

## Trasmissione di un segnale wireless LTE (4G) – Wi Fi (802.11 b/g/n/ac)



## Modello elementare e parametri

- **Inviluppo complesso elementare:**  $v(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n g(t - nT)$ , dove i coefficienti complessi  $a_n$  (informazione) appartengono a un insieme finito di dimensione  $2^b$  e, di conseguenza, trasportano  $b$  bit di informazione.

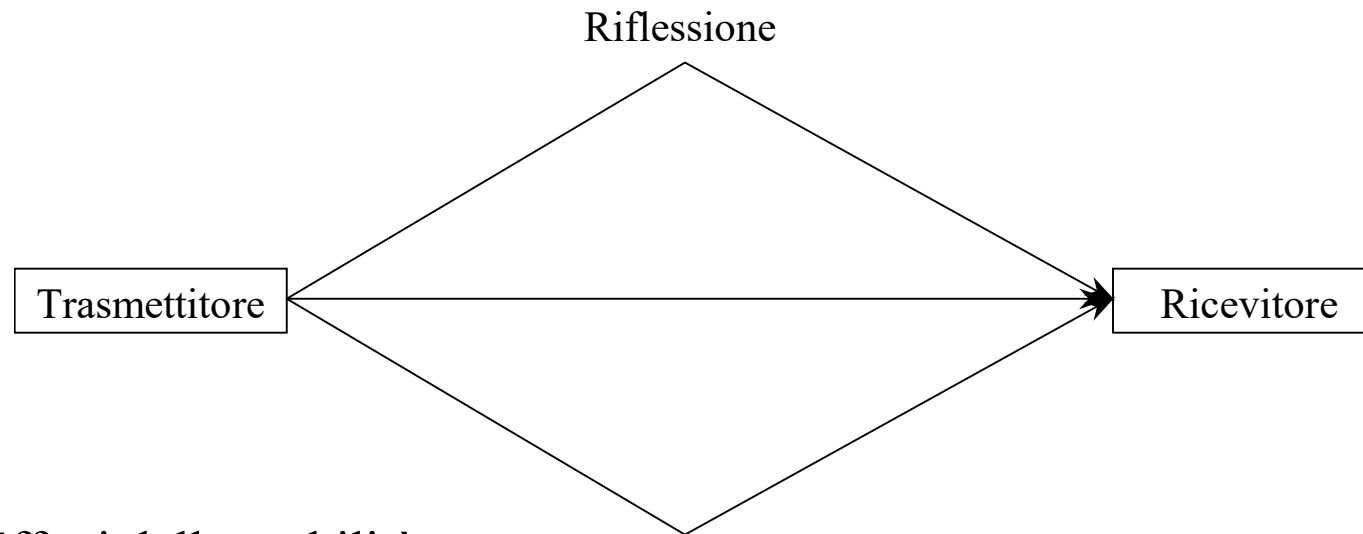
Esempi:  $b=1, a_n \in \{-1, 1\}$ ;  $b=2, a_n \in \{1+j, 1-j, -1-j, -1+j\}/\sqrt{2}$ .

- Parametri che caratterizzano una modulazione
  - **Tasso di emissione (in simboli al secondo):**  $R_s = 1/T$  [baud] ( $T$  è detto anche intervallo di segnalazione).
  - **Tasso di emissione (bit rate):**  $R_b = b/T$  [bit/s].
  - **Banda del segnale:**  $W$  [Hz].



## Il canale wireless

- Canale condiviso (broadcast), aperto.
- Propagazione per **cammini multipli** (*multipath channel*).



- Effetti della mobilità:
  - **Effetto Doppler** (ritardo variabile: variazione frequenza).
  - **Combinazione aleatoria fasi cammini multipli variabile nel tempo.**



## Il canale *multi-path*

- **Canale *multi-path* (espressione semplificata):** 
$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l)$$
Lineare tempo variante (mobilità), con  $L$  repliche a ritardi diversi. I coefficienti  $h_l(t)$  hanno valore complesso e variano nel tempo. L'effetto complessivo è distorsivo, e la distorsione aumenta all'aumentare della banda  $W$ .
- **Banda di coerenza  $B_c$ :** intervallo di frequenze in cui la distorsione è contenuta. È proporzionale alla deviazione standard del ritardo che, a sua volta, è proporzionale alla distanza.
- ***Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM):** trasmissione di  $N$  flussi paralleli su bande adiacenti, ciascuna delle quali ha un'estensione pari a  $\Delta f = W/N < B_c$ .



