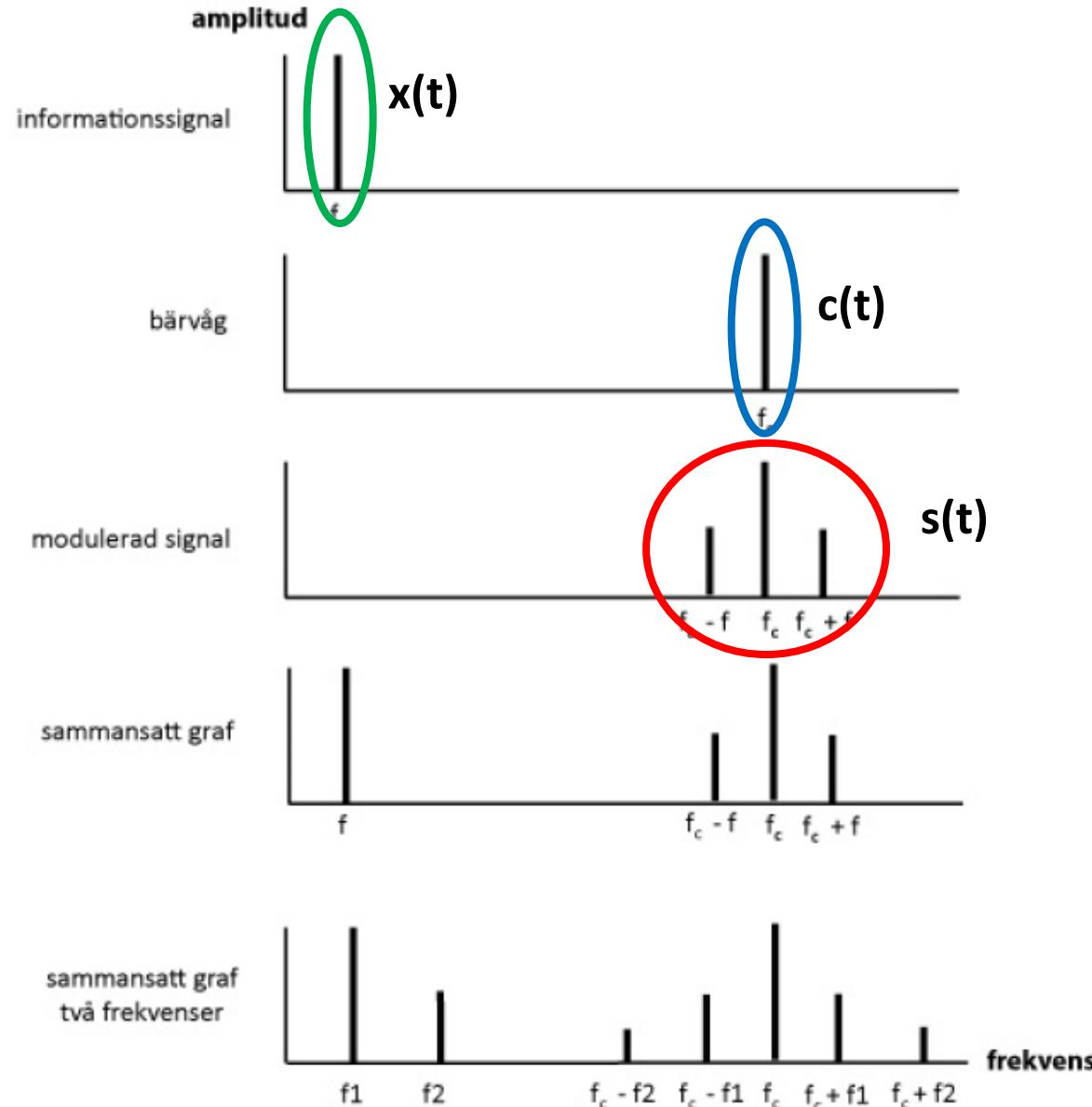
Rent praktiskt kan man realisera en modulator på olika sätt, dels med elektronik (transistorer och andra diskreta komponenter) i en integrerad krets, dels med en digital signalprocessor (DSP) som räknar fram den modulerade signalen  $s(t)$ .



# Demodulering - princip



# AM - spektrumegenskaper



$$c(t) = \sin(2\pi f_c t)$$

$$s(t) = m(t) * c(t) = (1 + m * x(t)) * \sin(2\pi f_c t)$$

Antag att  $x(t) = \sin(2\pi f t)$

$$s(t) = m(t) * c(t) = (1 + m * \sin(2\pi f t)) * \sin(2\pi f_c t) =$$

$$= \sin(2\pi f_c t) + m * \sin(2\pi f t) * \sin(2\pi f_c t) =$$

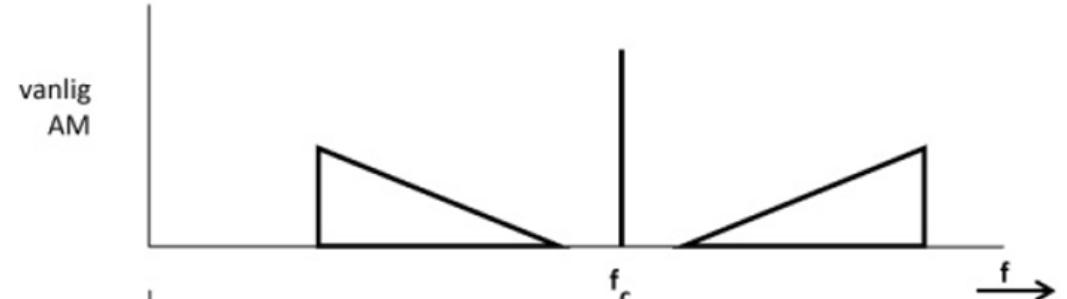
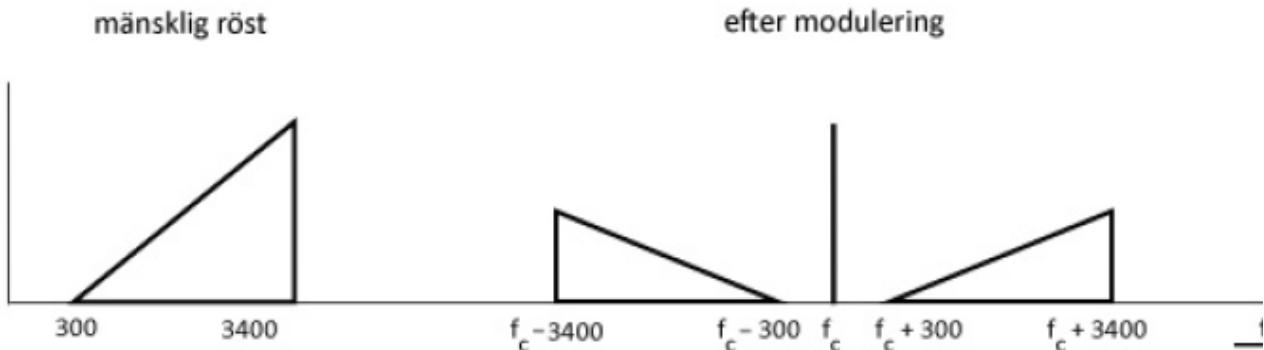
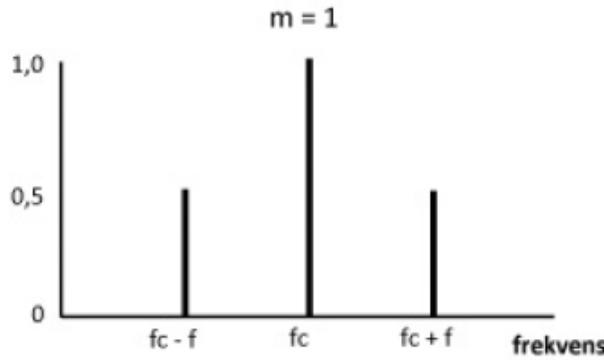
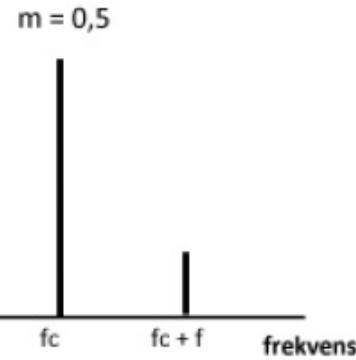
$$= \sin(2\pi f_c t) + m * (\cos(2\pi(f_c - f)t) - \cos(2\pi(f_c + f)t))/2$$

$$\cos \theta \cos \varphi = \frac{1}{2} (\cos(\theta - \varphi) + \cos(\theta + \varphi))$$

$$\sin \theta \sin \varphi = \frac{1}{2} (\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta + \varphi))$$

$$\sin \theta \cos \varphi = \frac{1}{2} (\sin(\theta + \varphi) + \sin(\theta - \varphi))$$

# AM - spektrumegenskaper



Fördelar/nackdelar med AM:

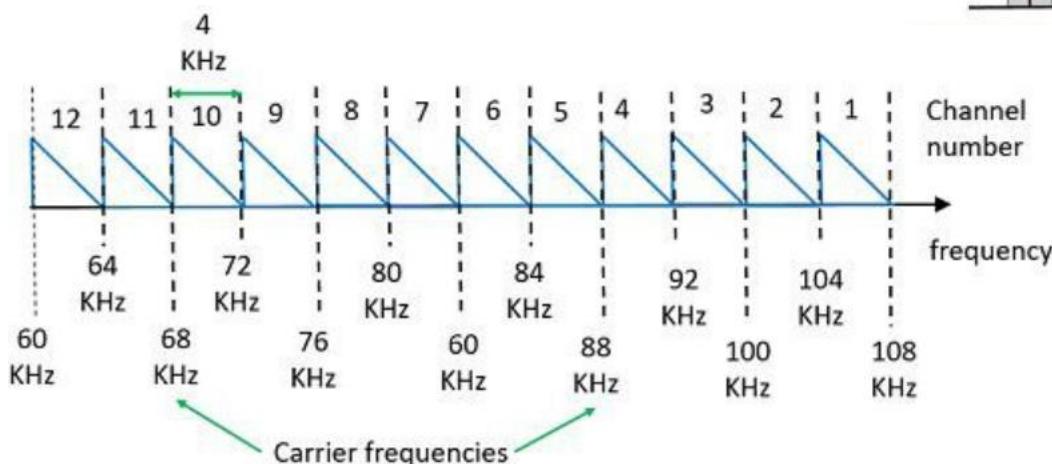
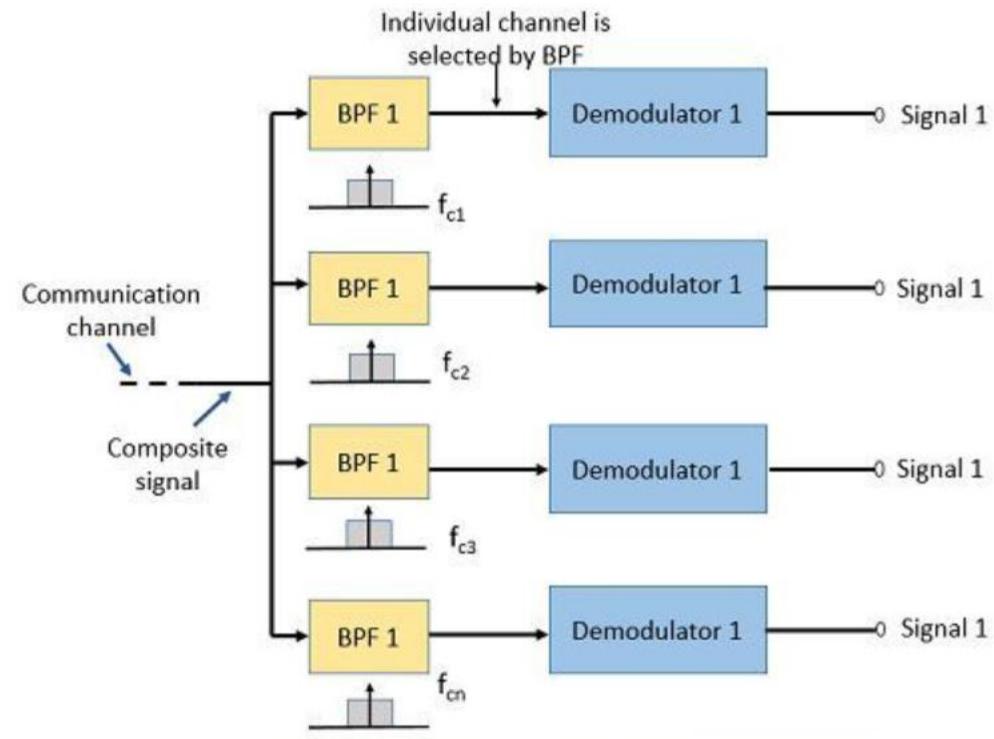
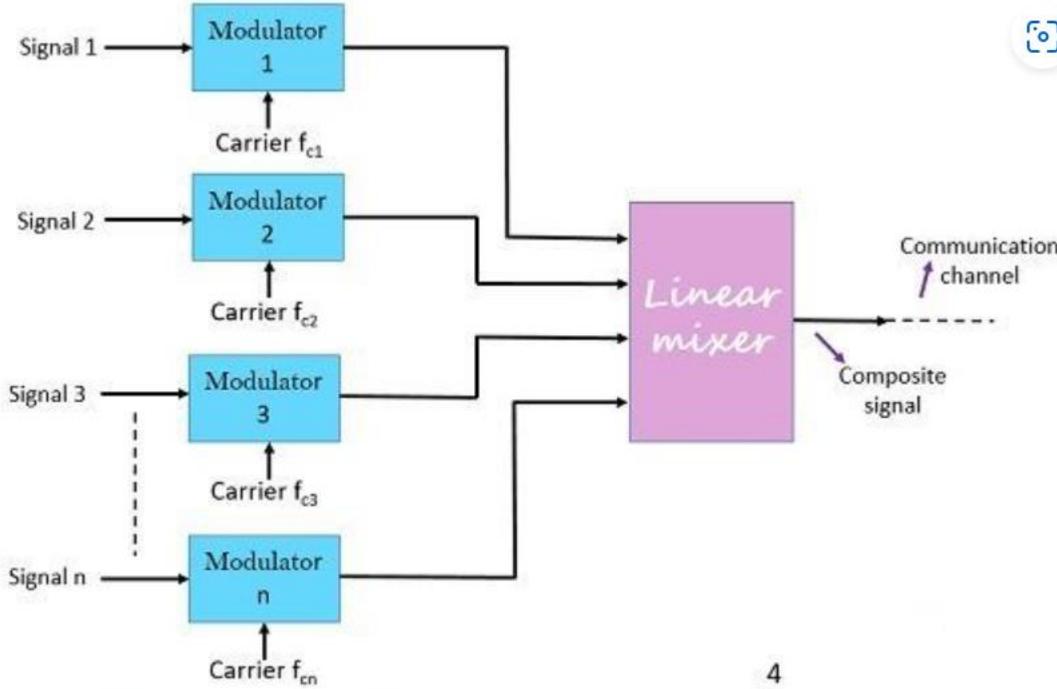
- Bandbreddseffektivitet: -
- Energieffektivitet: -
- Systemkomplexitet (priset): +
- Störningskänslighet: -
- Informationskapacitet: -

