

# Problema: corrente continua (DC) o alternata (AC)?

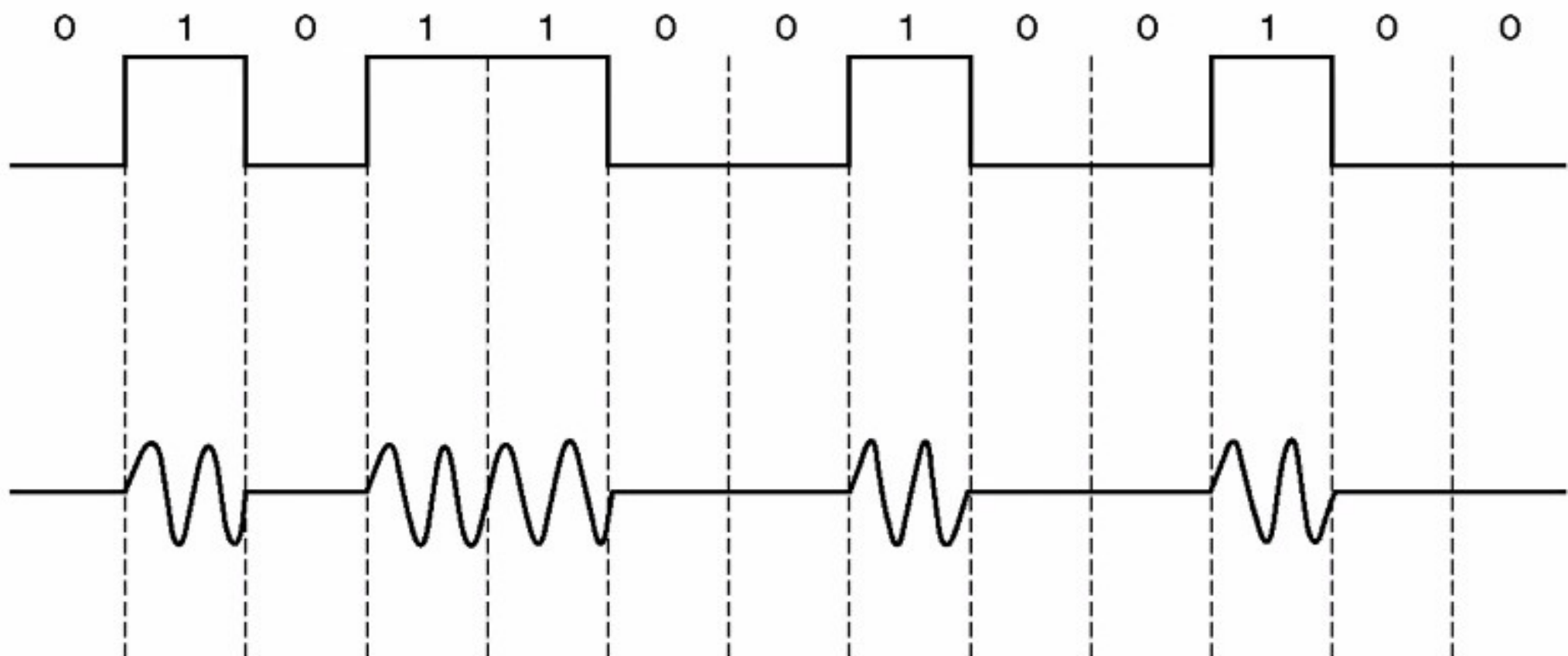
- ◆ Le onde digitali hanno solitamente un ampio spettro di frequenze, e quindi presentano seri problemi di *attenuazione* e *distorsione*
- ◆ → si è scelta la ***corrente alternata (AC)***

# Come si trasmette il segnale digitale?

- ◆ Essenzialmente tre modi di base:
- ◆ Modulando in ***ampiezza***
- ◆ Modulando in ***frequenza***
- ◆ Modulando in ***fase***



