

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.

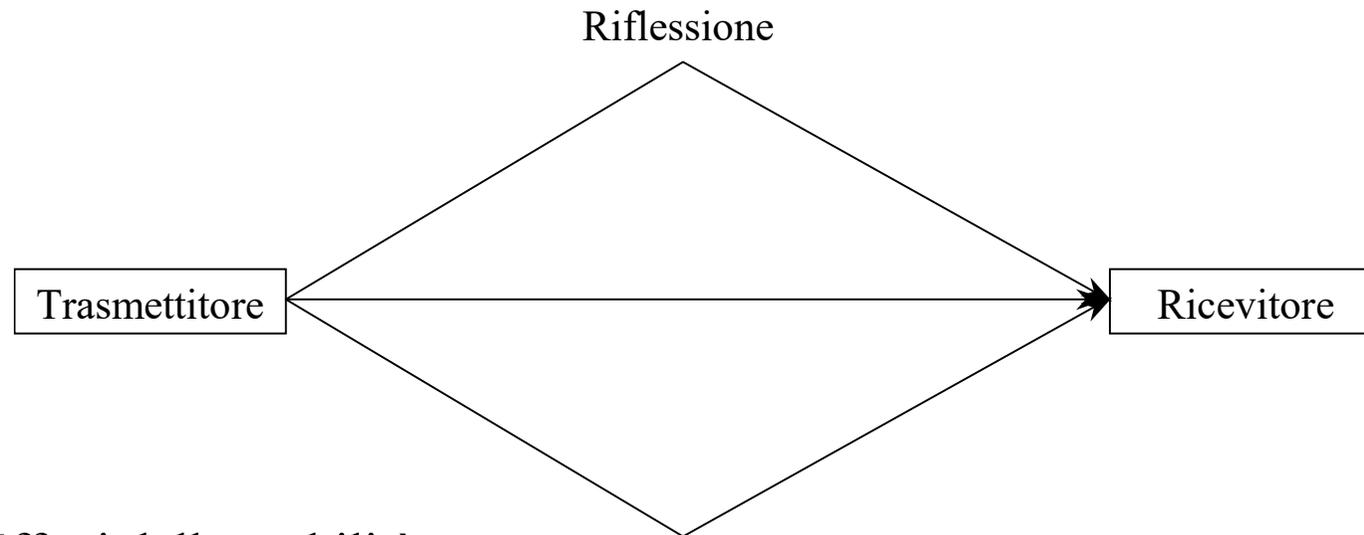
Esempi: $b=1, a_n \in \{-1, 1\}$; $b=2, a_n \in \{1+j, 1-j, -1-j, -1+j\}/\sqrt{2}$.

- 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 α_i e ritardo τ_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_{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 _{S1}		S ₁				CP _{S2}		S ₂	Y _n	Convoluzione ciclica
S ₁₂	S ₁₃	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₂₂	S ₂₃	S ₂₀		
h ₂	h ₁	h ₀							y ₁₀	S ₁₂ h ₂ + S ₁₃ h ₁ + S ₁₀ h ₀
	h ₂	h ₁	h ₀						y ₁₁	S ₁₃ h ₂ + S ₁₀ h ₁ + S ₁₁ h ₀
		h ₂	h ₁	h ₀					y ₁₂	S ₁₀ h ₂ + S ₁₁ h ₁ + S ₁₂ h ₀
			h ₂	h ₁	h ₀				y ₁₃	S ₁₁ h ₂ + S ₁₂ h ₁ + S ₁₃ h ₀
				h ₂	h ₁	h ₀			CP _{R1}	
					h ₂	h ₁	h ₀			
						h ₂	h ₁	h ₀	y ₂₀	S ₂₂ h ₂ + S ₂₃ h ₁ + S ₂₀ h ₀



OFDM: algoritmo di trasmissione (seconda parte)