## 1956 First transatlantic telephone cable

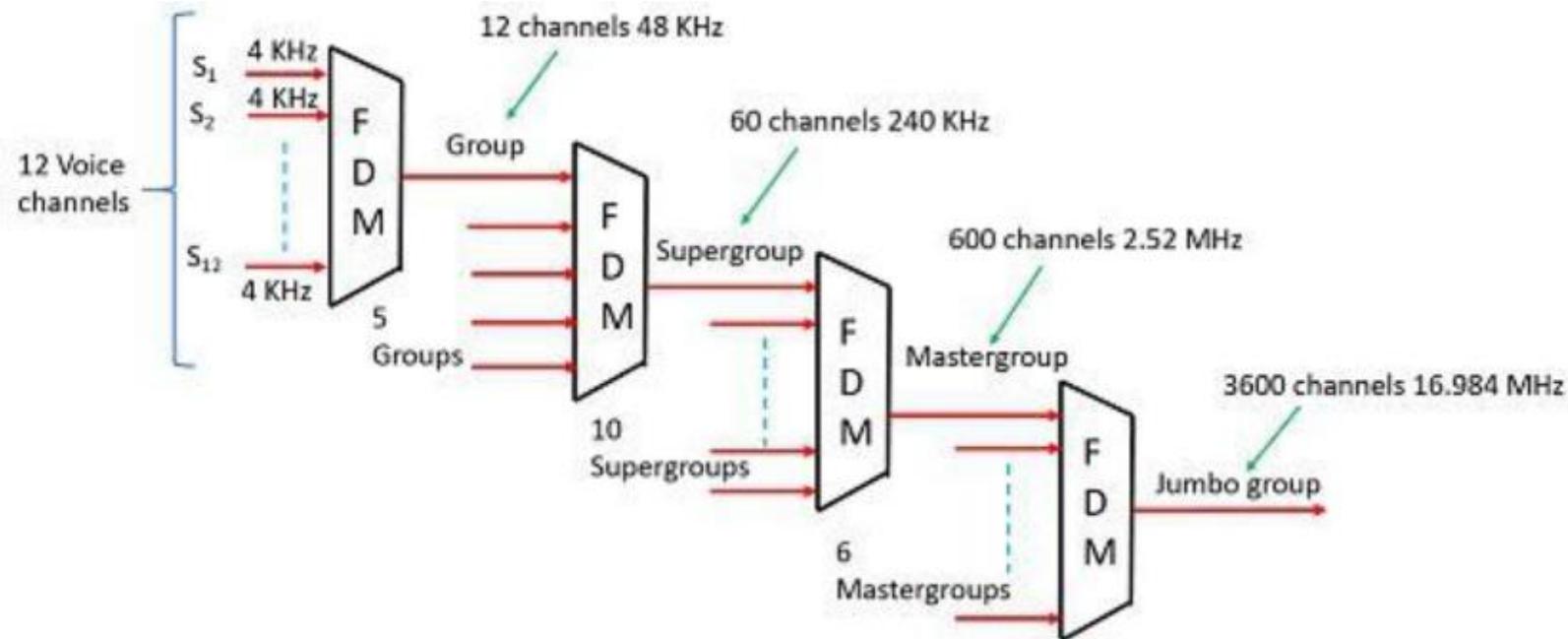
The first transatlantic telephone cable (TAT-1) was completed and opened for service. The 7242 km cable provided 36 high-quality telephone circuits from London to New York and Montreal.

Name	In service	Type	Initial channels	Final channels	Western end	Eastern end
TAT-1	1956–1978	Galvanic	36	51	Newfoundland	Scotland
TAT-2	1959–1982	Galvanic	48	72	Newfoundland	France
TAT-3	1963–1986	Galvanic	138	276	New Jersey	England
TAT-4	1965–1987	Galvanic	138	345	New Jersey	France
TAT-5	1970–1993	Galvanic	845	2,112	Rhode Island	Spain
TAT-6	1976–1994	Galvanic	4,000	10,000	Rhode Island	France
TAT-7	1978–1994	Galvanic	4,000	10,500	New Jersey	England
TAT-8	1988–2002	Fiber-optic	40,000	—	New Jersey	England, France

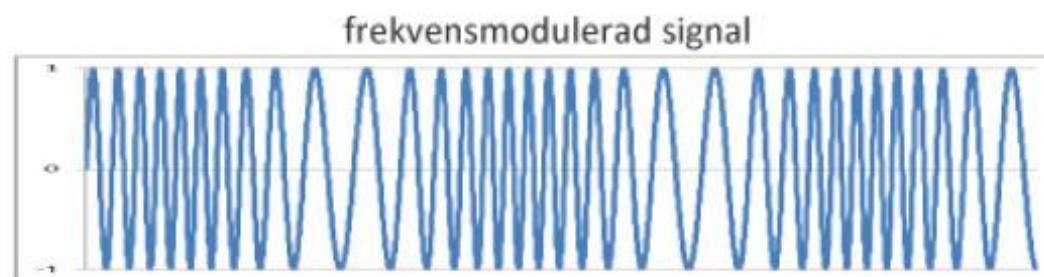
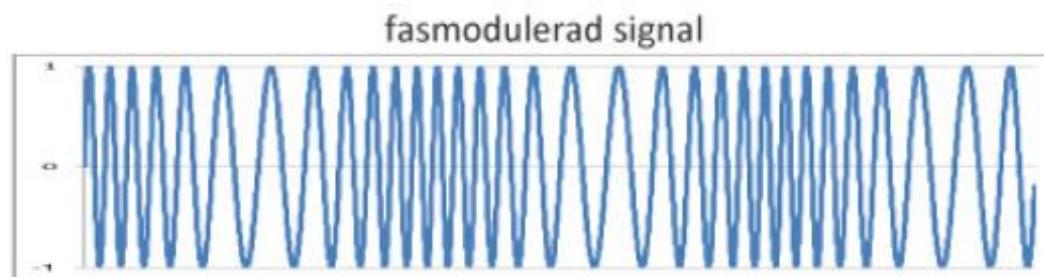
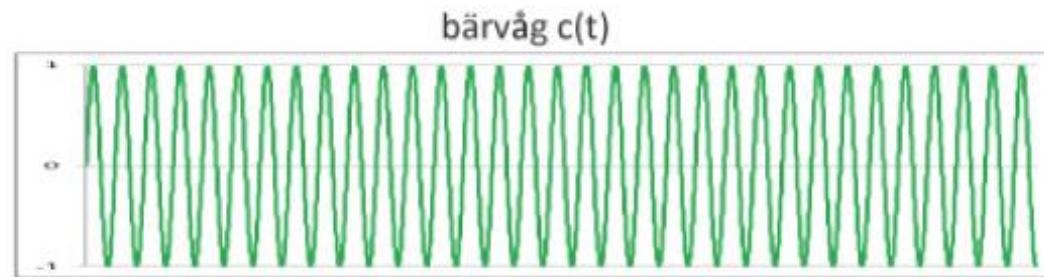
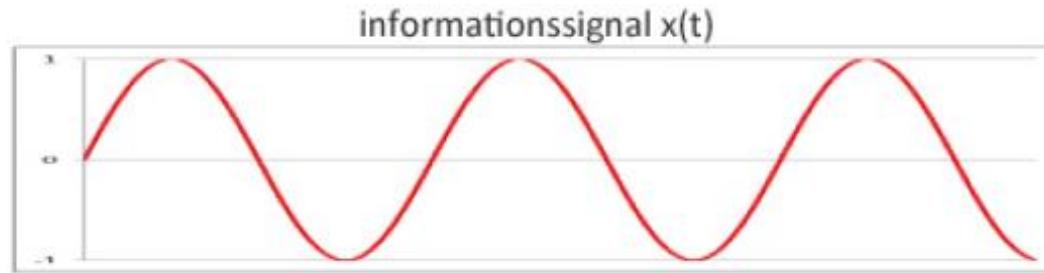
# Frequency Division Multiplexing (FDM)



# FDM Hierarchy

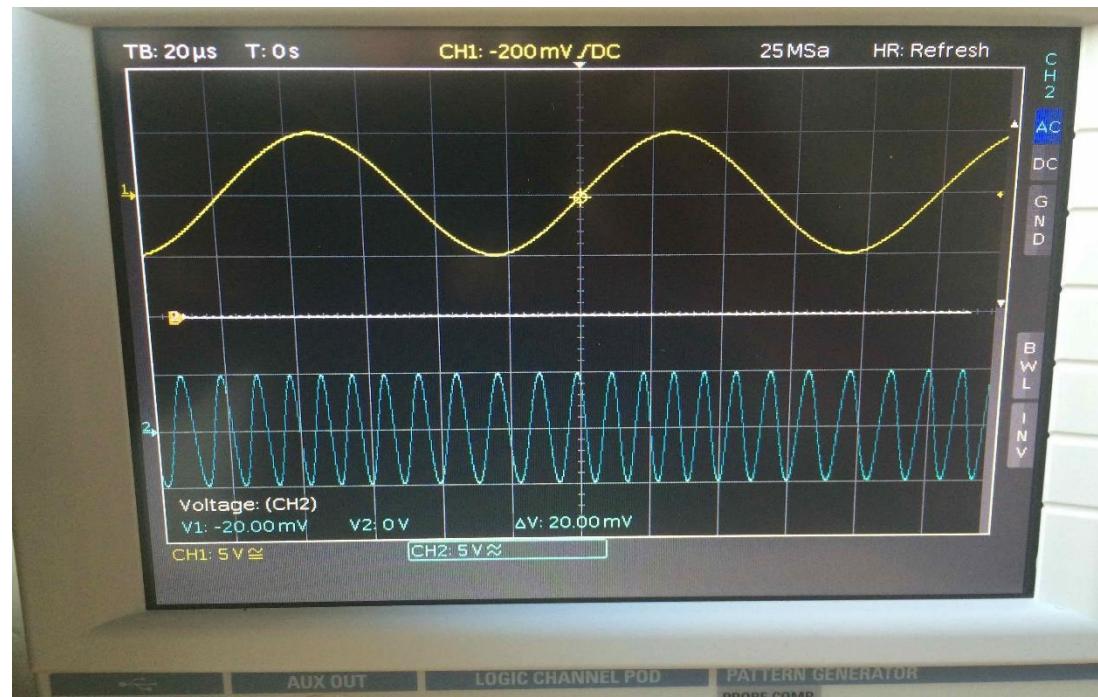


# Fas- och frekvensmodulerde signaler



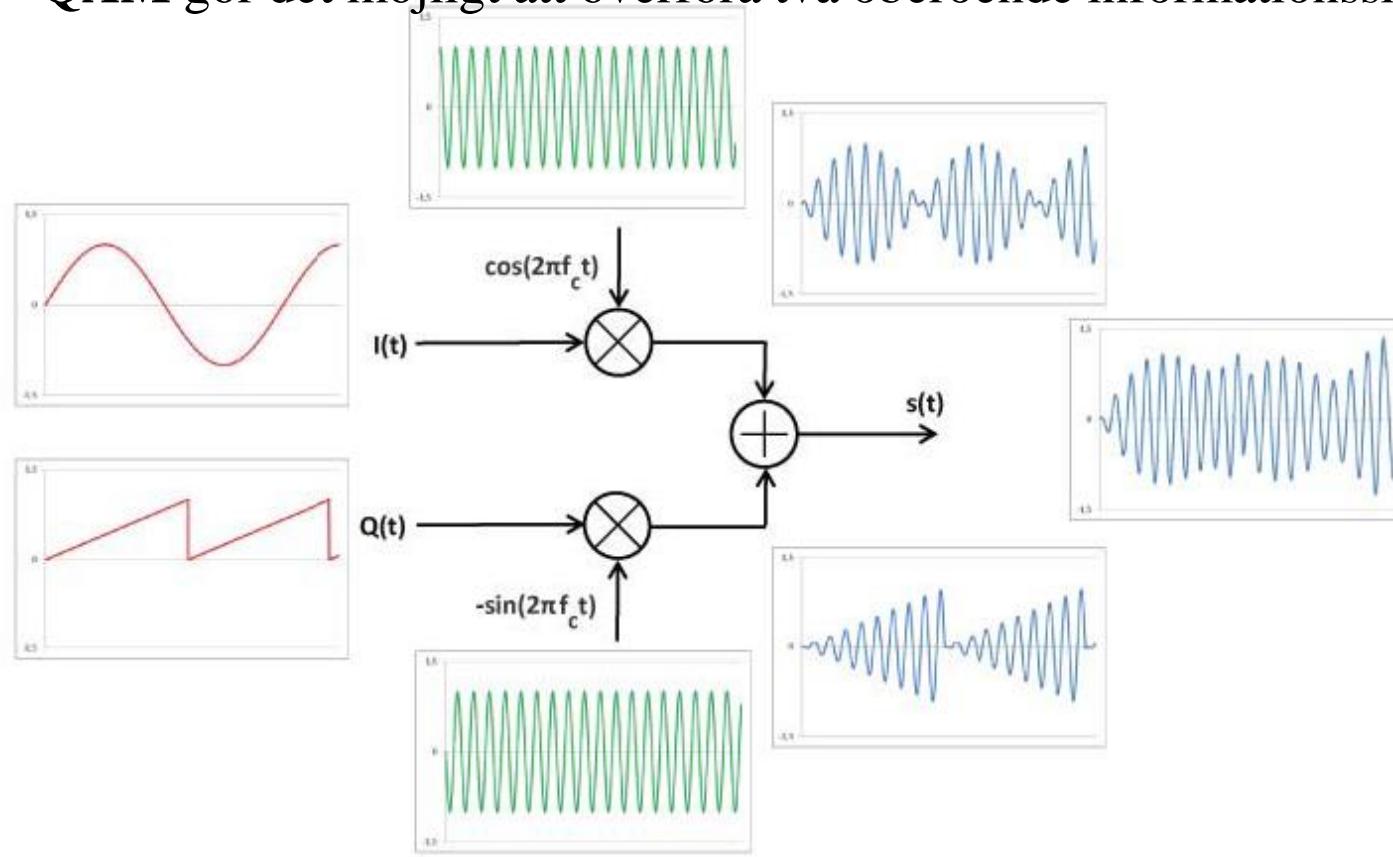
# Frekvensmodulering - laboration

If the information to be transmitted (i.e., the **baseband signal**) is  $x_m(t)$  and the **sinusoidal** carrier is  $x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$ , where  $f_c$  is the carrier's base frequency, and  $A_c$  is the carrier's amplitude, the modulator combines the carrier with the baseband data signal to get the transmitted signal



# Kvadraturamplitudmodulering (QAM)

QAM gör det möjligt att överföra två oberoende informationssignaler samtidigt på en och samma bärväg.



