

The image displays three distinct waveforms. The top waveform is orange and shows a complex, multi-peaked signal with a prominent central peak. The bottom-left waveform is blue and exhibits a sharp initial peak followed by several smaller, oscillating peaks. The bottom-right waveform is yellow and shows a similar multi-peaked structure to the orange waveform but with a different amplitude and phase distribution.

**TRASMISSIONE NUMERICA**  
**IN BANDA PASSANTE**

## Trasmissione numerica in banda passante (1)

Per ottenere una forma d'onda numerica da trasmettere in banda passante è sufficiente modulare un segnale numerico passa basso (moduliamo in fase e in quadratura, per un completo uso della banda disponibile). Dati due segnali numerici in banda base

$$\sum a_k g(t-kT) \text{ e } \sum b_k g(t-kT)$$

si genera e si trasmette il segnale in banda passante

$$s(t) = \sum a_k g(t-kT) \cos(2\pi f_0 t) + \sum b_k g(t-kT) \sin(2\pi f_0 t)$$

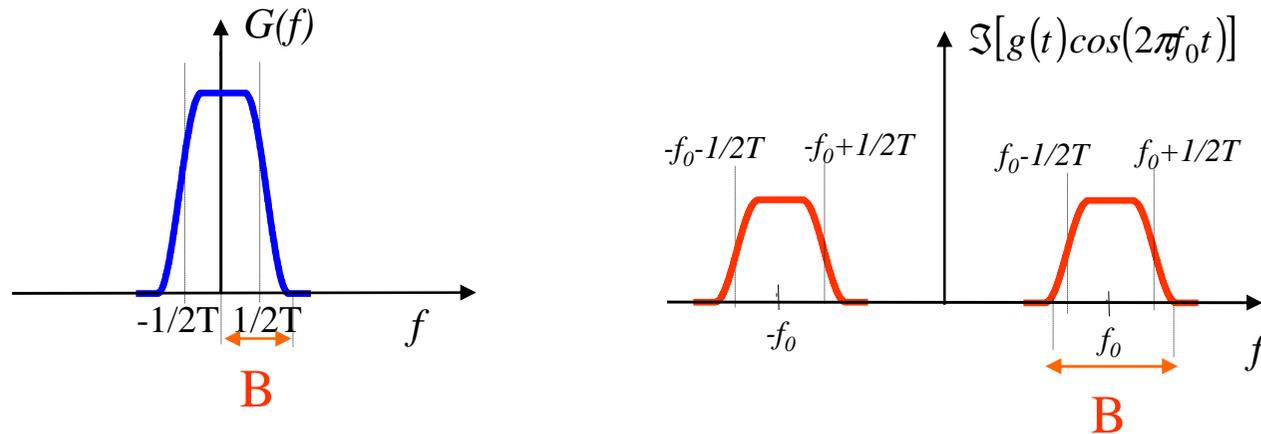
In ricezione si demodula in fase e quadratura: si riottengono i segnali in banda base (senza interferenza reciproca) e poi si procede come già visto.

Si potrebbero eseguire le correlazioni direttamente in banda passante, ma è più semplice procedere in due passi: demodulazione e correlazioni in banda base.

In pratica, data una sorgente binaria che emette ad un ritmo prefissato di  $R_b$  bit al secondo, i dati vengono suddivisi in due flussi di  $R_b/2$  b/s su ciascun asse. Si generano poi i segnali numerici in banda base e si modula in fase e quadratura.

## Trasmissione numerica in banda passante (2)

Si osservi che la modulazione comporta un raddoppio della banda occupata



In BANDA PASSANTE

$$B = \frac{1}{T}(1 + \alpha)$$

Dove  $T$  rappresenta sempre il tempo di simbolo. Se però separiamo il flusso su due canali, la banda richiesta in banda base sarebbe dimezzata perché  $R_b$  è dimezzato e quindi  $T$  raddoppia. Dunque la trasmissione in banda passante richiede esattamente la stessa banda della trasmissione in banda base. Se non si utilizzassero entrambe le componenti in fase e quadratura la banda richiesta raddoppierebbe.