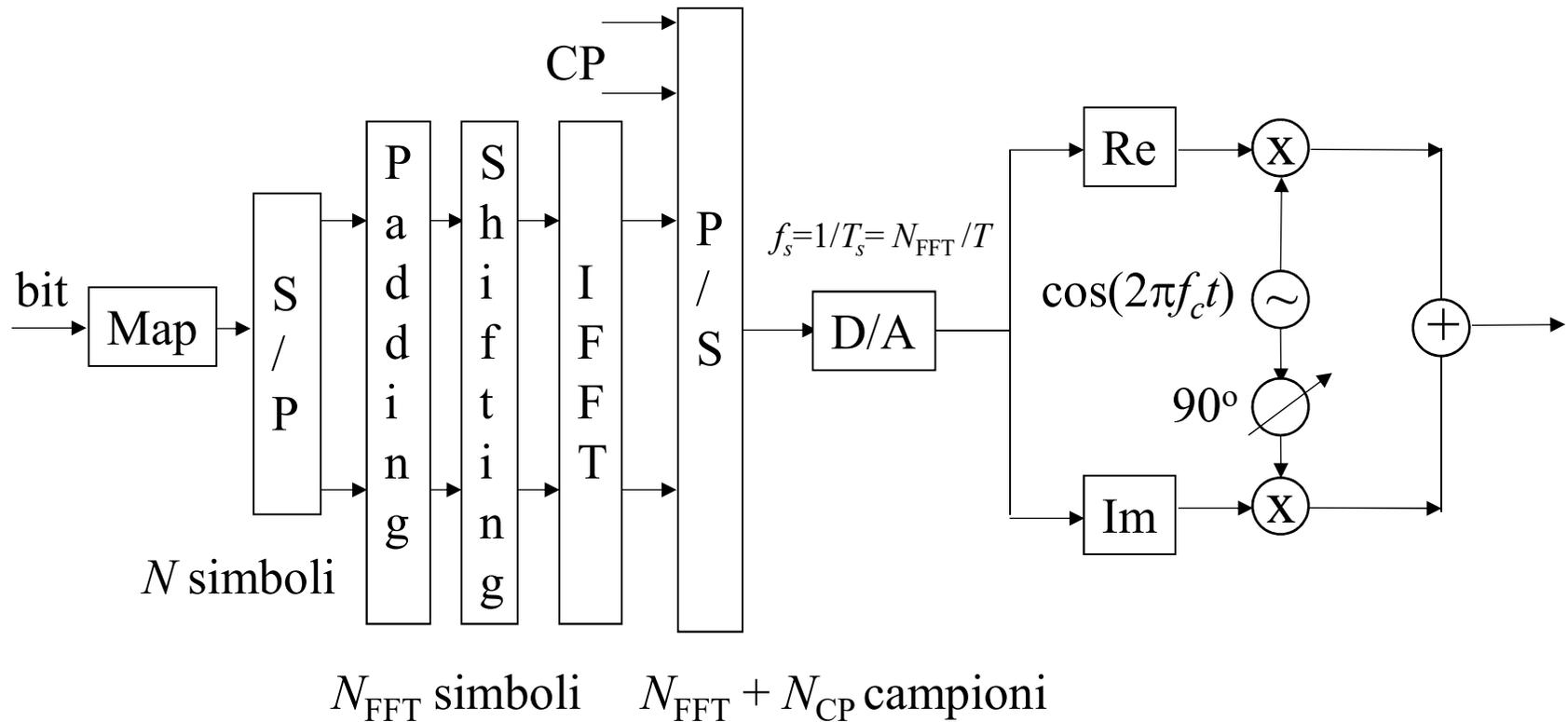
- Aggiunta prefisso ciclico (CP: *Cyclic Prefix*), replicando in testa al vettore dei campioni gli ultimi $L-1$ campioni, essendo L la lunghezza della risposta impulsiva del canale).

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

- Conversione parallelo serie e trasmissione.