$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

$$\cos(x)$$

$$\cos(x + \pi/2) = -\sin(x)$$

$\cos(x)$  och  $-\sin(x)$  är fasförskjutna  $\pi/2$  som betyder att de är **ortogonal**

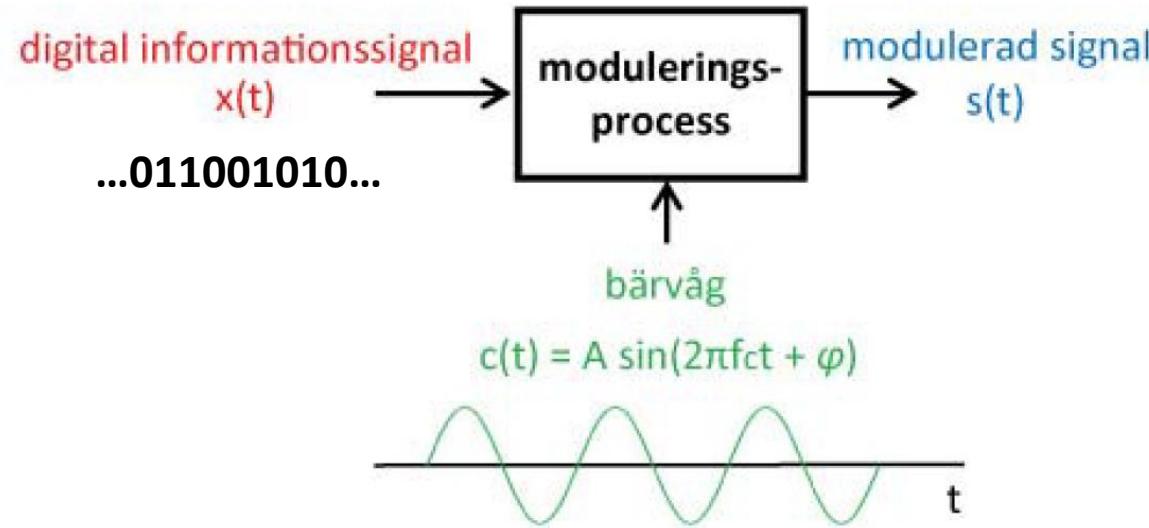
**Demodulering:** Multiplisera  $s(t)$  med  $\cos(2\pi f_c t)$  eller med  $-\sin(2\pi f_c t)$ . Filtrera bort dubbla frekvenser.

$$\begin{aligned} I(t): s(t) \cos(2\pi f_c t) &= [I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t)] \cos(2\pi f_c t) \\ &= 0,5I(t) + 0,5I(t) \cos(4\pi f_c t) - 0,5Q(t) \sin(4\pi f_c t) \end{aligned}$$

Pss Q(t)

Krav: koherens!!!  
(samma f och fas på sändar- och mottagarsida)

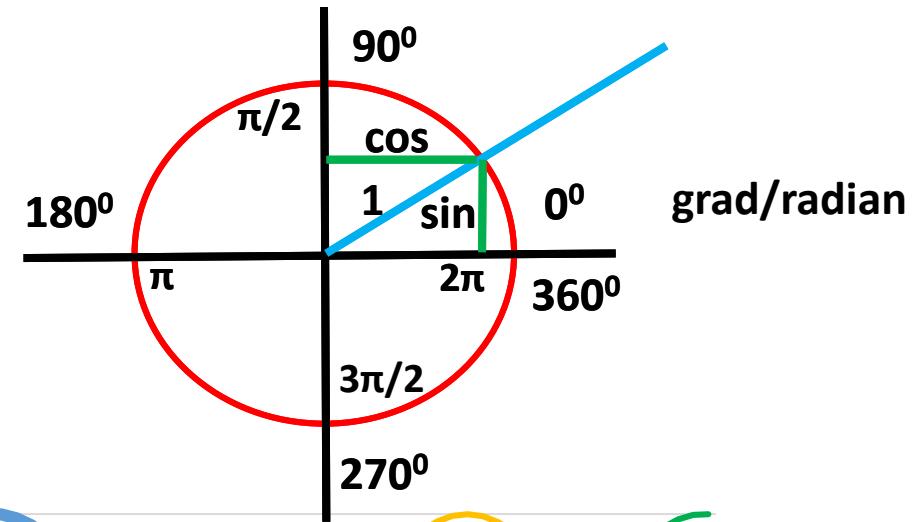
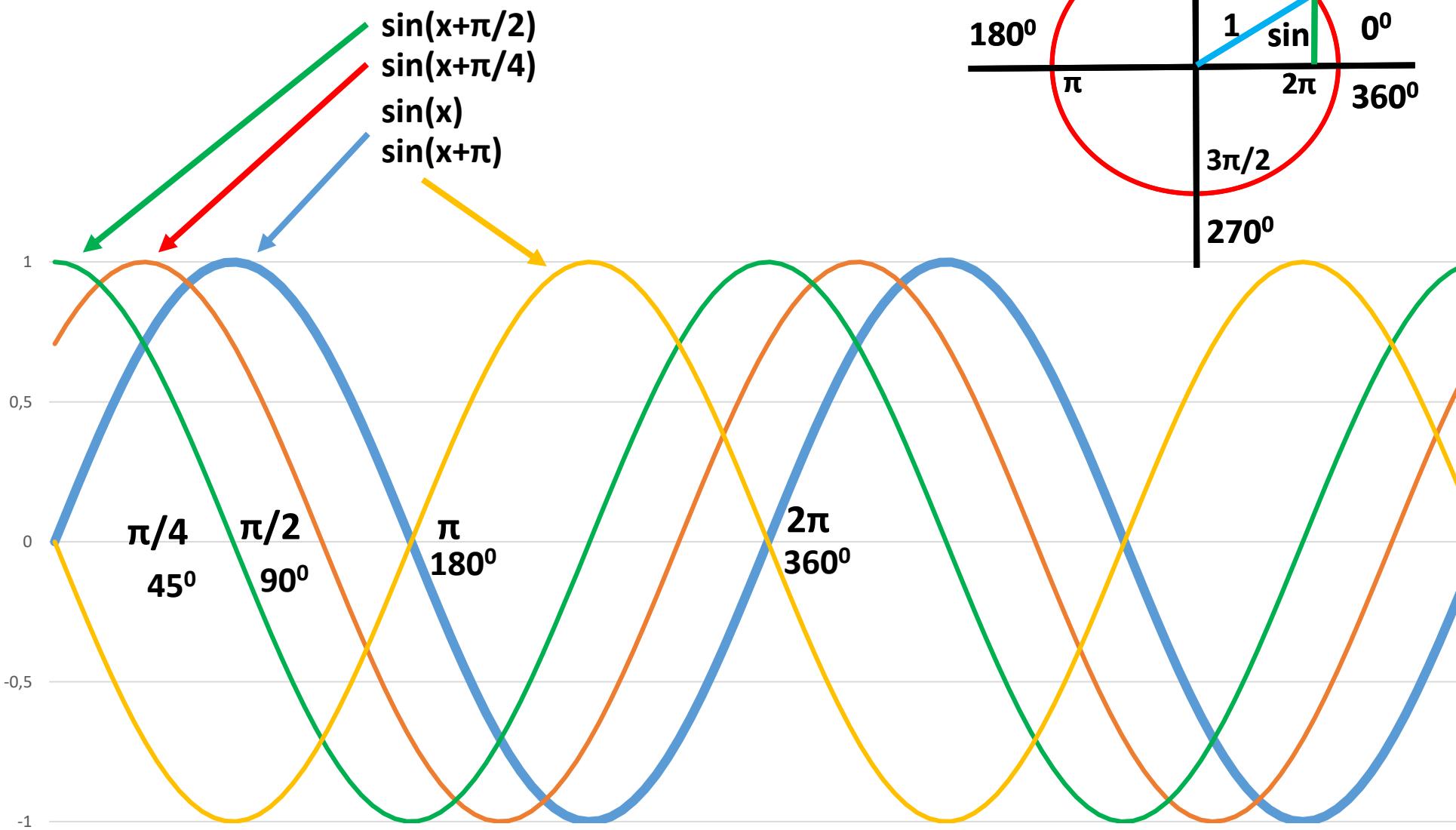
# Digital modulering

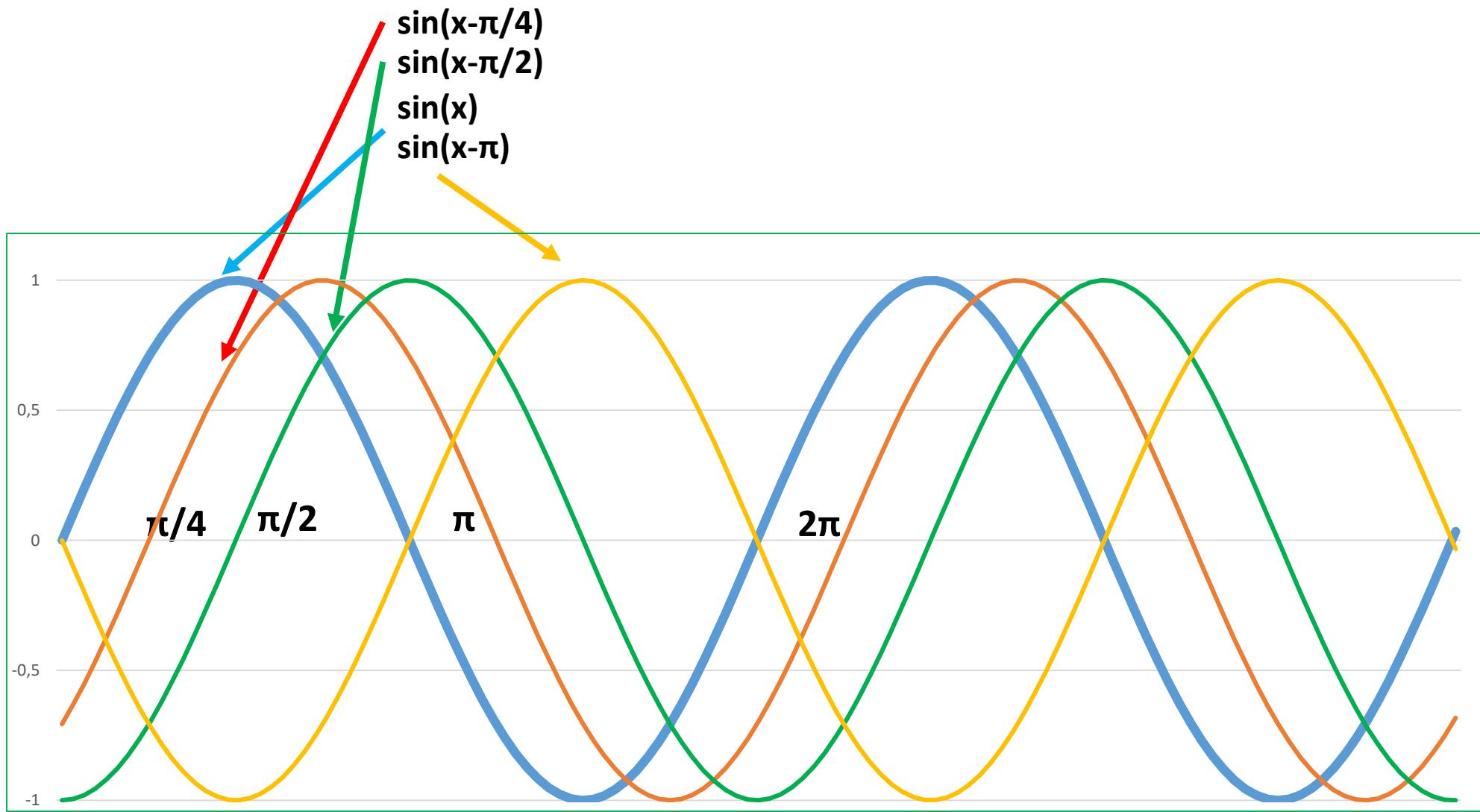


Mer avancerade tekniker för digital kommunikation använder kombinerad **amplitud- och fasmodulering** som tillåter att **flera digitala bitar** överförs samtidigt med en enda **symbol**. Mottagarens uppgift är att bestämma vilken symbol som har överförts.

Digital modulering har flera **fördelar** jämfört med analog modulering: den tillåter **högre överföringshastighet**, är **mindre känslig för störningar** och kräver **mindre bandbredd**.

# Phase shift





## Grundläggande moduleringstyper

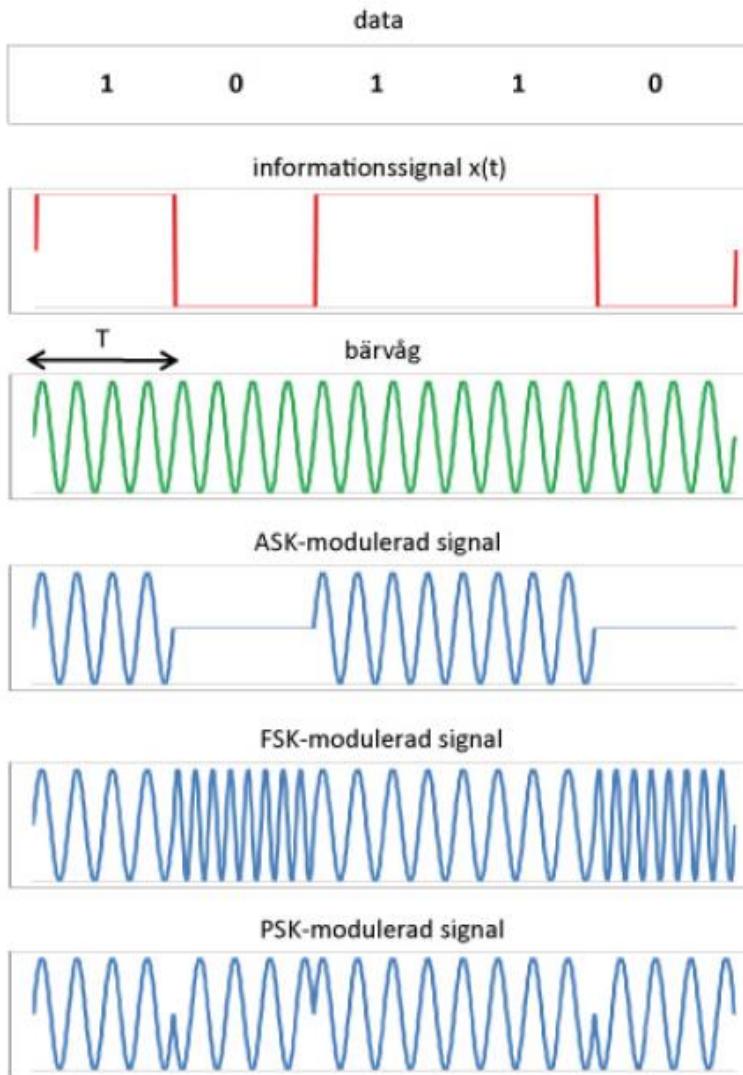
**ASK (amplitude shift keying)**: bärvägens *amplitud* antar diskreta värden i takt med informationssignalen. Den enklaste typen är **BASK** (binary ASK). I denna antar signalens amplitud ett av två värden som representerar binärt '0' eller '1' under tiden  $T$  för sändningen av en bit. I den vanligaste varianten, som används till exempel vid transmission med optisk fiber, är amplituden för ett av värdena lika med 0.

**FSK (frequency shift keying)**: bärvägens *frekvens* antar diskreta värden i takt med informationssignalen. Den enklaste tekniken är **BFSK** (binary FSK) där bärvägen antar två olika frekvenser. BFSK tekniken användes i slutet av 1900 talet i modem som anslöt hemdatorer till internet via en vanlig telefonförbindelse.

**PSK (phase shift keying)**: bärvägens *fas* antar diskreta värden i takt med informationssignalen. I **BPSK** (binary PSK) alternerar fasen mellan två olika värden,  $0$  och  $180^\circ$  ( $0$  och  $\pi$  radianer). BPSK används i RFID.