# Modulazione in ampiezza

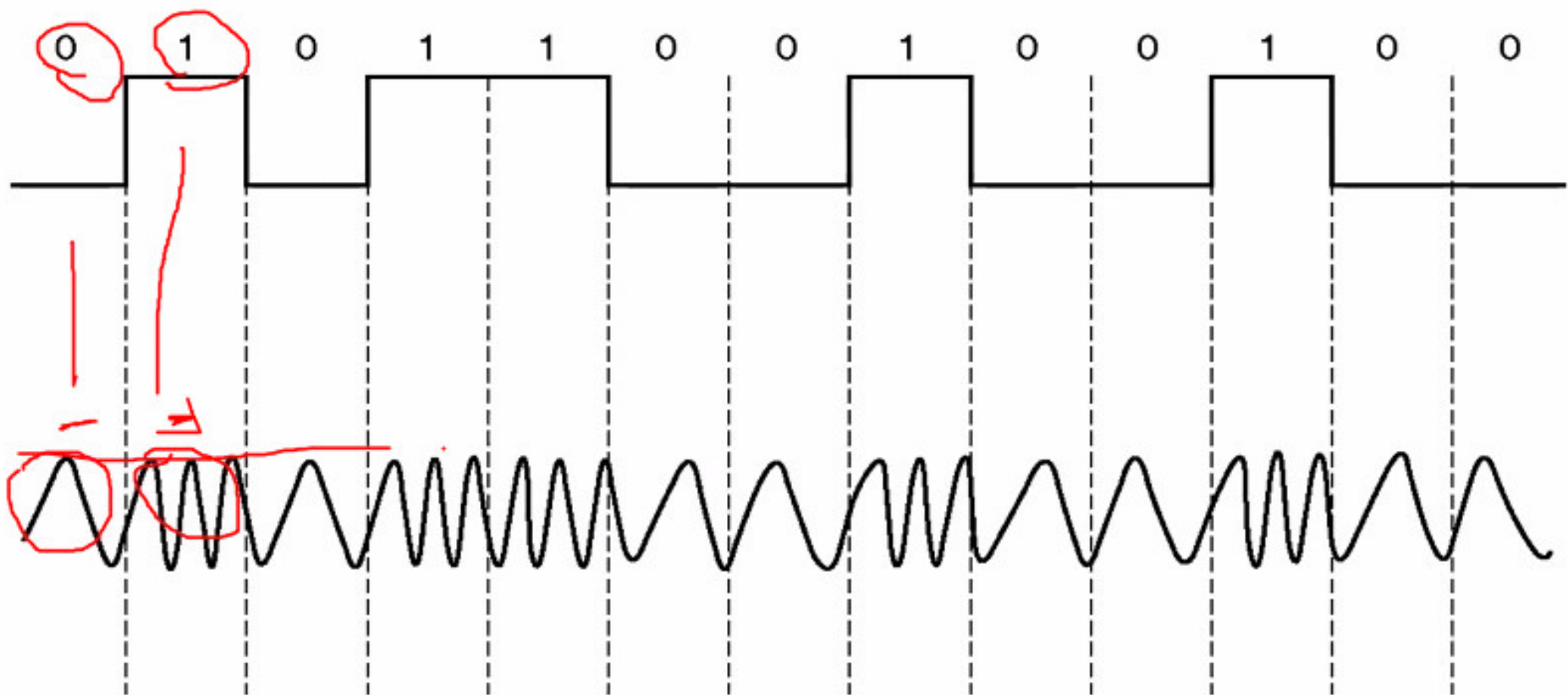




# Modulazione di frequenza



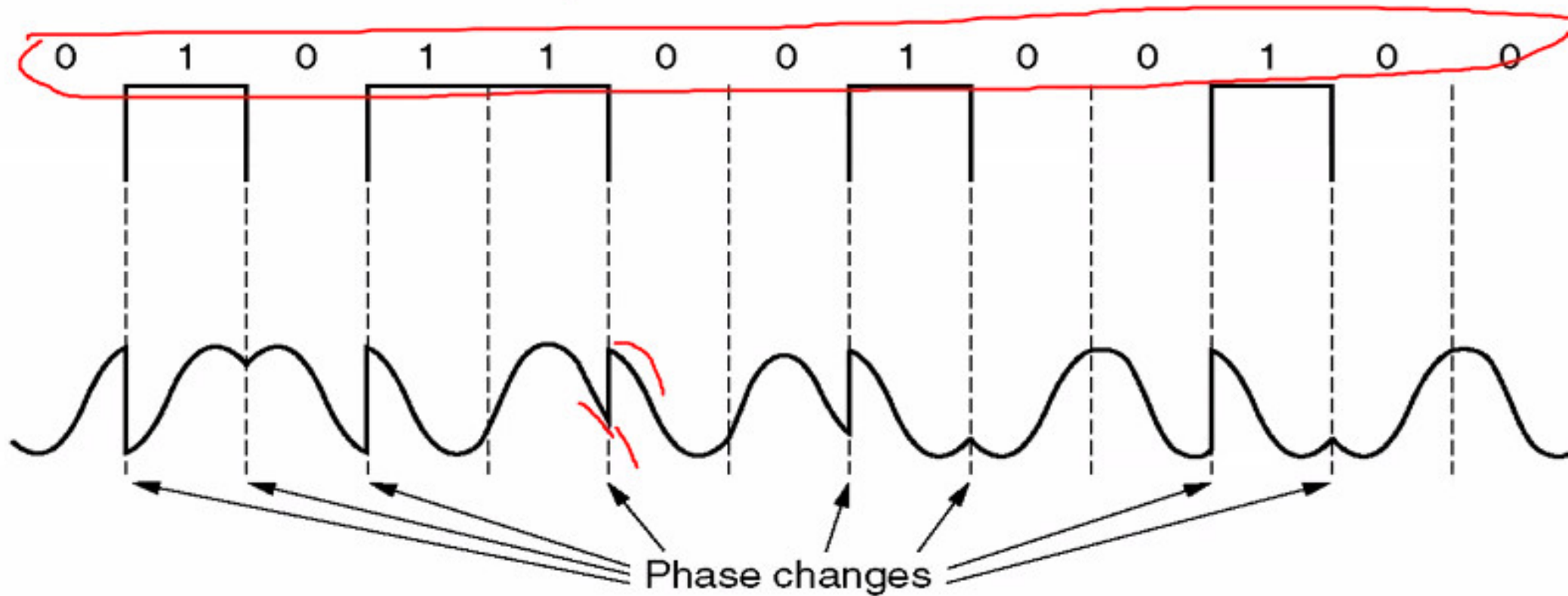
◆ Detta anche *frequency shift keying*



# Modulazione di fase

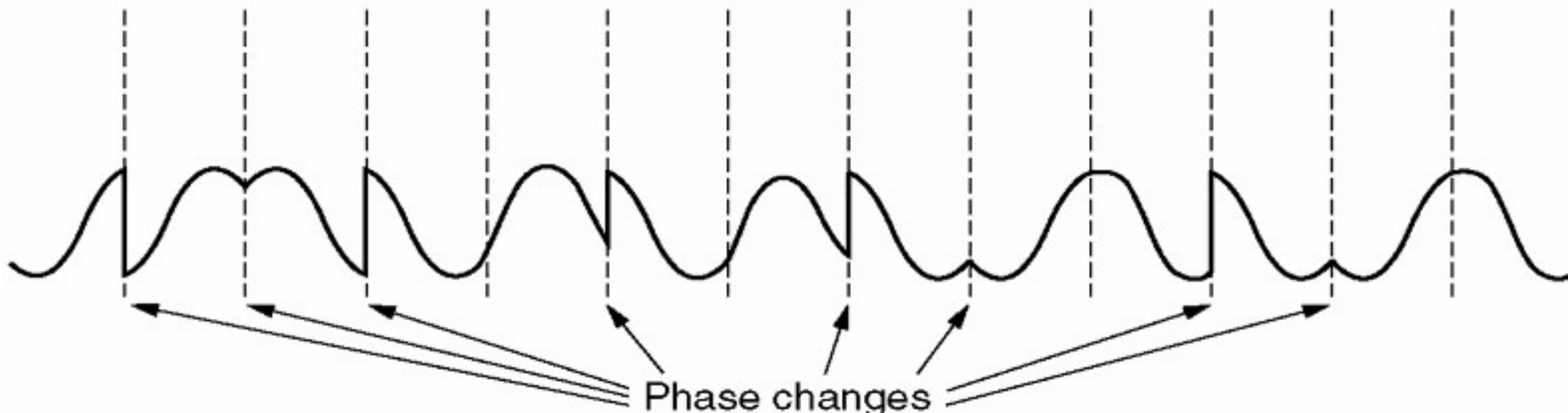


◆ Detta anche *phase shift keying*



# Andiamo oltre: modulazione di fase

- ◆ Possiamo usare vari “sfasamenti” in ogni singolo impulso, in modo da avere un alfabeto di simboli più capiente e quindi, a parità di ***baud***, aumentare il ***bitrate***





# QPSK

- ◆ Quando si usano 4 sfasamenti (tipicamente, i simmetrici  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ )...
- ◆ ... si ha un alfabeto di quattro simboli
- ◆ → il bitrate è doppio rispetto ai baud
- ◆ Questa tecnica si chiama **QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying)

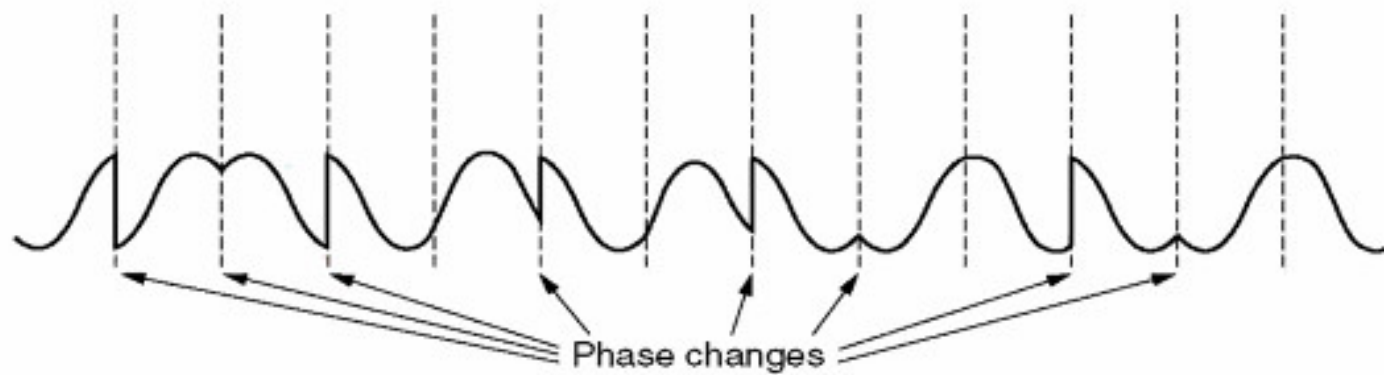