## Delay spread

- Supponiamo di avere  $N$  cammini distinti, ciascuno dei quali è caratterizzato da attenuazione  $\alpha_i$  e ritardo  $\tau_i$ . Si ha:

$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l)$$

- Peso del generico cammino:

$$p_l = |h_l(t)|^2 / \sum_{i=1}^L |h_i(t)|^2$$

- Ritardo medio e *delay spread*:

- $\mu_\tau = \sum_{l=1}^L p_l \tau_l$  secondi,  $\sigma_\tau = \sqrt{\sum_{l=1}^L p_l (\tau_l - \mu_\tau)^2}$  secondi.



# Orthogonal Frequency Division Multiplexing

- Siano  $S_n[k]$  i simboli complessi della modulazione in uso. Nel dominio del tempo la traslazione in frequenza si esprime mediante un esponenziale complesso.

$$\tilde{s}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} S_n[k] g(t - nT) e^{j2\pi(k-N/2)\Delta f t}$$

- **Condizione di ortogonalità** fra i flussi (affinché non si disturbino tra loro):  $\Delta f = 1/T$ .
- Per semplicità, sia  $g(t) = \text{rect}(t/T - 1/2)$ . In  $[0, T)$  abbiamo:

$$\tilde{s}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S[k] e^{j2\pi(k-N/2)t/T}$$

- Essendo la semi-banda positiva complessiva pari a  $W/2$  possiamo campionare con un intervallo di campionamento pari a  $T_c = 1/W = T/N$  s.

$$\tilde{s}[m] = \tilde{s}\left(t = m \frac{T}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} S[k] e^{j2\pi(k-N/2)m/N} = \sum_{k=0}^{N-1} S_{\text{shift}}[k] e^{j2\pi mk/N} = N \text{IDFT}\{S_{\text{shift}}[k]\}$$



## OFDM: algoritmo di trasmissione (prima parte)

- $\mathbf{S} = [S[-N/2], S[-N/2+1], \dots, S[0], \dots, S[N/2]]$  . Di solito  $S[0]=0$ .
- Detto  $N_{\text{FFT}}=2^K$ , aggiungo  $N_{\text{FFT}} - N$  zeri -1 (*zero padding*)  
 $\mathbf{S}_{\text{PADD}} = [S[-N/2], S[-N/2+1], \dots, S[0]=0, \dots, S[N/2], 0, \dots, 0]$
- $\mathbf{S}_{\text{SHIFT-PADD}} = [0, S[1], \dots, S[N/2], 0, \dots, 0, S[-N/2], \dots, S[-1]]$
- IFFT:  $\tilde{\mathbf{s}} = [\tilde{s}[0], \tilde{s}[1], \dots, \tilde{s}[N_{\text{FFT}} - 1]]$



- Compito del ricevitore è quello di calcolare la DFT del segnale ricevuto in  $N_{\text{FFT}}$  valori.
- Antepoendo in testa al vettore di simboli trasmessi gli ultimi  $L-1$ , la risposta del canale (ottenuta per convoluzione lineare) contiene i campioni che consentono il calcolo diretto della DFT. Risulta cioè  $Y_n(k) = S_n(k)H_n(k)$ ,  $k = 1, \dots, N_{\text{FFT}}$  (campioni distinti vedono portanti distinte e indipendenti).
- Esempio ( $L=3$ ,  $N_{\text{FFT}}=4$ ).

CP <sub>S1</sub>		S <sub>1</sub>				CP <sub>S2</sub>		S <sub>2</sub>	Y <sub>n</sub>	Convoluzione ciclica
S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>20</sub>		
h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>							y <sub>10</sub>	S <sub>12</sub> h <sub>2</sub> + S <sub>13</sub> h <sub>1</sub> + S <sub>10</sub> h <sub>0</sub>
	h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>						y <sub>11</sub>	S <sub>13</sub> h <sub>2</sub> + S <sub>10</sub> h <sub>1</sub> + S <sub>11</sub> h <sub>0</sub>
		h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>					y <sub>12</sub>	S <sub>10</sub> h <sub>2</sub> + S <sub>11</sub> h <sub>1</sub> + S <sub>12</sub> h <sub>0</sub>
			h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>				y <sub>13</sub>	S <sub>11</sub> h <sub>2</sub> + S <sub>12</sub> h <sub>1</sub> + S <sub>13</sub> h <sub>0</sub>
				h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>			CP <sub>R1</sub>	
					h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>			
						h <sub>2</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>0</sub>	y <sub>20</sub>	S <sub>22</sub> h <sub>2</sub> + S <sub>23</sub> h <sub>1</sub> + S <sub>20</sub> h <sub>0</sub>