PSK är **populärast** av de tre teknikerna då den är effektivare än FSK med avseende på nödvändig bandbredd och effektivare än både ASK och FSK med avseende på effektbehov. Å andra sidan är ASK och FSK enklare att implementera.

# Grundläggande moduleringstyper



Moduleringstyp	signal	binär representation
BASK	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t)$	1
	$s(t) = 0$	0
BFSK	$s(t) = A \cos(2\pi f_1 t)$	1
	$s(t) = A \cos(2\pi f_2 t)$	0
BPSK	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t)$	1
	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \pi) = -A \cos(2\pi f_c t)$	0

## Symboler

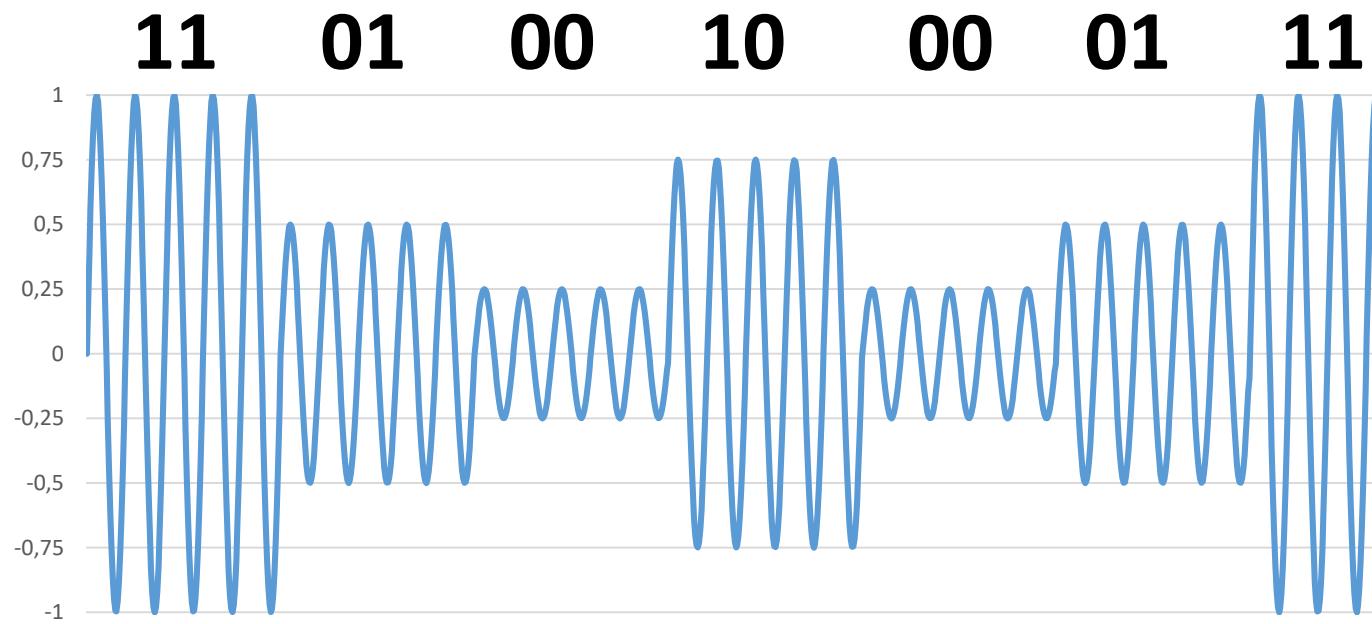
För förståelsen av olika digitala moduleringstekniker är det viktigt att skilja på begreppen **bit** och **symbol**. I exemplen tidigare var symbolen som sändes identisk med en bit. I mer avancerade tekniker sänds symboler som representerar flera bitar.

Om symbolen kan anta fyra värden representerar den två bitar (00, 01, 10 eller 11) och när man sänder den kan man se det som att det sänds två bitar samtidigt. Vid åtta värden representerar varje symbol 3 bitar (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 eller 111) och så vidare. Exempelvis används en viss teknik inom digital TV för att modulera och sända symboler som antar 256 värden och representerar 8 bitar, och i satellitkommunikation förekommer symboler med 1 024 värden, varvid 10 bitar överförs åt gången.

Ett viktigt begrepp vid utvärdering av olika kommunikationstekniker är **överföringshastighet**. Enheten är **bitar per sekund (bit/s eller bps)** eller **antal symboler per sekund (baud)**.

## 4ASK – 4 symboler

Varje symbol = 2 bitar



## Konstellationsdiagram (1)

Ett **centralt hjälpmedel** vid beskrivningen av olika moduleringstekniker är ***konstellationsdiagram*** som är en geometrisk representation av symbolerna och ett sätt att illustrera hur symbolerna moduleras. En allmän matematisk formel som beskriver den modulerade signalen (oberoende av vilken teknik som används) är

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

När en symbol moduleras, säg symbol  $s_i$ , för att skickas under tiden  $0 \leq t < T$ , är amplituden och fasen de informationsbärande delarna. Vi kan då skriva

$$s_i(t) = A_i \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

som kan omvandlas enligt enkla trigonometriska regler till

$$s_i(t) = A_i \cos\phi_i \times \cos(2\pi f_c t) - A_i \sin\phi_i \times \sin(2\pi f_c t)$$

Funktionerna cosinus och sinus är fasförskjutna  $90^\circ$  ( $\pi/2$  radianer) i förhållande till varandra. Denna egenskap, som kallas **ortogonalitet**, medför att funktionerna, som bildar två oberoende signalkomponenter, inte stör varandra och därför enkelt kan separeras i mottagaren.

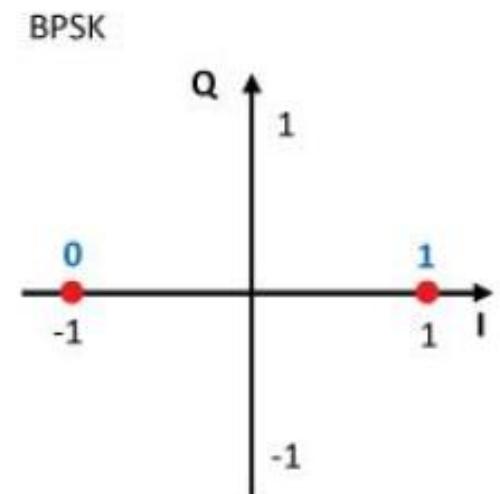
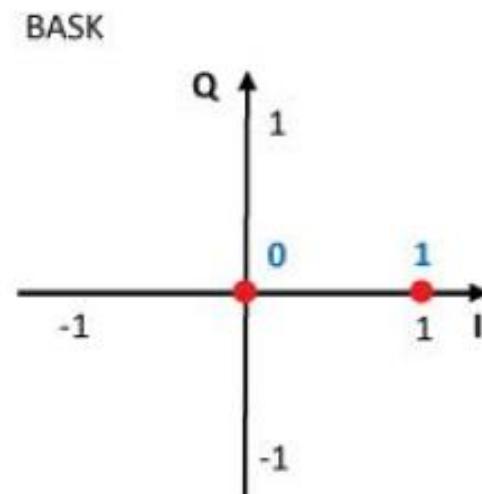
$$\cos(x \pm y) = \cos(x) \cos(y) \mp \sin(x) \sin(y)$$

## Konstellationsdiagram (2)

Konstellationsdiagrammet har två axlar. Den ena, I (inphase), svarar mot signalens cosinusamplitud, och den andra, Q (quadrature phase), svarar mot dess sinusamplitud. Symbolen  $S_i$  har i diagrammet koordinater  $I = A_i \cos\phi_i$  respektive  $Q = A_i \sin\phi_i$ .

Moduleringsotyp	signal	binär representation
BASK	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t)$	1
	$s(t) = 0$	0
BPSK	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t)$	1
	$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \pi) = -A \cos(2\pi f_c t)$	0

Konstellationsdiagram för BASK och BPSK



# BASK simuler

ASK

Cos    Sin

A = 1

f =  Hz

$\theta = 0^\circ$

$c(t) = \cos(2\pi 10t)$

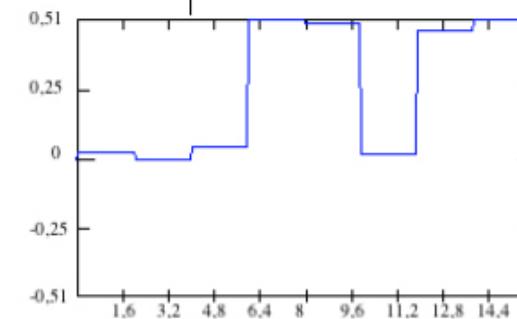
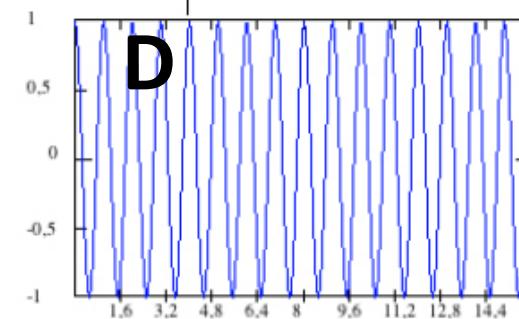
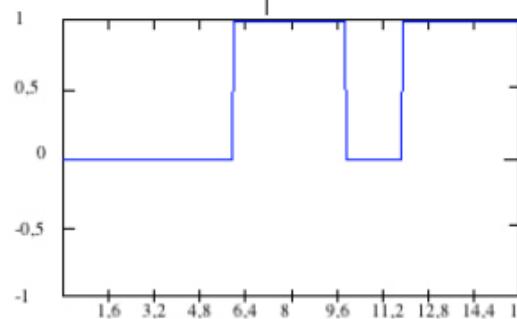
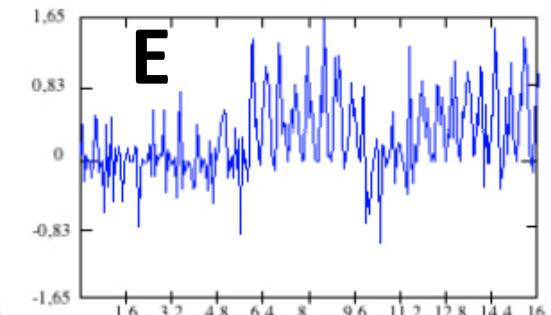
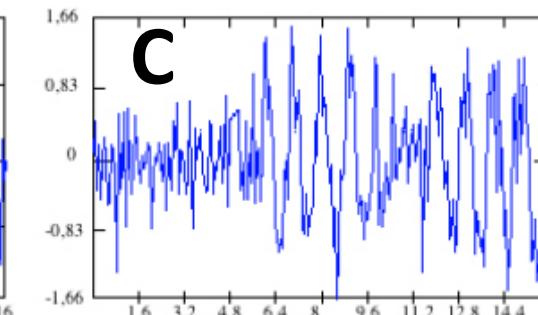
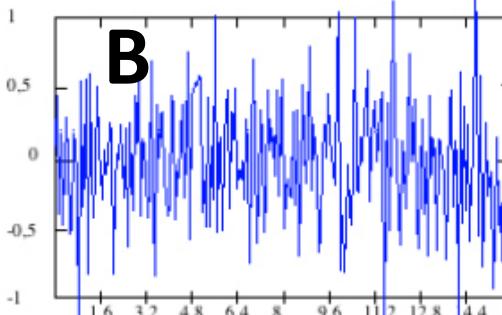
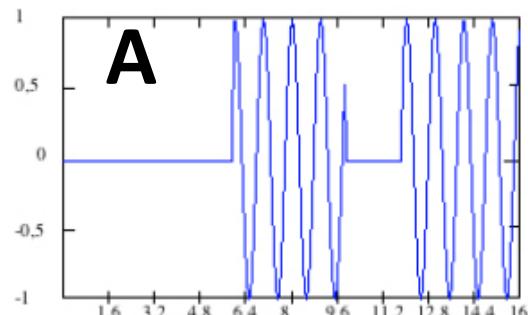
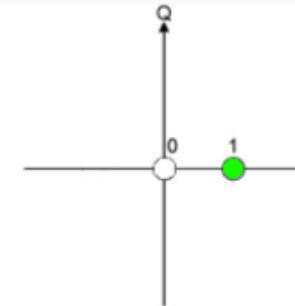
Options