# Spingiamo l'acceleratore?

- ◆ Allora, potremmo ad esempio aumentare il numero di sfasamenti possibili nella modulazione di fase
- ◆ Man mano che aumentiamo, aumentiamo anche il bitrate 😊





# Problema



- ◆ Se cambiassimo solo la fase, avremmo poi che le differenze di fase diventano molto piccole e quindi ***poco distinguibili***, con tutti i rischi che seguono
- ◆ Situazione del tutto simile, se ricordate, ai ***satelliti GEO (!)***



# Un approccio migliore



- ◆ Combinare più tipi di modulazione assieme: “due gusti is meglio che one”
- ◆ Un buon approccio è *tenere la frequenza al massimo* (cosa che semplifica di molto la generazione del segnale e la sincronizzazione), e *mescolare insieme* le modulazioni in *ampiezza* e *fase*

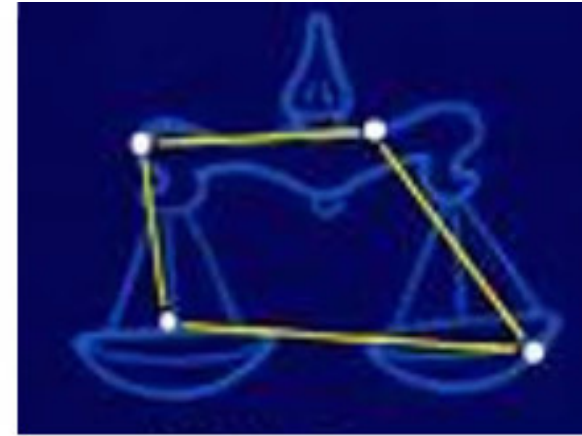
# Ripensando ai satelliti...