## OFDM: algoritmo di trasmissione (seconda parte)

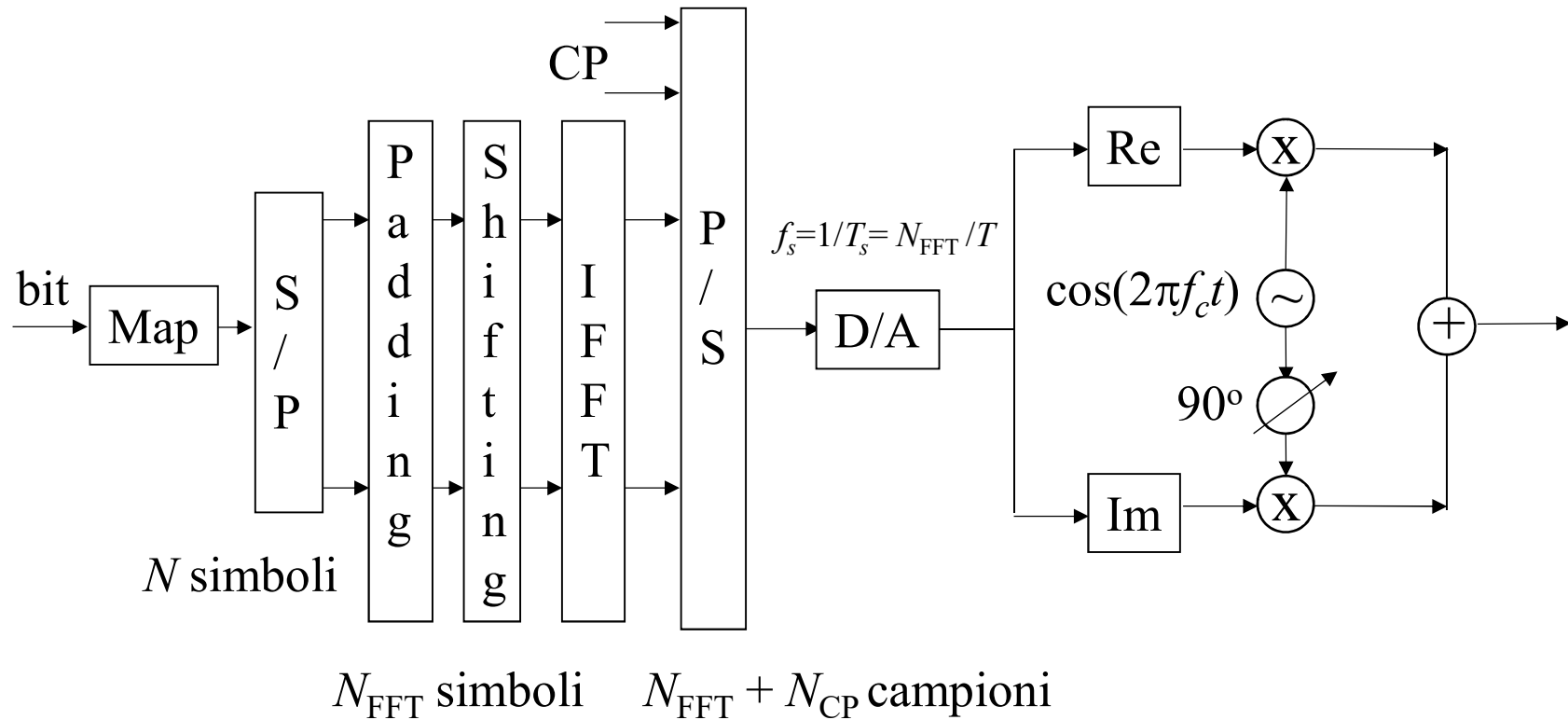
- Aggiunta prefisso ciclico (CP: *Cyclic Prefix*), replicando in testa al vettore dei campioni gli ultimi  $L-1$  campioni, essendo  $L$  la lunghezza della risposta impulsiva del canale).

$$\tilde{\mathbf{s}}_{\text{CP}} = [\tilde{s}[N_{\text{FFT}} - L + 1], \dots, \tilde{s}[N_{\text{FFT}} - 1]]$$

- Conversione parallelo serie e trasmissione.