BASK

Data 00011011

SNR = 3

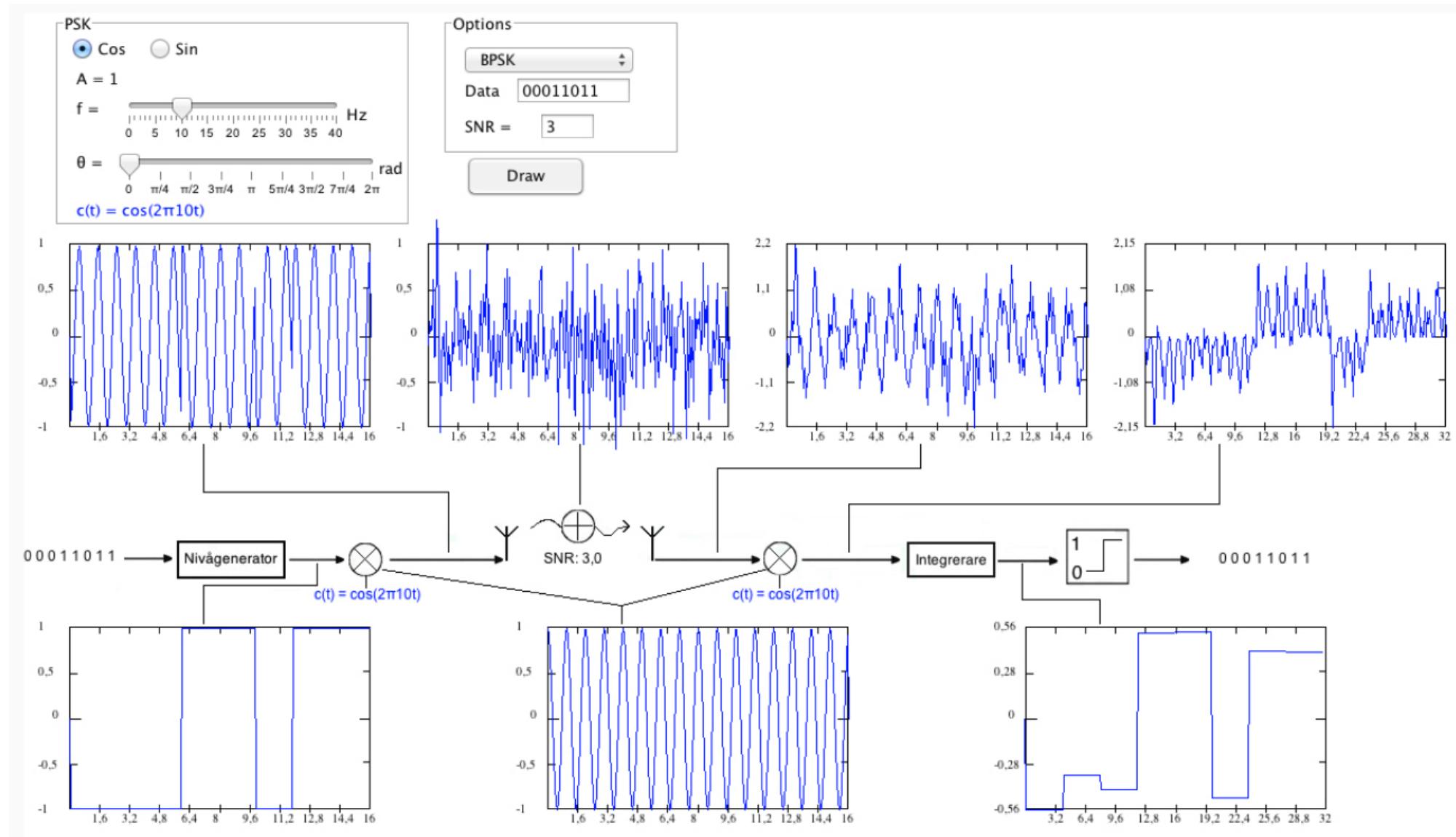
Draw



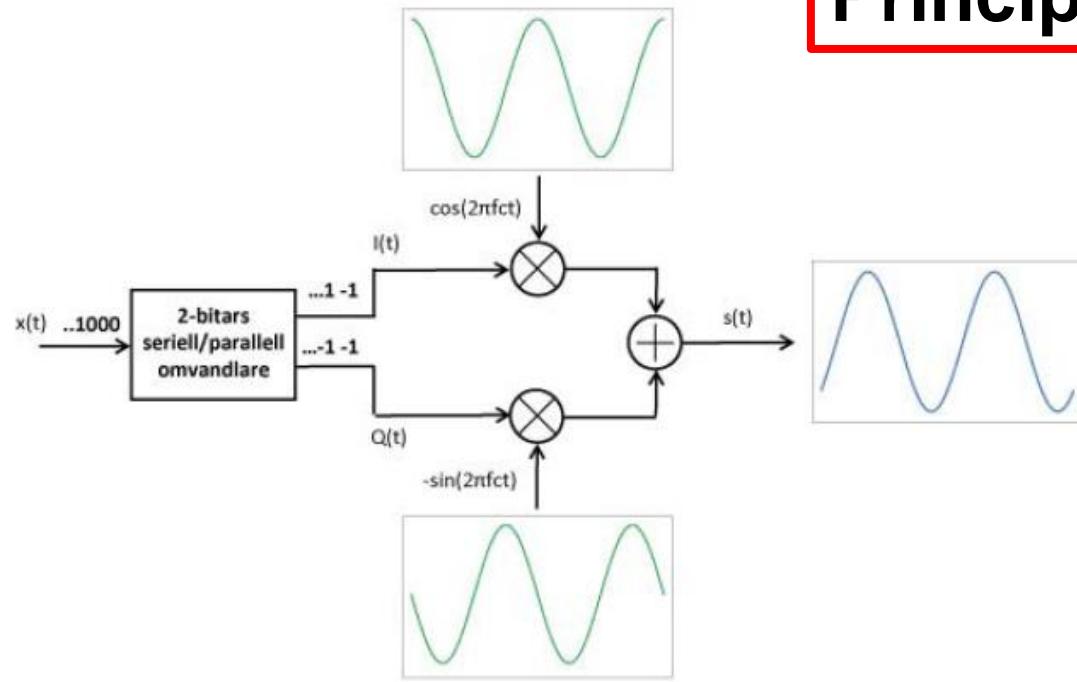
## Blockschemats diagram:

- Längst till vänster i blockschemat syns den binära sekvens som matats in.
- Förstadiagrammet nere från vänster representerar den binära datan i form av pulser, 0 i diagrammet motsvarar en binär 0:a och 1 motsvarar en binär 1:a.
- **D** Andra diagrammet nere från vänster visar den inställda bärvägen.
- **A** Första diagrammet uppe från vänster illustrerar resultatet av produkten mellan den binära datan och bärvägen, dvs. den signal som sänds.
- **B** Andra diagrammet uppe från höger visar signalen av det brus som ställts in med hjälp av SNR.
- **C** Tredje diagrammet uppe från vänster visar den mottagna signalen, vilken är den sända signalen adderat med angivet brus.
- **E** Fjärde diagrammet uppe från vänster illustrerar den mottagna signalen multiplicerat med bärvägen.
- Tredje diagrammet nere från vänster illustrerar nivåerna av fjärde diagrammet uppe från vänster, som satts genom integrering.
- Längst till höger syns den återbildade binära sekvensen.

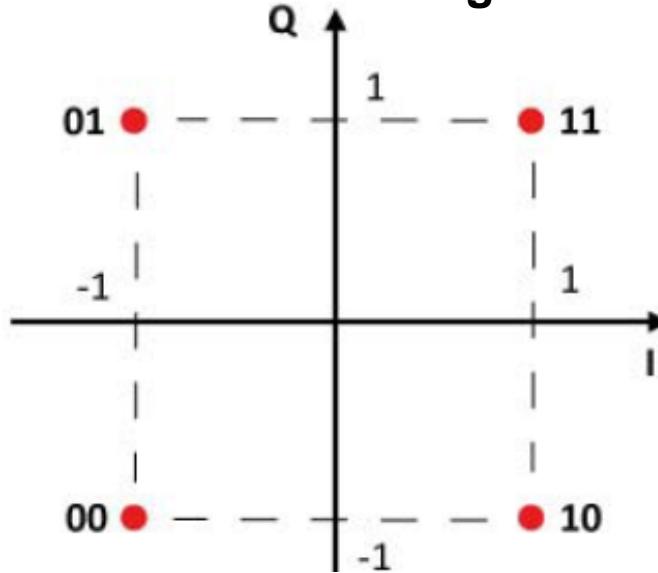
# BPSK simulerings



# Principen för QPSK modulering



Konstellationsdiagram



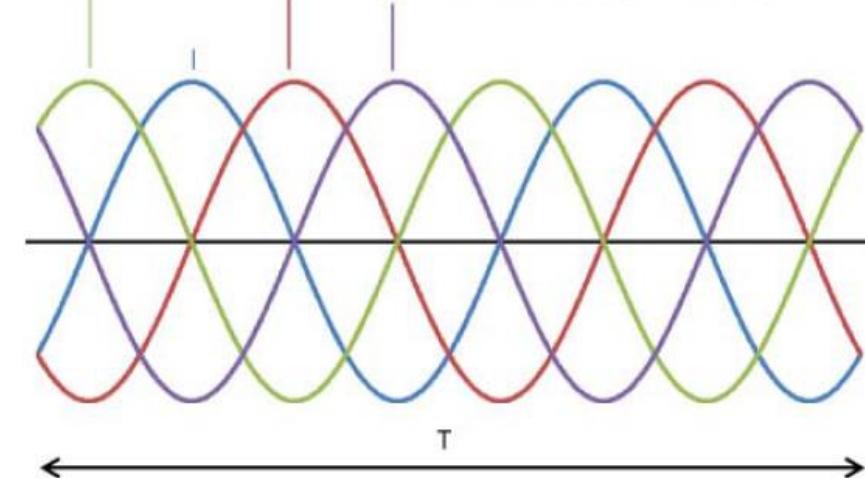
Fyra symboler som svarar mot de binära värdena 11, 01, 00 och 10, för vilka fasen kan anta fyra värden:  $\pi/4$ ,  $3\pi/4$ ,  $5\pi/4$  och  $7\pi/4$ .

En QPSKkodad signal överför dubbelt så många bitar som BPSKkodad signal men upptar samma bandbredd.

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

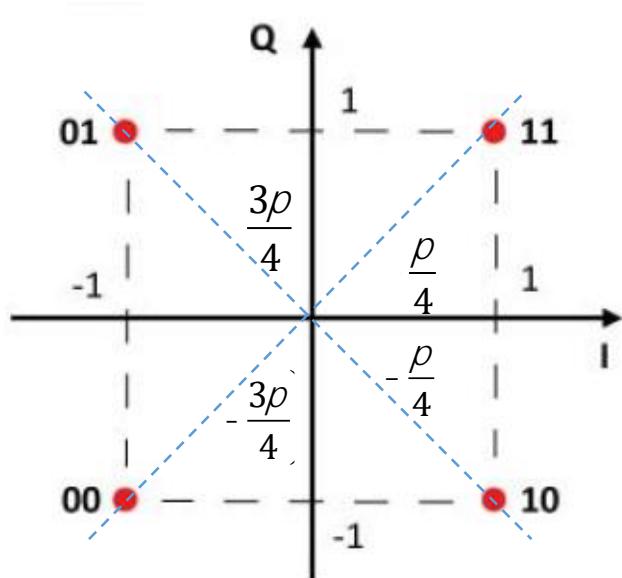
**I(t) och Q(t) = +1 eller -1**

10:  $s(t) = A(\cos(2\pi f_c t) + \sin(2\pi f_c t))$   
00:  $s(t) = A(-\cos(2\pi f_c t) + \sin(2\pi f_c t))$   
01:  $s(t) = A(-\cos(2\pi f_c t) - \sin(2\pi f_c t))$   
11:  $s(t) = A(\cos(2\pi f_c t) - \sin(2\pi f_c t))$



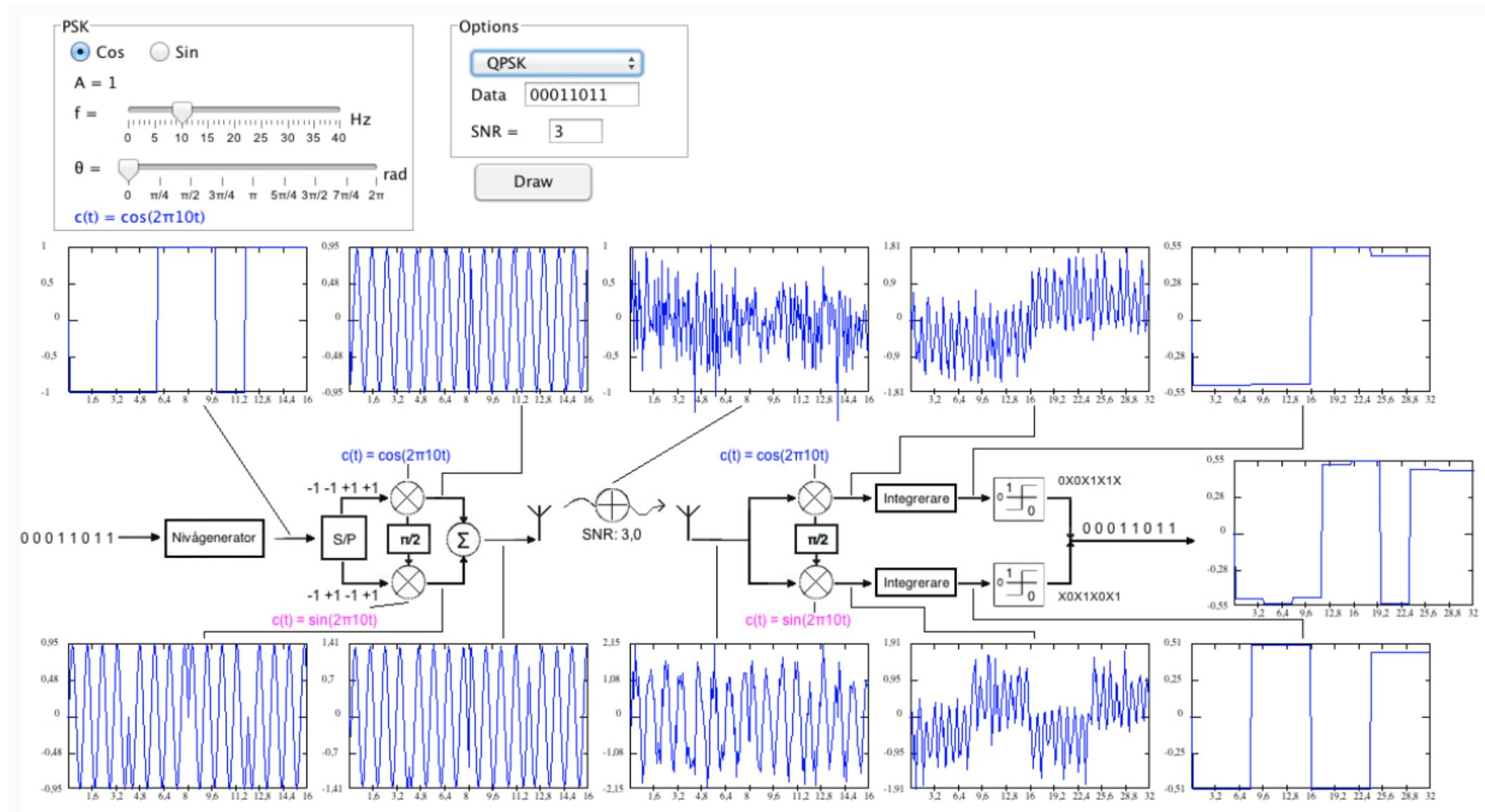
# Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK)

- Four-level PSK (QPSK)
  - Each element represents two bits

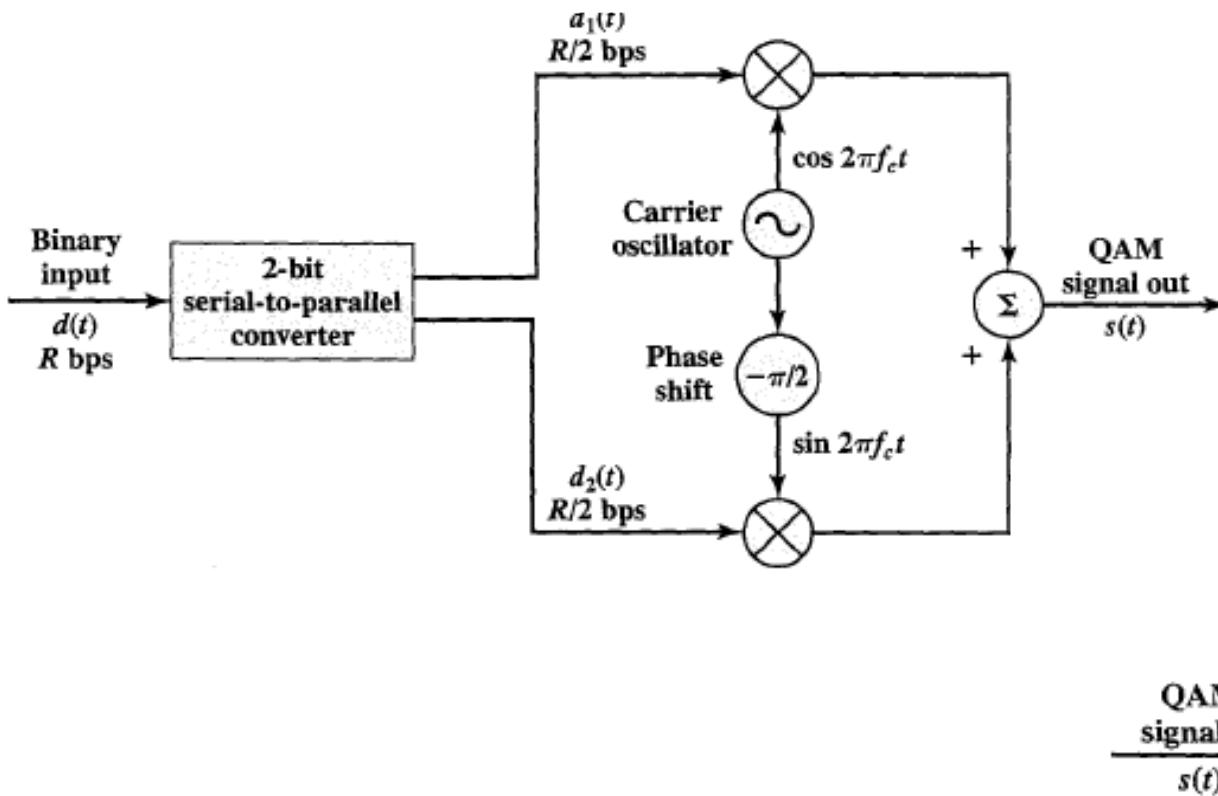


$$s(t) = \begin{cases} \text{?} & \text{11} \\ \text{?} & \text{01} \\ \text{?} & \text{00} \\ \text{?} & \text{10} \end{cases}$$
$$\begin{aligned} & A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right) \\ & A \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right) \\ & A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}\right) \\ & A \cos\left(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}$$