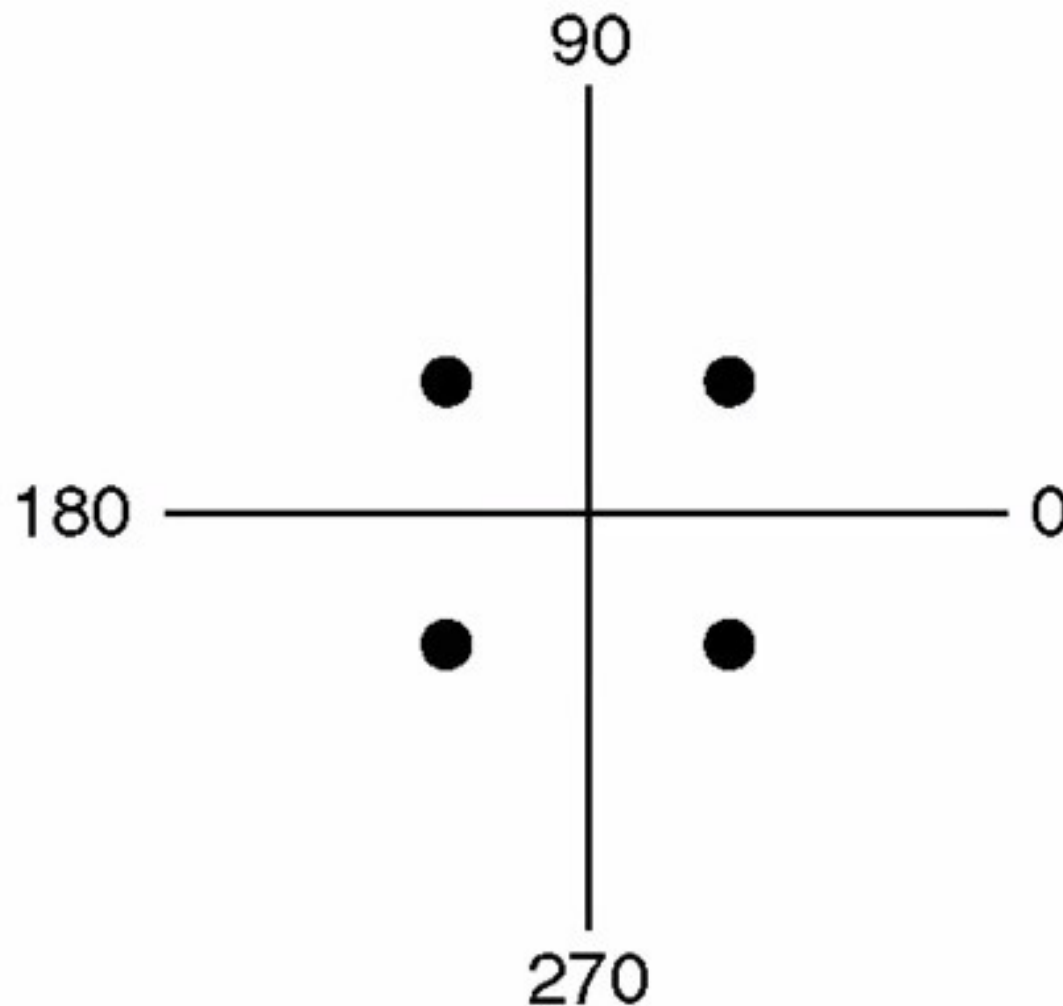
- ◆ Equivale in un certo senso ad avere sia più satelliti nella ***stessa orbita*** (modulazione di fase), però anche spaziandoli in ***altitudine*** (modulazione di ampiezza): in questo modo ci stanno molti più satelliti (→ segnali!)



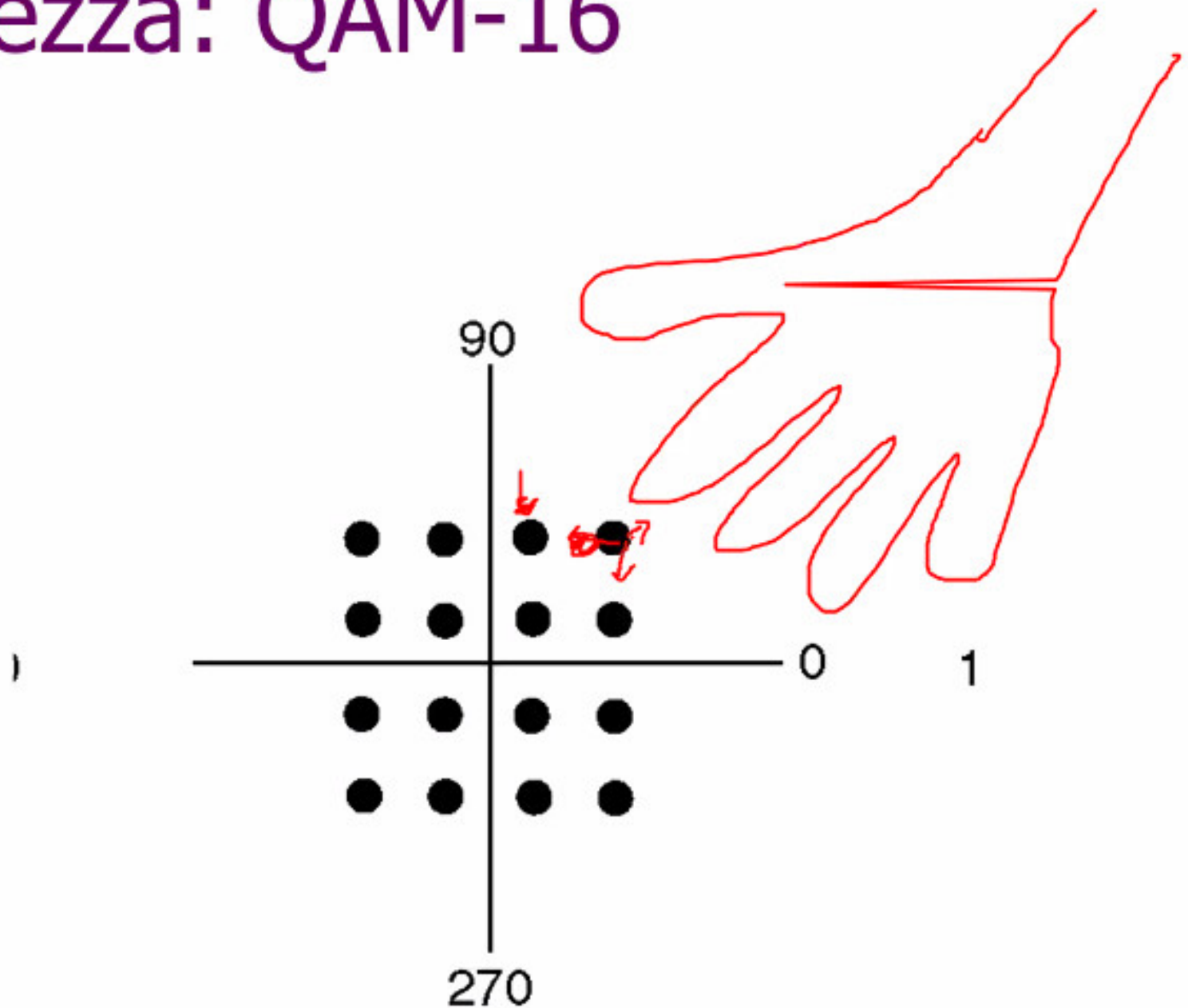
# Constellation diagrams



◆ Diagramma per il QPSK:

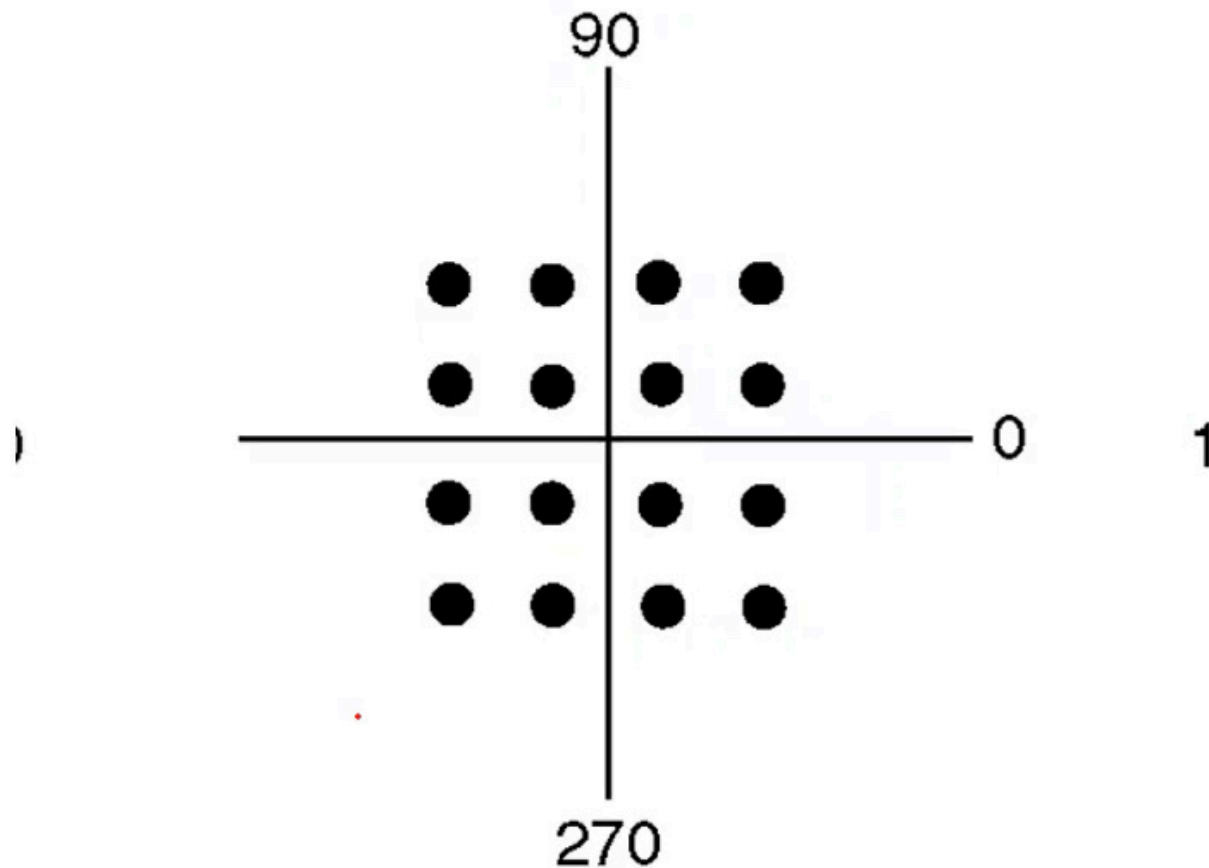


Mescoliamo allora fase ed  
ampiezza: QAM-16



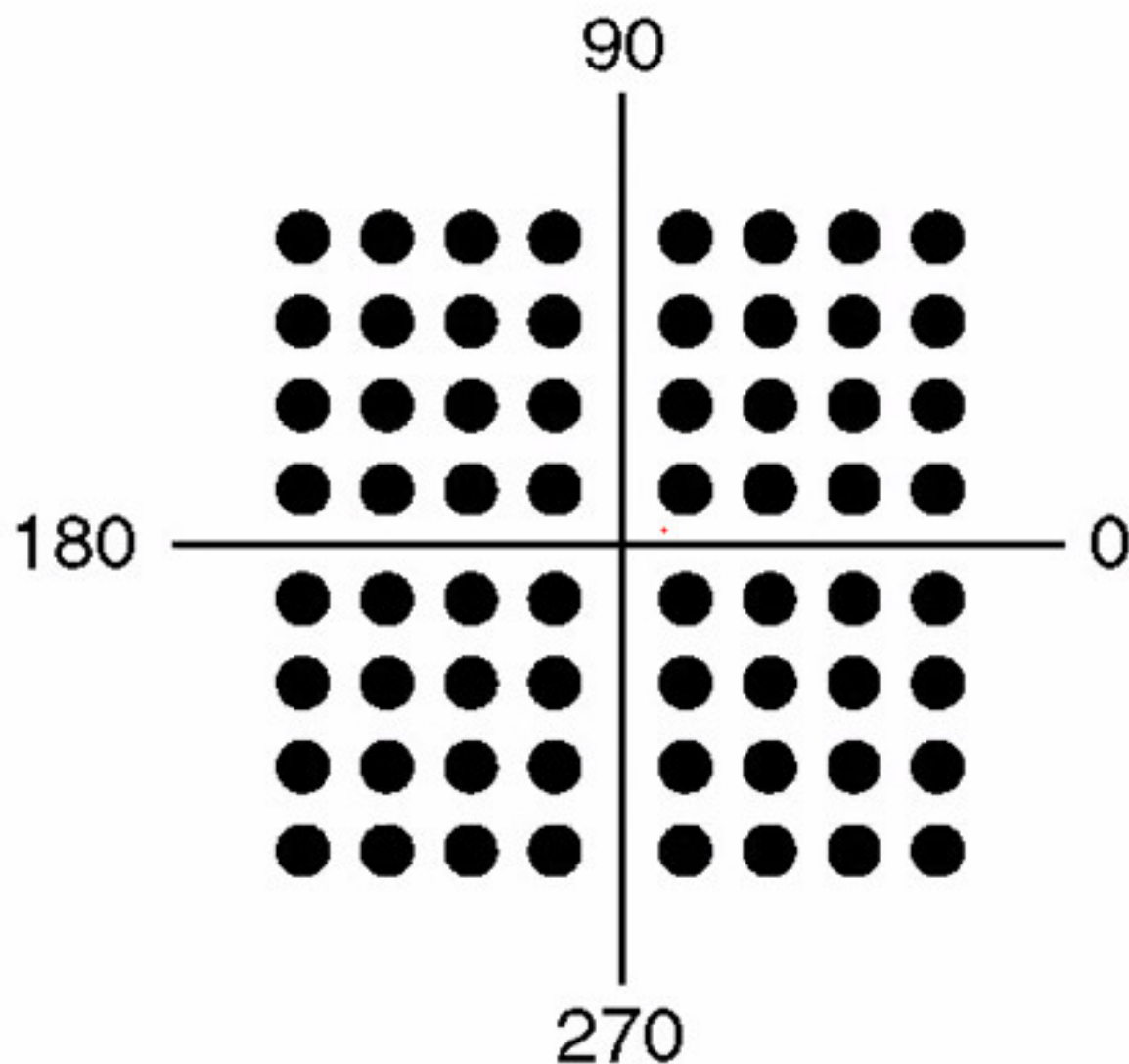
# Mescoliamo allora fase ed ampiezza: QAM-16