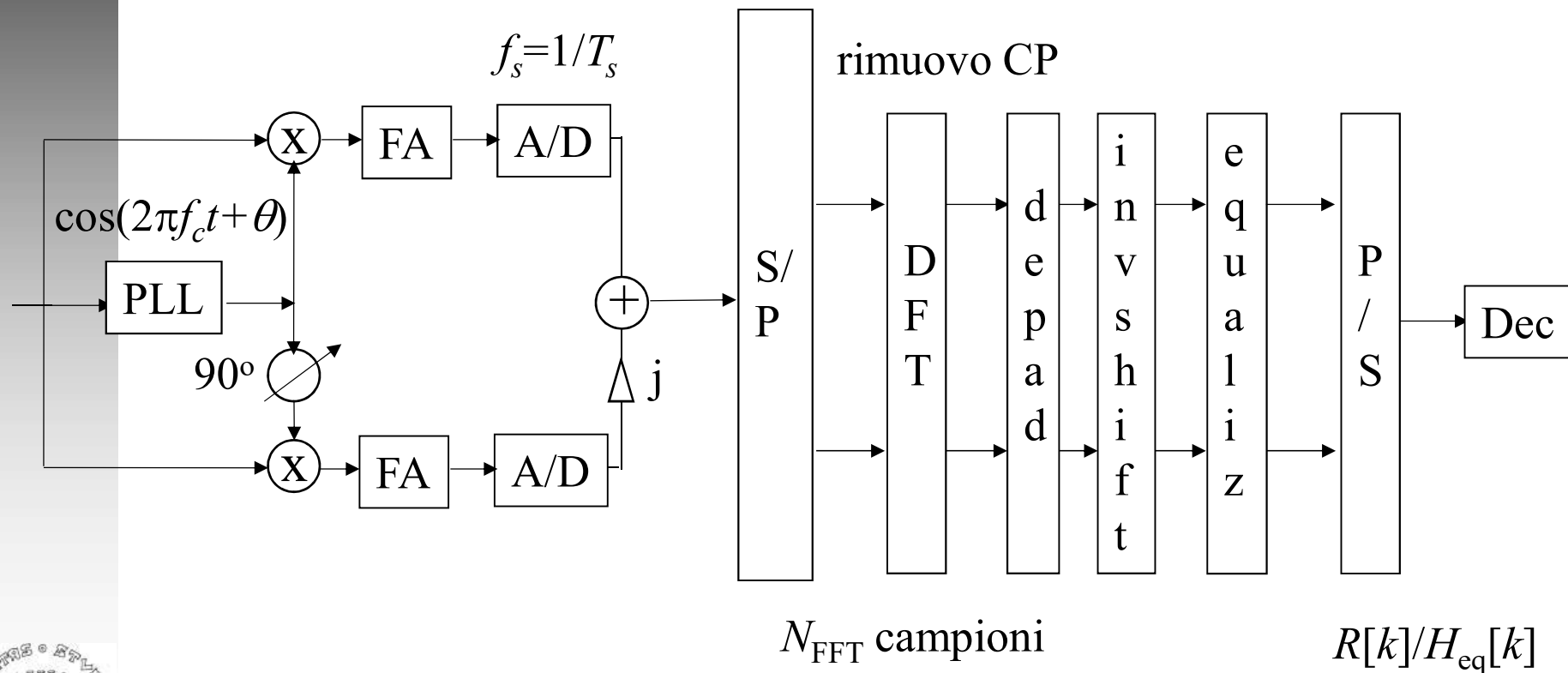


# OFDM: trasmettitore



# OFDM: ricevitore

- **Ricevitore** (il blocco equalizzatore ripristina la costellazione di partenza, invertendo il canale (CSI), per ipotesi piatto nella banda occupata dalla sotto-portante – *flat fading*, demodulazione coerente).



## OFDM: esempi

- 802.11 a/g (banda disponibile:  $W=20$  MHz; canali adiacenti sovrapposti)
  - $N_{\text{FFT}}=64$
  - $\Delta f=W/N_{\text{FFT}}=312.5$  kHz
  - $T=1/\Delta f=3.2$   $\mu\text{s}$
  - $T_s=T/N_{\text{FFT}}=50$  ns
  - $N=52$  (12 sotto-portanti libere)
  - $N_{\text{CP}}=12$
- LTE, banda disponibile:  $W=10$  MHz
  - $N_{\text{FFT}}=1024$
  - $\Delta f=15$  kHz
  - $T=1/\Delta f=66.7$   $\mu\text{s}$
  - $T_s=T/N_{\text{FFT}}=65$  ns
  - $N=600$
  - $N_{\text{CP}}(\text{normal})=72$
- $W=15$  MHz
  - $N_{\text{FFT}}=1536$
  - $\Delta f=15$  kHz
  - $T=1/\Delta f=66.7$   $\mu\text{s}$
  - $T_s=T/N_{\text{FFT}}=43$  ns
  - $N=900$
  - $N_{\text{CP}}(\text{normal})=108$