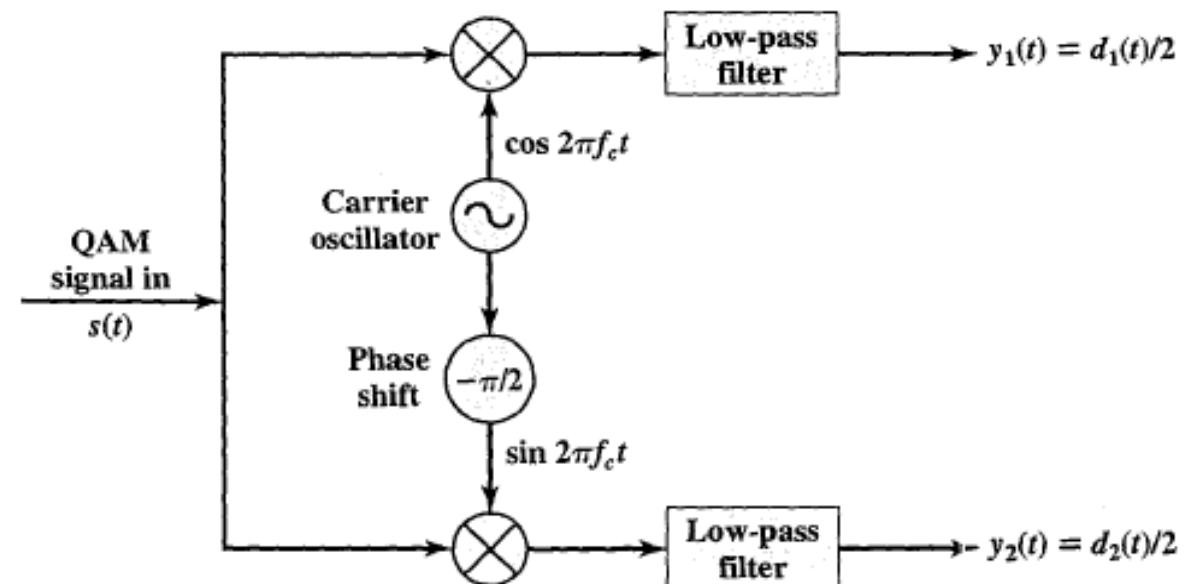
# QPSK simulerings



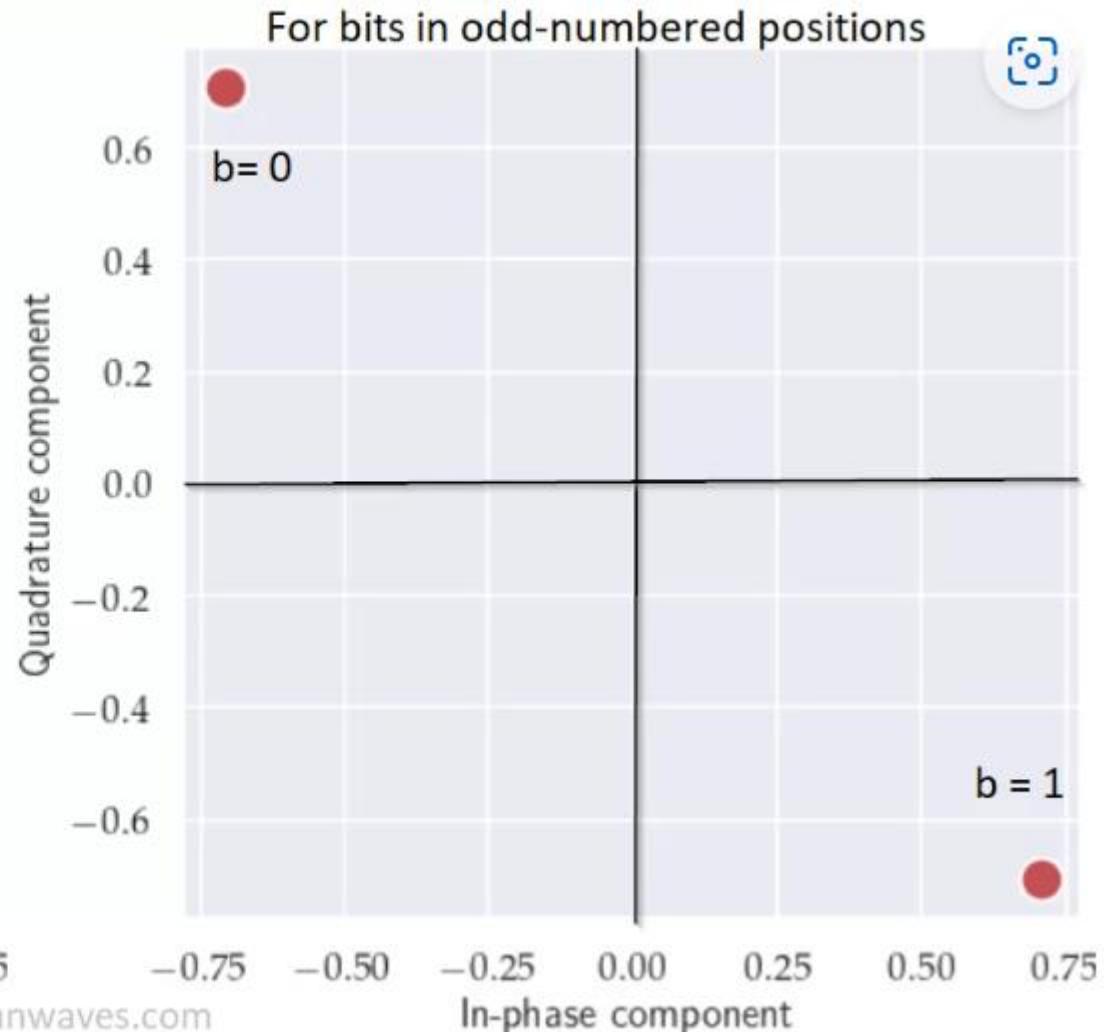
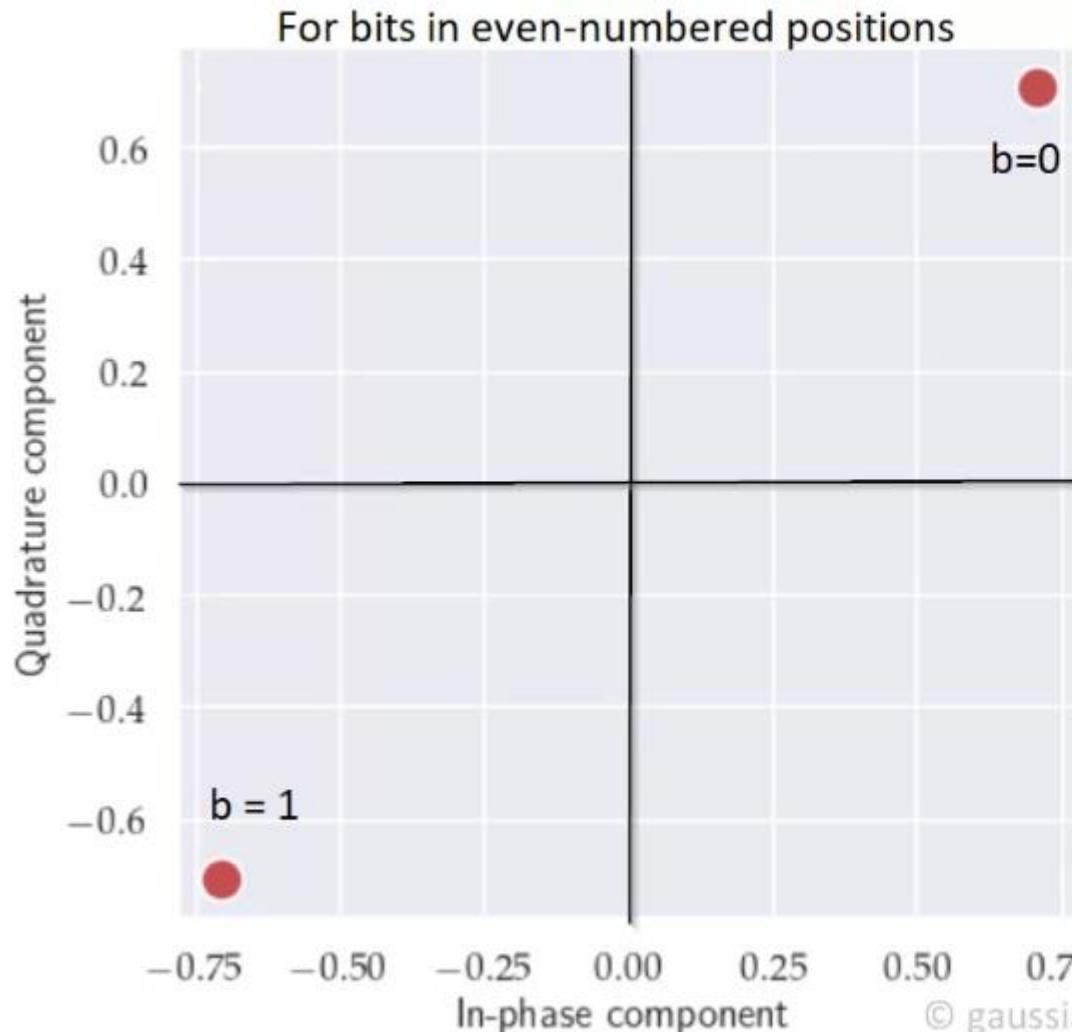
## QAM Modulator



## QAM Demodulator



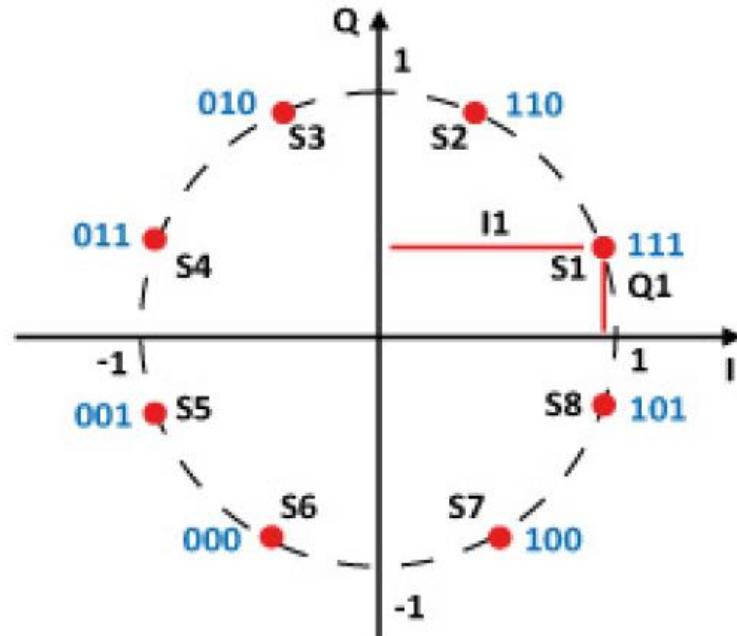
# Constellation sets for $\pi/2$ BPSK



## 8PSK

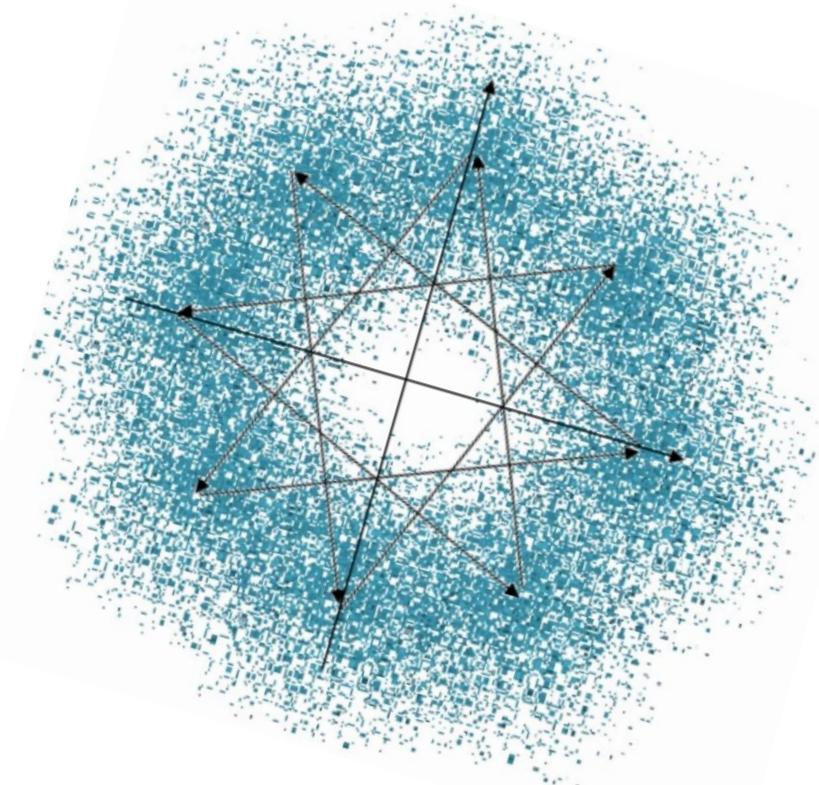
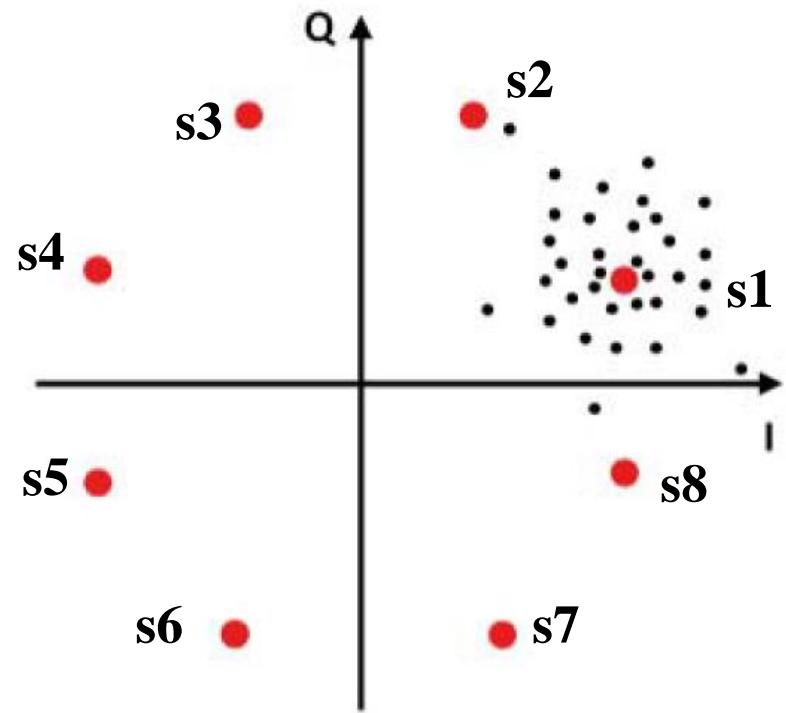
En PSKversion med 8 symboler kallas **8PSK** och används i bland annat satellit TV. Varje symbol motsvarar 3 bitar. I konstellationsdiagrammet är symbolerna placerade symmetriskt i en cirkel. Eftersom alla symboler har samma avstånd från origo har den modulerade signalen alltid samma amplitud, oberoende av vilken symbol som sänds. På samma sätt som vid QPSK är fasen det enda som skiljer symbolerna från varandra.