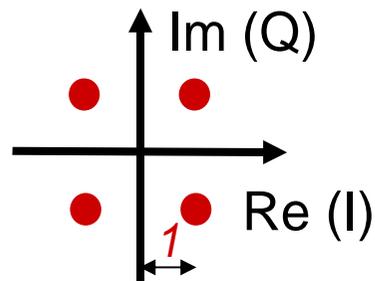
## Trasmissione numerica in banda passante (3)

Se la trasmissione è binaria su entrambe le componenti (si dice anche “su entrambi gli assi”) il “simbolo”  $a_k g(t-kT) \cos(2\pi f_0 t) + b_k g(t-kT) \sin(2\pi f_0 t)$  si può presentare in quattro configurazioni. Analogamente se la trasmissione è a quattro livelli su ciascun asse si hanno sedici possibili segnali corrispondenti a un simbolo. Si usa rappresentare le possibili coppie  $(a_k, b_k)$  come “costellazioni” di punti su un piano, ovvero di numeri complessi: infatti  $s(t)$  che è passa-banda si può rappresentare tramite un **equivalente passa-basso complesso**:

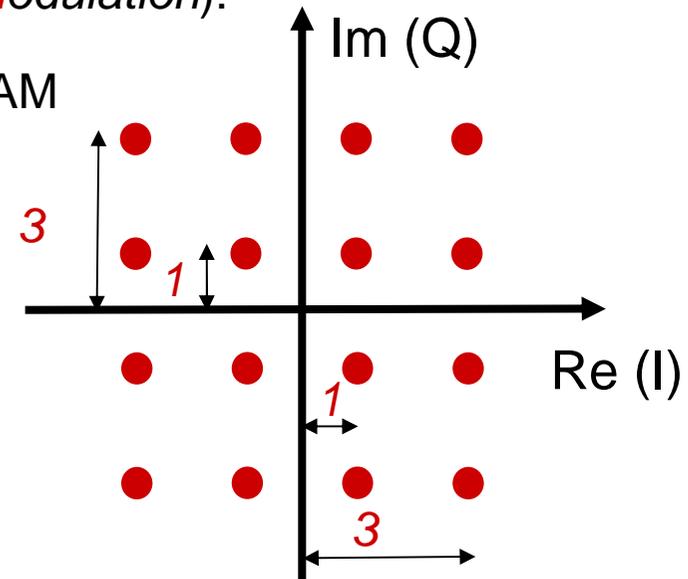
$$a_k g(t-kT) \cos(2\pi f_0 t) + b_k g(t-kT) \sin(2\pi f_0 t) = \text{Re}\{(a_k + jb_k) g(t-kT) \exp(-j2\pi f_0 t)\}$$

**Costellazioni QAM (Quadrature Amplitude Modulation):**

4-QAM (o anche QPSK)