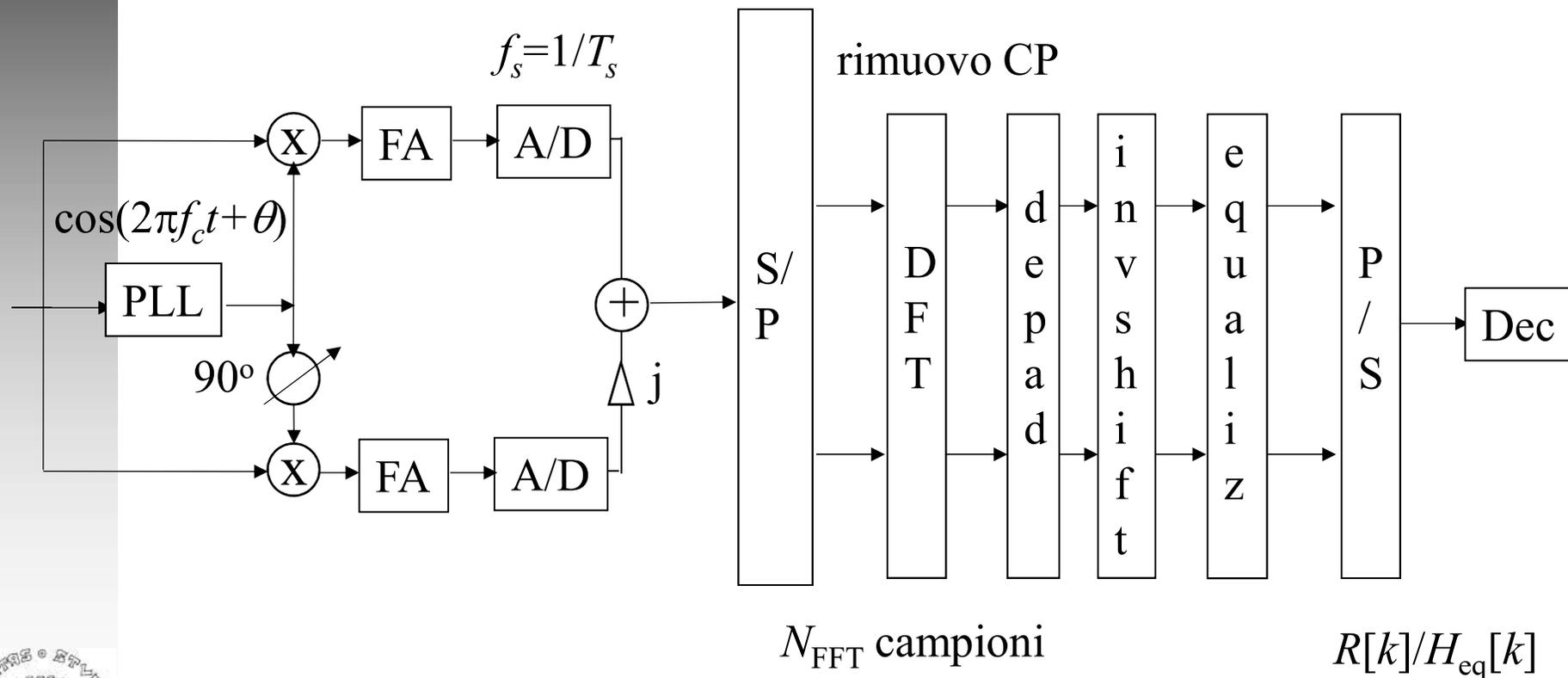


OFDM: trasmettitore



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
 - $T=1/\Delta f=3.2$ μs
 - $T_s=T/N_{\text{FFT}}=50$ 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
 - $T=1/\Delta f=66.7$ μs
 - $T_s=T/N_{\text{FFT}}=65$ ns
 - $N=600$
 - N_{CP} (normal)=72
- $W=15$ MHz
 - $N_{\text{FFT}}=1536$
 - $\Delta f=15$ kHz
 - $T=1/\Delta f=66.7$ μs
 - $T_s=T/N_{\text{FFT}}=43$ ns
 - $N=900$
 - N_{CP} (normal)=108