◆ QAM: Quadrature Amplitude Modulation





# Spingiamo ancora: QAM-64



# Confronto tra QPSK, QAM-16 e QAM-64

- ◆ QPSK : 4 simboli, bitrate ***doppio*** rispetto ai baud
- ◆ QAM-16: 16 simboli, bitrate ***quadruplo*** rispetto ai baud, due volte meglio del QPSK
- ◆ QAM-64: 64 simboli, bitrate ***sestuplo*** rispetto ai baud, tre volte meglio del QPSK

# Confronto tra QPSK, QAM-16 e QAM-64

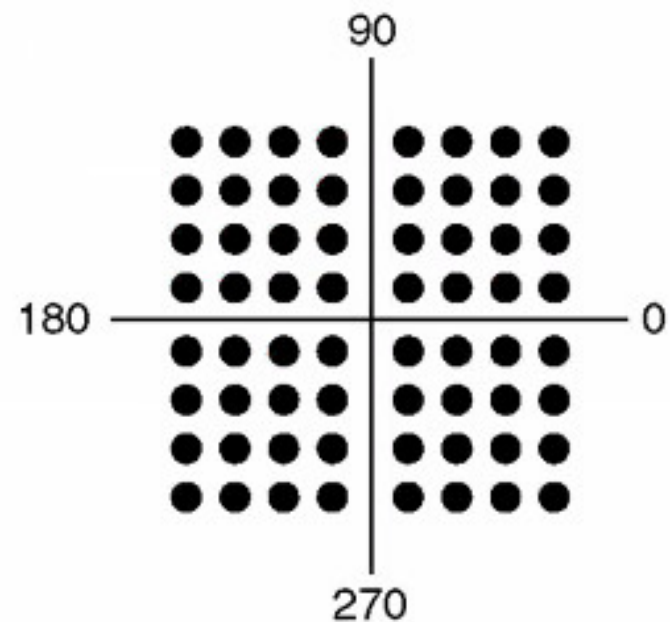
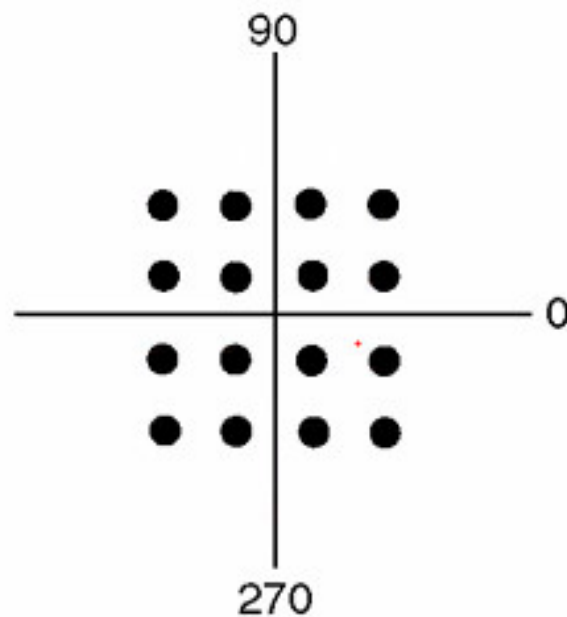
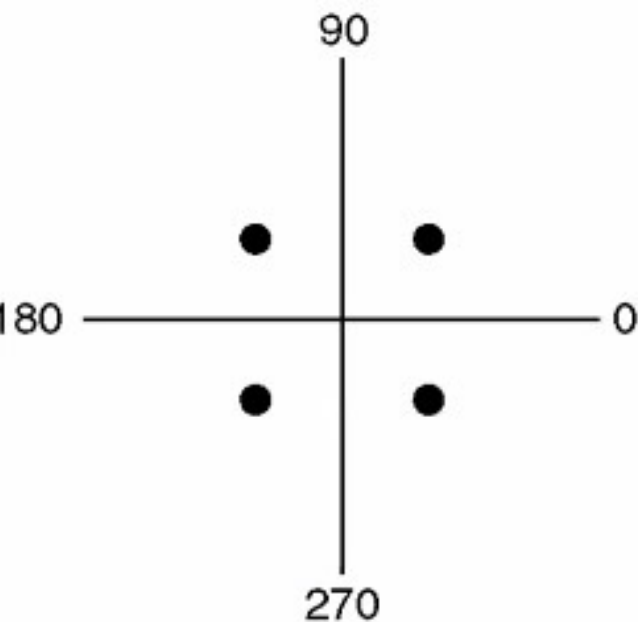
- ◆ QPSK : 4 simboli, bitrate **doppio** rispetto ai baud  
*A = 0000, B = 0001*
- ◆ QAM-16: 16 simboli, bitrate **quadruplo** rispetto ai baud, due volte meglio del QPSK  
*A = 0-0, B = 0-01*
- ◆ QAM-64: 64 simboli, bitrate **sestuplo** rispetto ai baud, tre volte meglio del QPSK



# Nota...

## qualcuno se lo sarà chiesto...

- ◆ Le scelte della combinazione ampiezza/fase nei QPSK, QAM-16 e QAM-64 sono le migliori?