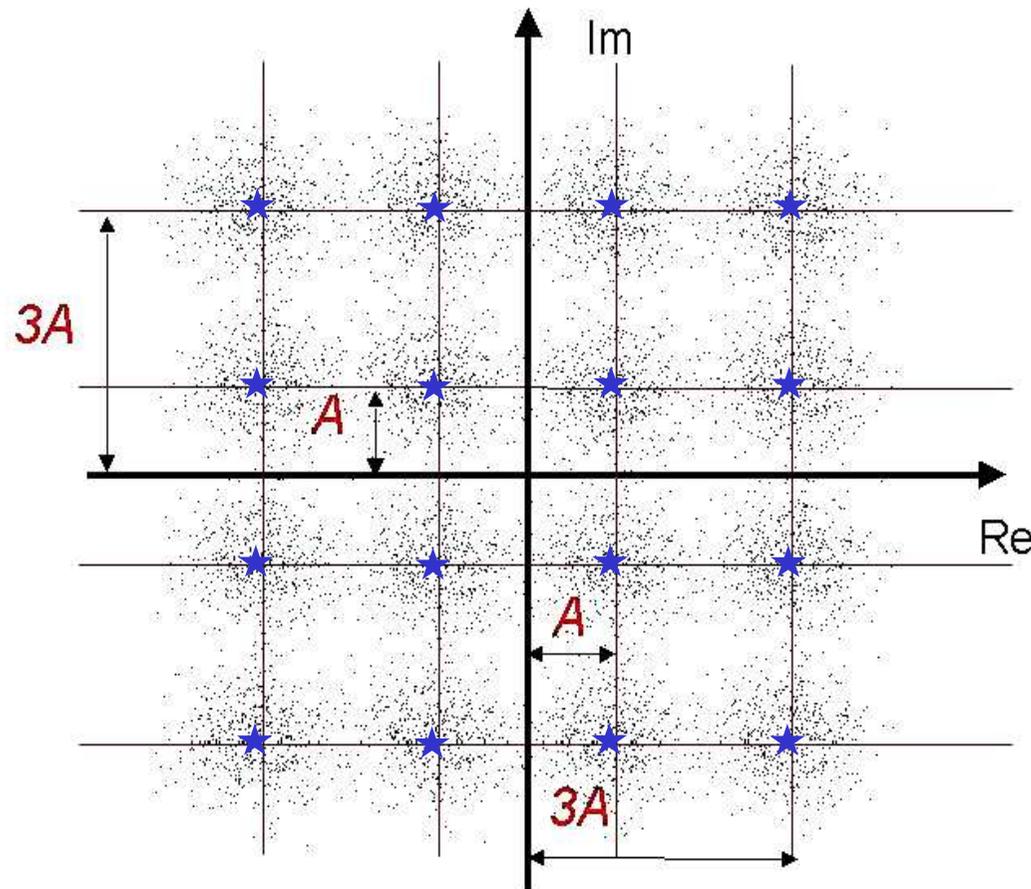
16-QAM







## Effetto del rumore sulla costellazione ricevuta



Se riportiamo i valori misurati all'uscita dei due rami di demodulazione, in prove ripetute si distribuiscono circolarmente attorno ai valori nominali (indicati con ★ )

Si può dimostrare che i campioni di rumore  $n_{I,k}$  e  $n_{Q,k}$  sono indipendenti, hanno valor medio nullo, densità di probabilità gaussiana, e varianza ancora pari a  $N_0 E_g / 2$ . Pertanto il decisore riceve in ingresso campioni di segnale utile e campioni di rumore con caratteristiche identiche a quelle di un sistema 4-PAM e quindi fornisce le stesse prestazioni!

Generalizzando, le prestazioni di un ricevitore per un sistema  $M^2$ -QAM sono identiche a quelle di un ricevitore M-PAM!

## Costellazioni M<sup>2</sup>-QAM

Riassumendo, in banda passante si possono utilizzare sistemi M<sup>2</sup>-QAM che corrispondono a modulare due diversi segnali M-PAM su due portanti ortogonali (sfasate di 90°).

La probabilità d'errore di un ricevitore M<sup>2</sup>-QAM é identica a quella di un ricevitore M-PAM

4-QAM

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

16-QAM

$$P_b = \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{4E_b}{5N_0}}\right)$$

...

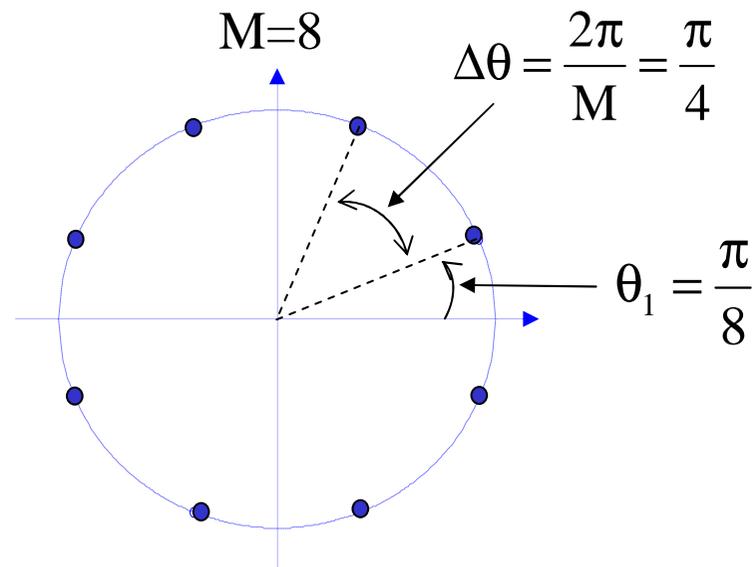
La banda occupata raddoppia a pari ritmo di simbolo a causa della modulazione, ma se usiamo entrambe le portanti abbiamo due dimensioni e quindi una costellazione che porta il doppio dei bit per ogni simbolo, e dunque la banda non cambia, a pari bit rate. Possiamo generalizzare l'espressione della banda anche a sistemi in banda passante

$$B = \frac{R_b}{2} \frac{1}{\log_2 M} (1 + \alpha)$$

$R_b$  bit rate [b/s]  
 $M$  numero di livelli per asse  
 $M^2$  simboli nella costellazione

## Costellazioni PSK

In banda passante si possono utilizzare anche costellazioni ottenute combinando livelli non indipendenti sui due assi. Ad esempio la costellazione 8-PSK (*Phase Shift Keying*) ha nel piano complesso otto punti con ugual modulo e con fasi equispaziate:



La costellazione 4-PSK coincide con la 4-QAM già vista (ed anzi è più nota con questa denominazione).

La costellazione 8-PSK ha prestazioni diverse dalle costellazioni PAM e QAM, piuttosto deludenti, a meno di non utilizzarla in combinazione con dei “codici”.

Costellazioni PSK con più di otto punti sono rarissime.