Konstellationsdiagram för **8PSK**



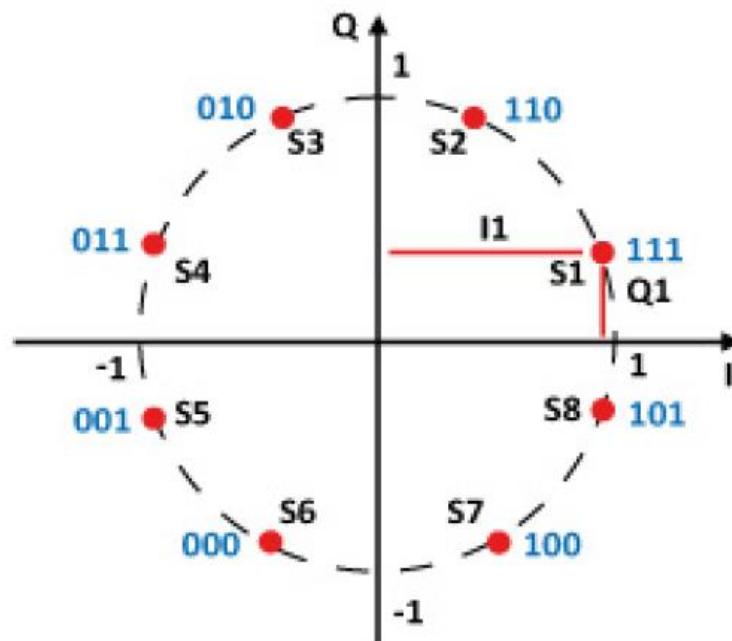
Om man modulerar symbol S1 bestäms den modulerade signalen av I och Q :  
 $s_1(t) = A (I_1 \cos(2\pi f t) - Q_1 \sin(2\pi f t))$ .

Vid den följande demoduleringen multipliceras  $s(t)$  med  $\cos(2\pi f_c t)$  respektive  $-\sin(2\pi f_c t)$ , och efter lågpassfiltrering extraheras I och Q värdena som används för att avgöra vilken symbol som skickades. På grund av störningar vid överföringen tas symbolernas exakta  $I$  och  $Q$  värden inte emot i mottagaren. I stället väljs den symbol som är mest sannolik vid avkodningen. Varje gång som (till exempel) symbolen  $s1$  sänds tas en unik  $I-Q$  kombination emot som kan ses som en koordinatpunkt i konstellationsdiagrammet. Så länge punkten är närmast  $s1$  blir avkodningen korrekt men om punkten är närmare  $s2$  än  $s1$  blir den felaktigt avkodad som  $s2$ .



## Graykodning

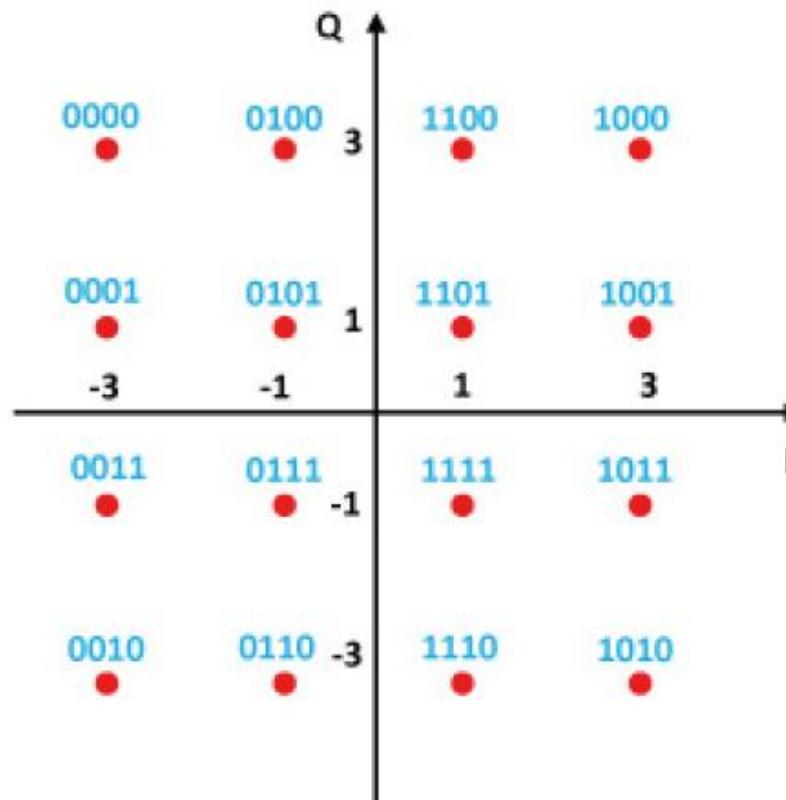
Om punkten hamnar långt från  $s_1$  är sannolikheten större att den är närmare  $s_2$  eller  $s_8$  än till exempel  $s_5$ . Därmed är det mycket mer sannolikt att den felaktigt detekterade symbolen är "granne" på cirkeln till den korrekta symbolen än att det är en symbol som är längre bort. Detta faktum används vid tilldelning av kombinationen av tre bitar till symbolerna. Om  $s_1$  sänds och man på grund av störningarna tar emot  $s_2$  eller  $s_8$ , tolkas symbolen som 110 eller 101 i stället för 111 och felet belastar endast en bit. Om  $s_2$  hade haft värdet 000 och man detekterar detta i stället för  $s$  (111) blir samtliga tre bitar felaktiga.



## 16QAM

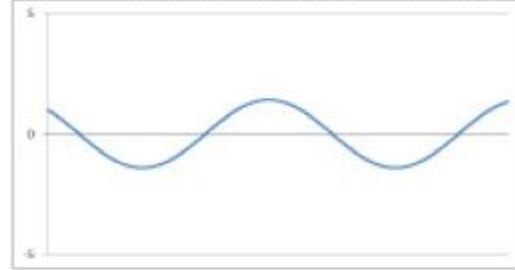
En logisk vidareutveckling av QPSK är QAM (quadrature amplitude modulation) där kravet på konstant amplitud släpps. Tekniken är en **kombination av ASK och PSK** och där både amplituden och fasen ändras vid moduleringen.

Konstellationsdiagram för en QAM version med 16 symboler, 16QAM. Varje symbol representerar 4 bitar.  $I$  och  $Q$  antar värdena 3, 1, -1 och -3. För att minska felaktiga bitar vid en felaktig identifiering av den mottagna symbolen är **Graykodade**, varför närmaste symbolgrannar skiljer sig i endast en position.

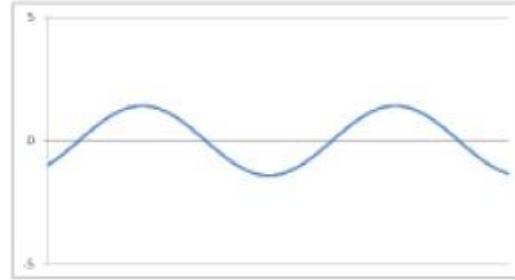


# Modulerade signaler för symboler i 16QAM

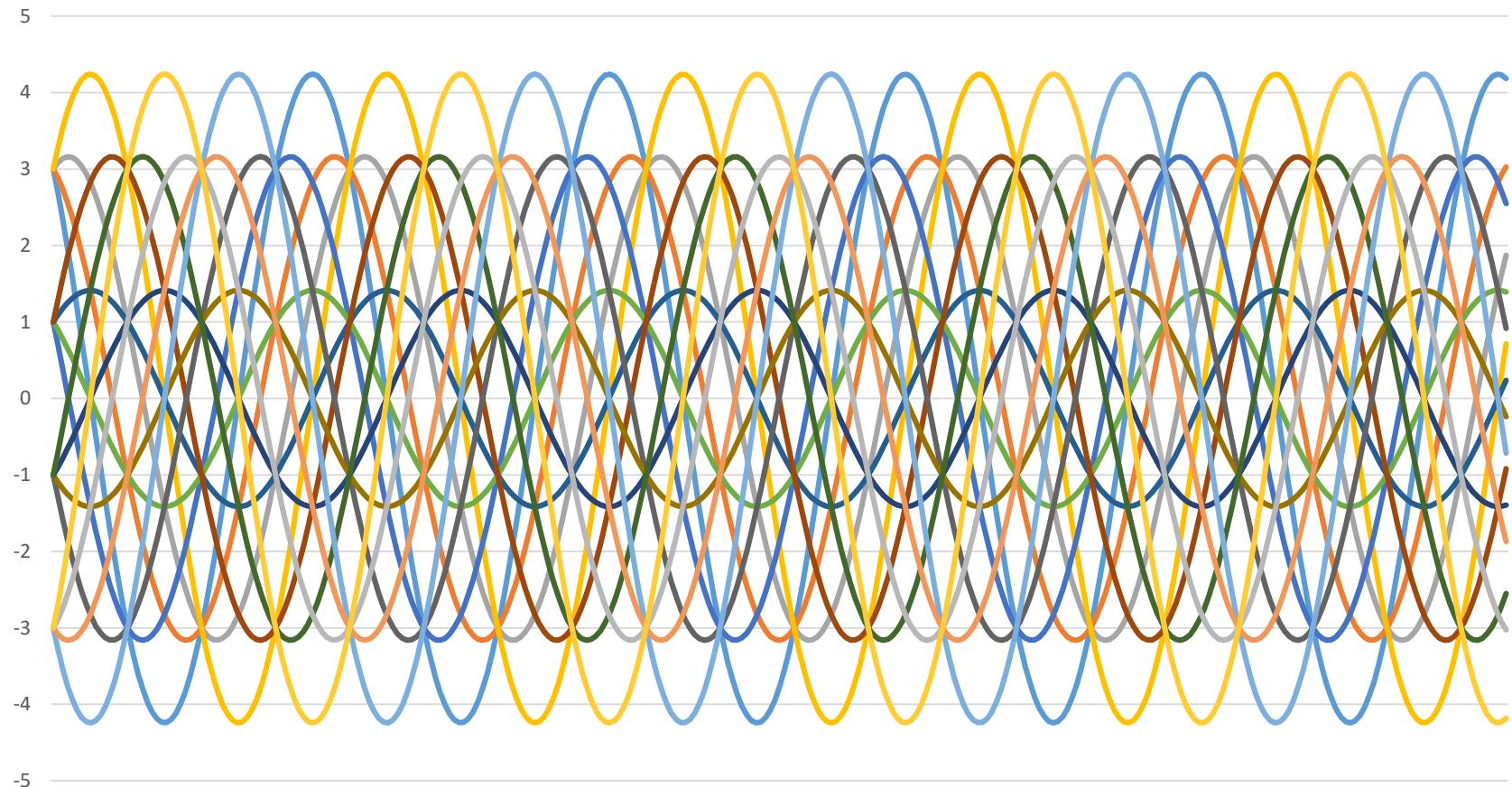
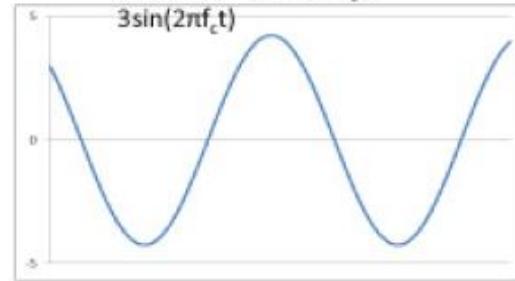
1101:  $s(t) = \cos(2\pi f_c t) - \sin(2\pi f_c t)$



0111:  $s(t) = -\cos(2\pi f_c t) + \sin(2\pi f_c t)$



1000:  $s(t) = 3\cos(2\pi f_c t) - 3\sin(2\pi f_c t)$



# Konstellationsdiagramm enligt standard



5G;  
NR;  
Physical channels and modulation  
(3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16)



## 5.1.2 BPSK

In case of BPSK modulation, bit  $b(i)$  is mapped to complex-valued modulation symbol  $d(i)$  according to

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i)) + j(1 - 2b(i))] \quad \begin{matrix} 0: (1+j) \\ 1: (-1-j) \end{matrix}$$



## 5.1.3 QPSK

In case of QPSK modulation, pairs of bits,  $b(2i), b(2i+1)$ , are mapped to complex-valued modulation symbols  $d(i)$  according to

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(2i)) + j(1 - 2b(2i+1))] \quad \begin{matrix} 00: (1, j) \\ 01: (1, -j) \\ 10: (-1, j) \\ 11: (-1, -j) \end{matrix}$$

## 5.1.4 16QAM

In case of 16QAM modulation, quadruplets of bits,  $b(4i), b(4i+1), b(4i+2), b(4i+3)$ , are mapped to complex-valued modulation symbols  $d(i)$  according to

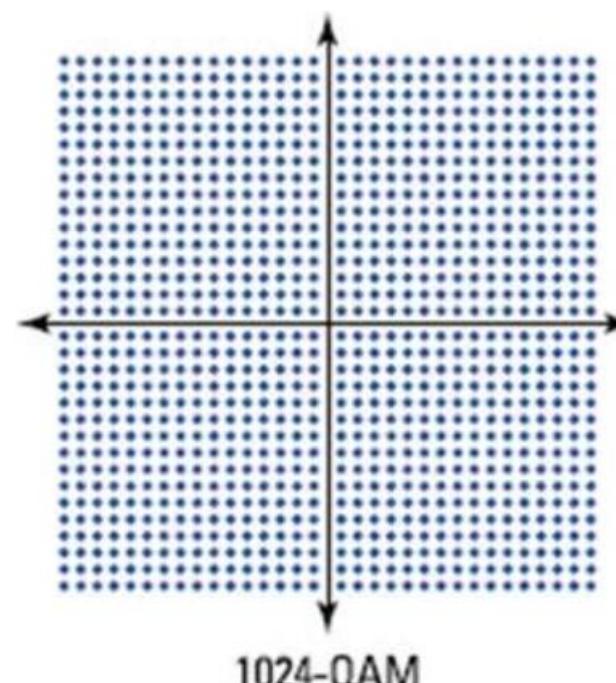
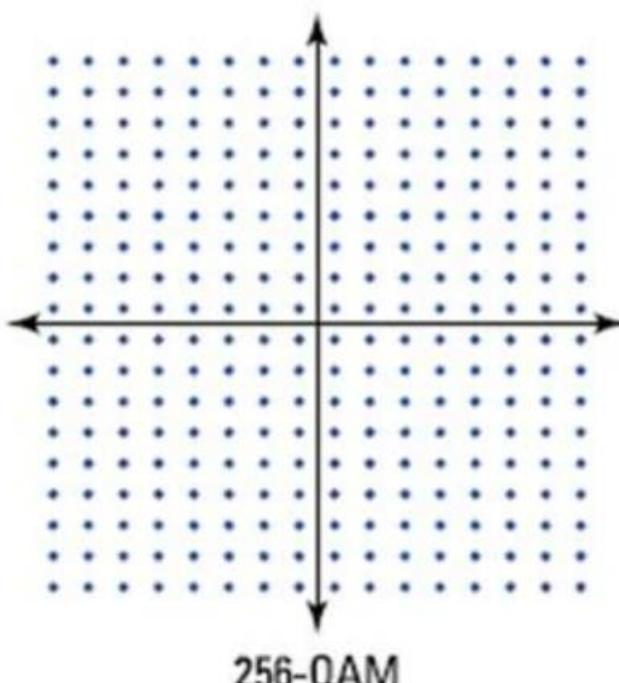
$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{10}} \left\{ (1 - 2b(4i)) [2 - (1 - 2b(4i+2))] + j (1 - 2b(4i+1)) [2 - (1 - 2b(4i+3))] \right\}$$