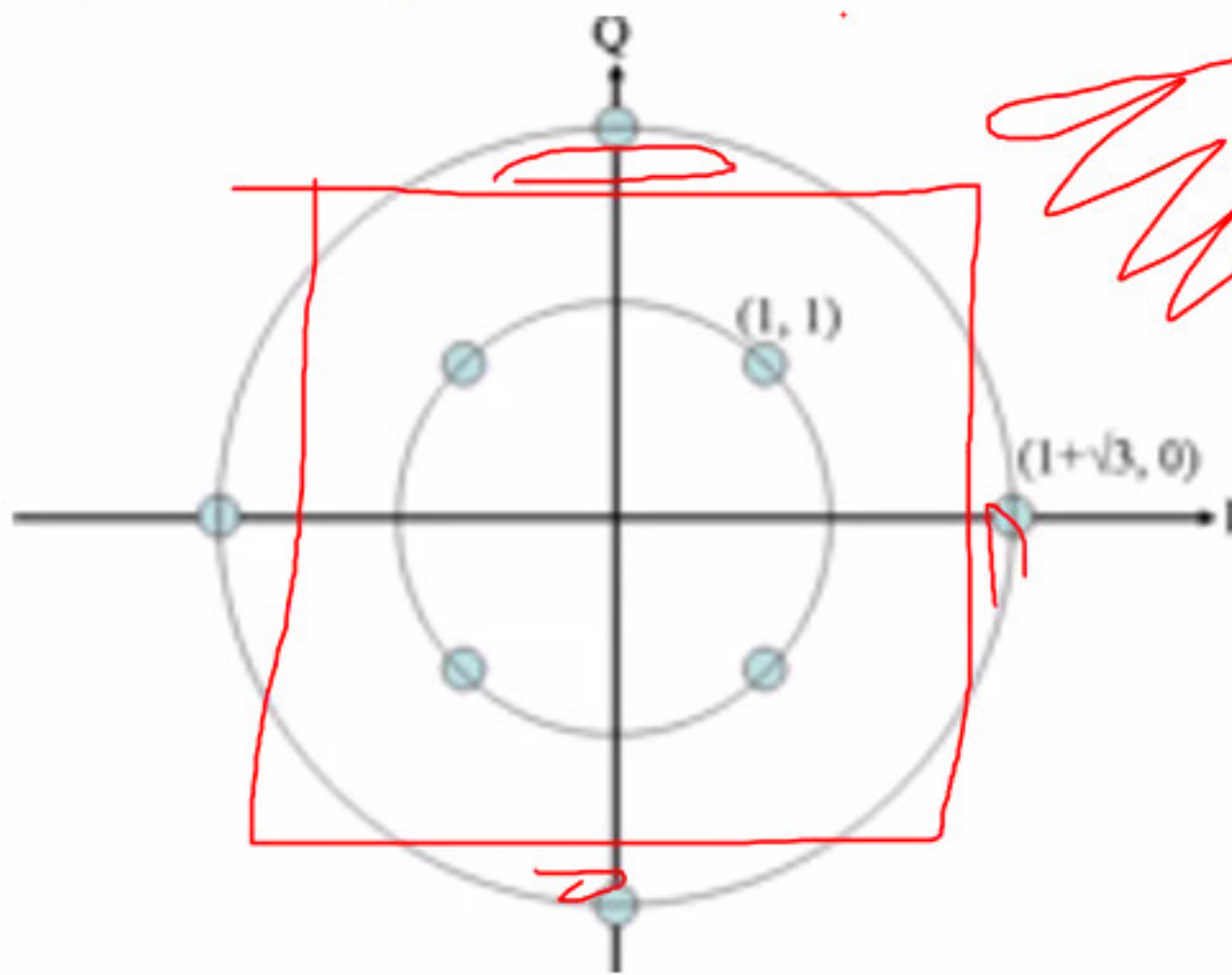


# Risposta: NO!

- ◆ Un po' è anche facile da capire intuitivamente, pensando a dover piazzare dei satelliti in orbita...

# I QAM ottimali

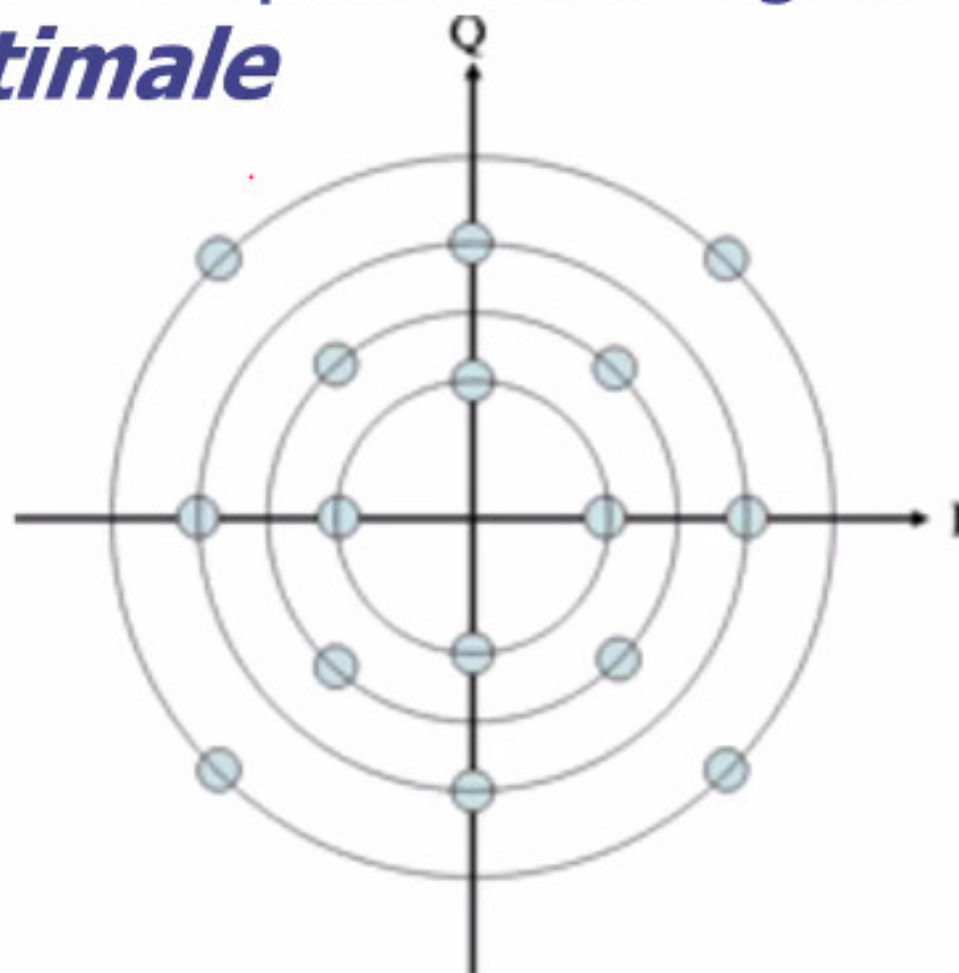
- ◆ Sono i “circular QAM”
- ◆ Esempio di “QAM-8” ottimale:





# In generale, trovare il QAM ottimale è tutt'altro che banale

- ◆ Esempio: il seguente QAM-16 circolare è molto ***meglio*** di quello rettangolare, ma ***non è ottimale***



# In pratica...

- ◆ Si usano i QAM rettangolari invece di quelli circolari e/o ottimali perché sono più facili sia da ***generare*** che da ***decodificare*** 😊

# Torniamo alla linea telefonica...



- ◆ Se si calcola il *limite fisico* di Shannon della linea telefonica tra due utenti che usano il modem, si ottiene:
- ◆ **35000 bps circa (!)**
- ◆ → il *meglio* che un modem può ottenere sono **35kbit al secondo (!!!)**

# Cosa usano i modem?

## Standards principali in uso:



- ◆ **V.21** (1964):  
modulazione di frequenza, 300bps
- ◆ **V.22** (1980):  
modulazione di fase, 1200bps
- ◆ **V.22bis** (1984):  
QAM-16, 2400bps
- ◆ **V.32** (1984):  
QAM-32 con error correction (9600bps)





# Modem in pratica (cont.)

## ◆ **V.32bis** (1991):

\*complicato\*, 128 simboli (14400bps)

## ◆ **V.34** (1994):

\*complicato\*, 12 bit per simbolo (28800bps)

## ◆ **V34.bis** (1996):

\*complicato\*, 14 bit per simbolo (33600bps)

◆ Siamo praticamente al **limite fisico** 35000 !

# Ma allora...

- ◆ Com'è che i "vecchi" modem su linea telefonica vanno a **56Kbps**? (!)



# Modems

- ◆ Abbiamo visto che i modem con lo standard V34.bis (33600bps) hanno praticamente raggiunto il limite fisico (35000bps)
- ◆ Vediamo ora come mai i modems su linea telefonica vanno a 56000bps ("56k")

# Il limite fisico della linea telefonica

- ◆ Per evitare interferenze di vario tipo ed avere un suono più pulito, la banda che passa per il local loop è filtrata: arriva all'incirca a **4000Hz**
- ◆ Il telefono è una linea duplex (a due vie): su una linea di questo tipo (da telefono a telefono) il limite fisico calcolato è appunto **35000bps**



# Però...

- ◆ La situazione cambia quando uno dei due riceventi non è un altro telefono (col suo collo di bottiglia), bensì un servizio digitale
- ◆ In quel caso il limite fisico praticamente **raddoppia (70000bps) !**

# Quindi...

- ◆ Nel caso ci si colleghi al computer di un altro amico via telefono, siamo vincolati ai 33600 bps...
- ◆ ... ma se ci colleghiamo a ***Internet*** o altro servizio ***digitale***, possiamo ***raddoppiare la velocità***

# Allora:

- ◆ Eravamo arrivati al V34bis con 14 bits per simbolo a 2400 baud (33600bps)
- ◆ Potremmo (fidatevi) aumentare la frequenza arrivando a 8000 baud con 8 bits per simbolo, ottenendo modems da **64000 bps (64k !!!)**
- ◆ Quindi 56k certamente possibile... ma come mai non ci colleghiamo a 64k?



# 64k e 56k



- ◆ Il motivo è tecnico/politico:  
per vari motivi, gli Stati Uniti usano solo 7 invece che 8 bits per i dati
- ◆ A 7 bits per simbolo, si arriva esattamente a 56000bps (56k)
- ◆ → L'Europa e il resto del mondo si sono adattati (downgradati!) allo standard americano di 56k



# Morale

- ◆ Morale: ogni connessione modem in Europa e nel mondo va circa il **15%** meno velocemente di quello che potrebbe (!)
- ◆ E dualmente, tutti pagano circa il **14%** in più quando scaricano dati via telefono (!)



# Gli standards più veloci



- ◆ Interessante notare che sono **asimmetrici**:
- ◆ **V.90** (1998): 56000 bps in ***download***, 33600 bps in ***upload***
- ◆ **V.92** (1999): 56000 bps in ***download***, 48000 bps in ***upload***