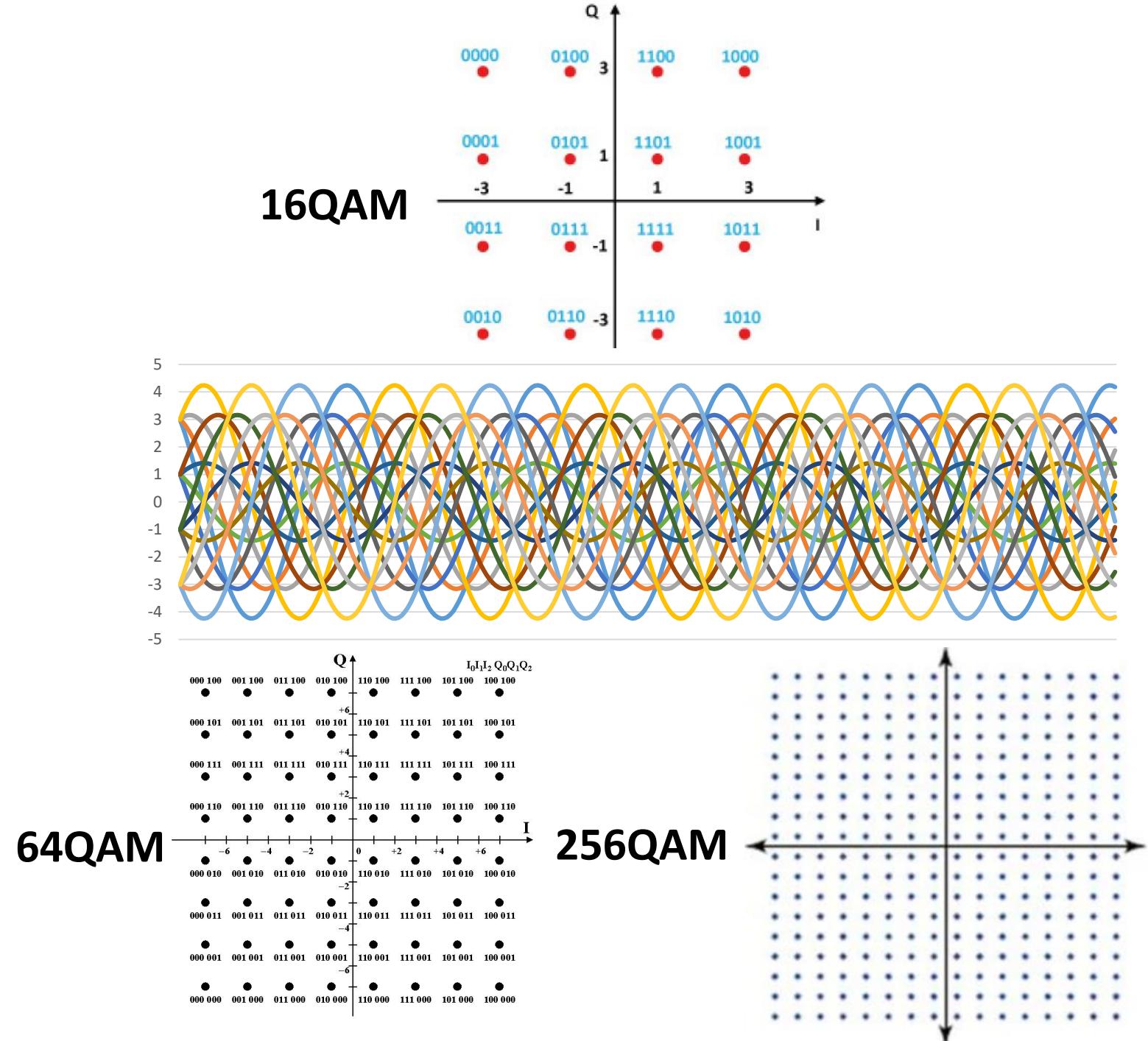
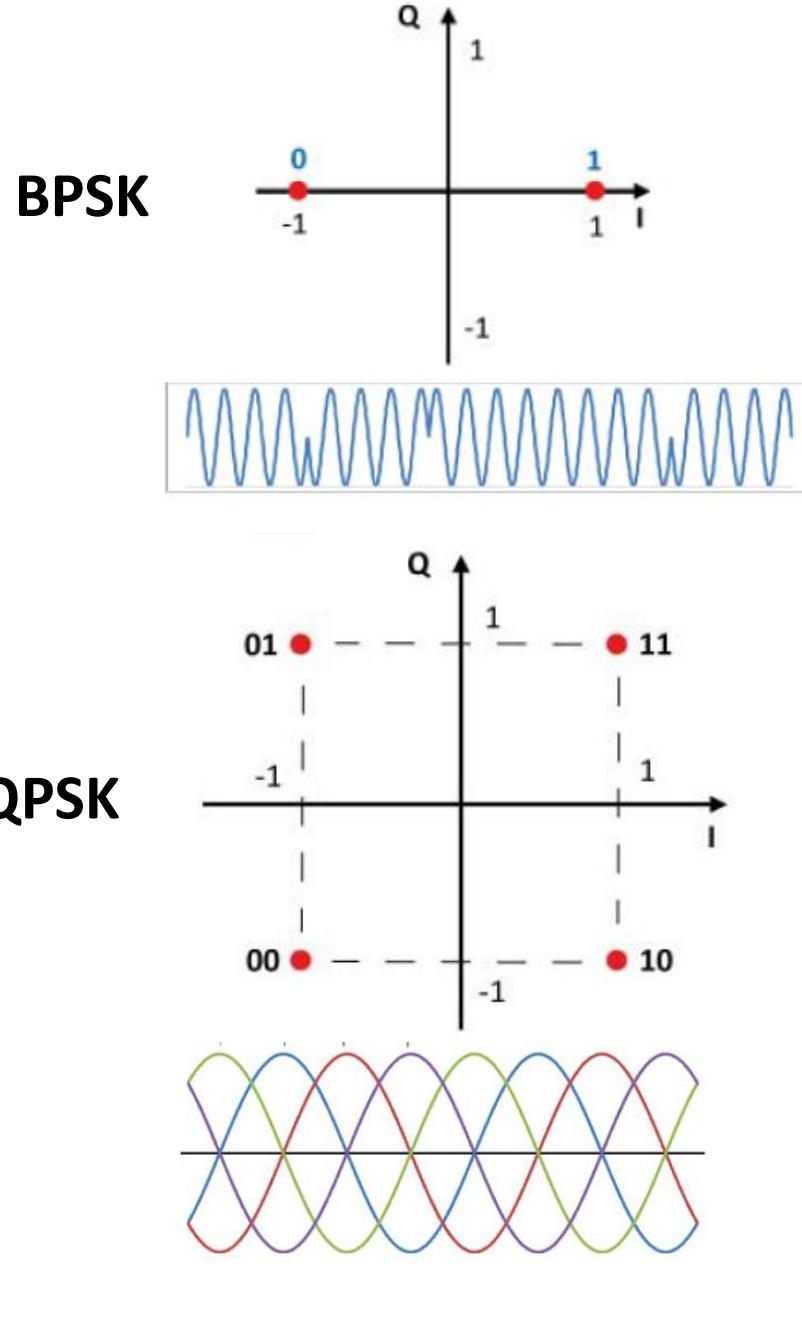
0000: (1, j) 0001: (1, 3j) 0010: (3, j)

## 256QAM - Konstellationsdiagramm

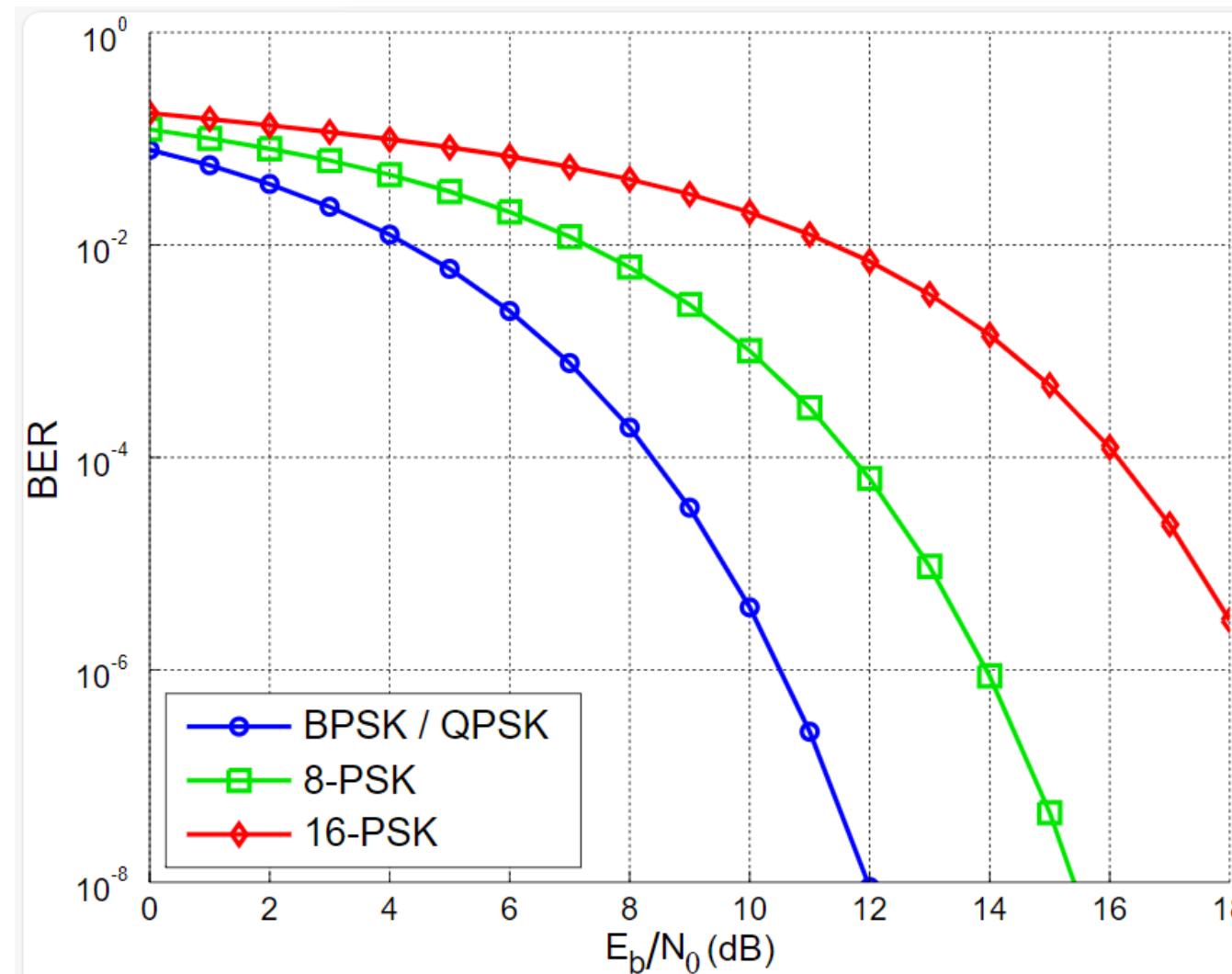
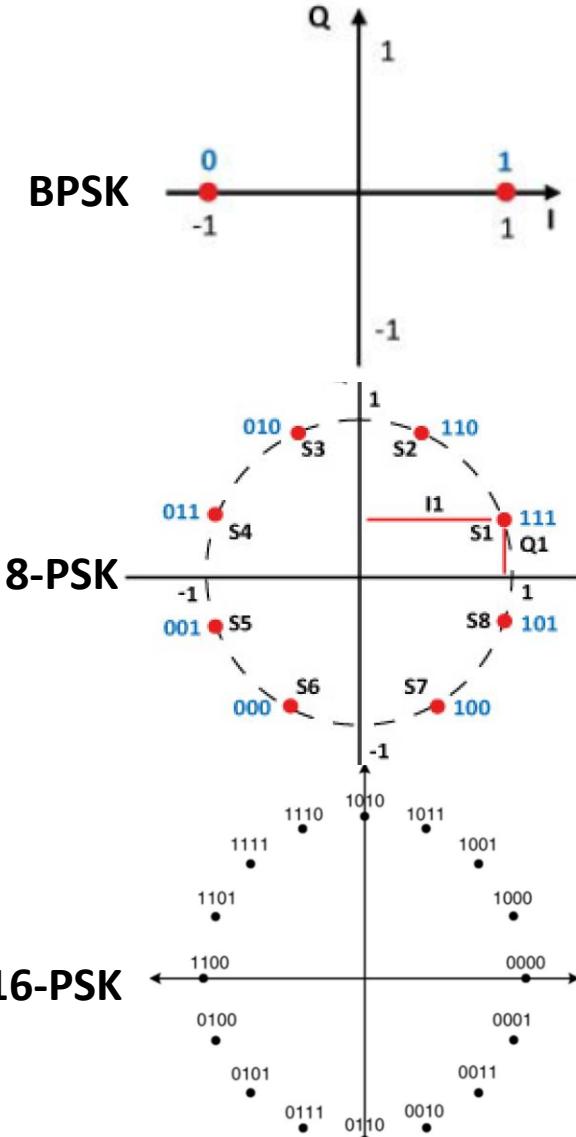
In case of 256QAM modulation, octuplets of bits,  $b(8i), b(8i+1), b(8i+2), b(8i+3), b(8i+4), b(8i+5), b(8i+6), b(8i+7)$ , are mapped to complex-valued modulation symbols  $d(i)$  according to

$$d(i) = \frac{1}{\sqrt{170}} \left\{ \begin{aligned} & \left[ (1-2b(8i)) \left[ 8 - (1-2b(8i+2)) \left[ 4 - (1-2b(8i+4)) \left[ 2 - (1-2b(8i+6)) \right] \right] \right] \\ & + j \left[ (1-2b(8i+1)) \left[ 8 - (1-2b(8i+3)) \left[ 4 - (1-2b(8i+5)) \left[ 2 - (1-2b(8i+7)) \right] \right] \right] \end{aligned} \right\}$$





# Bit error rate (BER) performance of PSK modulation schemes



BER - the number of bit errors divided by the total number of bits transmitted

$E_b/N_0$  - energy per bit to noise power spectral density ratio)