



Comunicazioni su Linee Elettriche

Dottorando: *Riccardo Pighi*

Tutor: Prof. Ing. *Riccardo Raheli*

Dottorato in Tecnologie dell'Informazione XVIII Ciclo

Parma, 11 Gennaio 2006



Indice della Presentazione

- Progetto di un sistema di comunicazione a singola portante:
 - Studio di codici
 - Algoritmo di mapping
 - Analisi delle prestazioni
 - Ottimizzazione degli algoritmi per DSP
 - Rumore corona ed impulsivo
- Progetto di un sistema di comunicazione multiportante:
 - Motivazioni
 - Allocazione ottima delle risorse
 - Sistema multiportante e banchi di filtri
 - Algoritmi di sincronizzazione
 - Risultati numerici e considerazioni



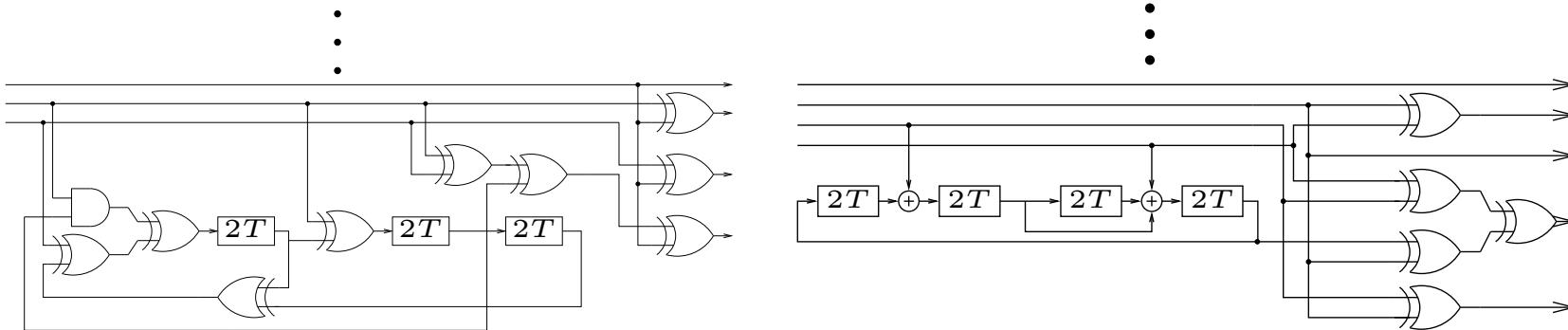
Modem a singola portante Selta

- Il sistema può operare:
 - In modalità full-duplex su banda di 16 kHz con cancellazione d'eco
 - In modalità full-duplex su bande separate da 8 kHz
- La trasmissione avviene attraverso uno schema congiunto di codifica e modulazione TCM:
 - con costellazioni bidimensionali (QAM)
 - con costellazioni multidimensionali (prodotto cartesiano di punti appartenenti a QAM)
- Inizialmente, il modem era caratterizzato da un tasso di informazione fisso a 64 kbit/s con codifica 2D TCM



Singola portante: studio di codici

- Progetto di un codice TCM multidimensionale a 8 e 16 stati.

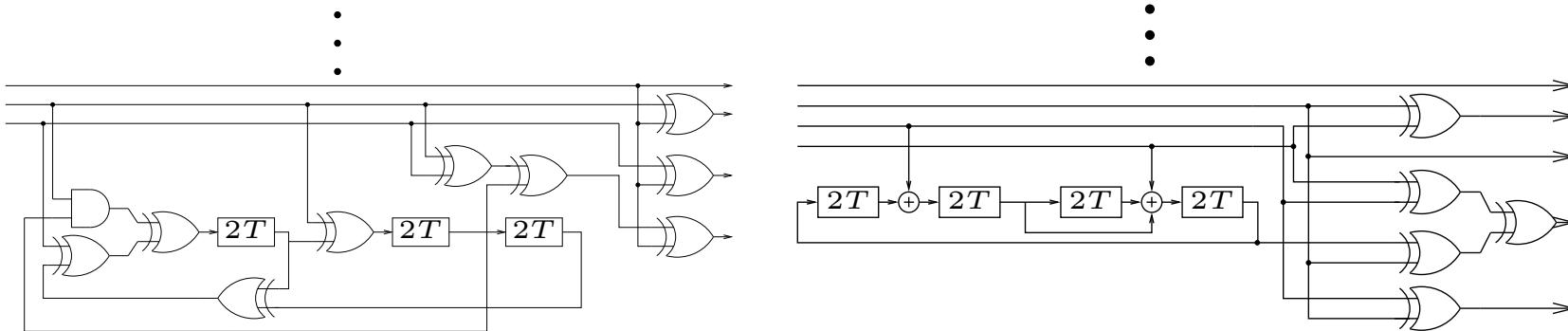


- L'utilizzo del codice 4D TCM introduce un “canale di servizio” da 6.4 kbit/s
- Monitoraggio della qualità del collegamento, scambio dati per sincronia e gestione della comunicazione
- Riduzione dei Mips richiesti dall'elaborazione DSP



Singola portante: studio di codici

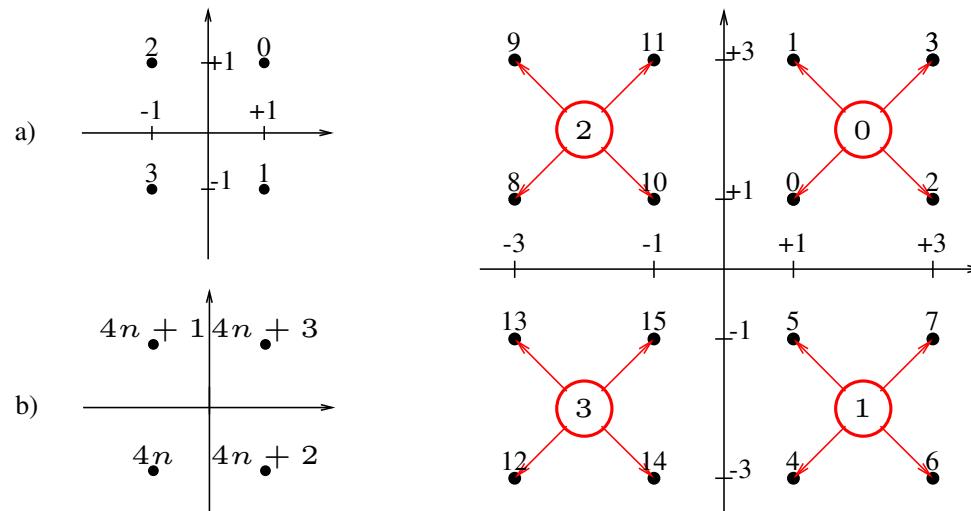
- Progetto di un codice TCM multidimensionale a 8 e 16 stati.



- L'utilizzo del codice 4D TCM introduce un “canale di servizio” da 6.4 kbit/s
- Monitoraggio della qualità del collegamento, scambio dati per sincronia e gestione della comunicazione
- Riduzione dei Mips richiesti dall'elaborazione DSP
- Superate le prove di omologazione EDF (Electricité de France)

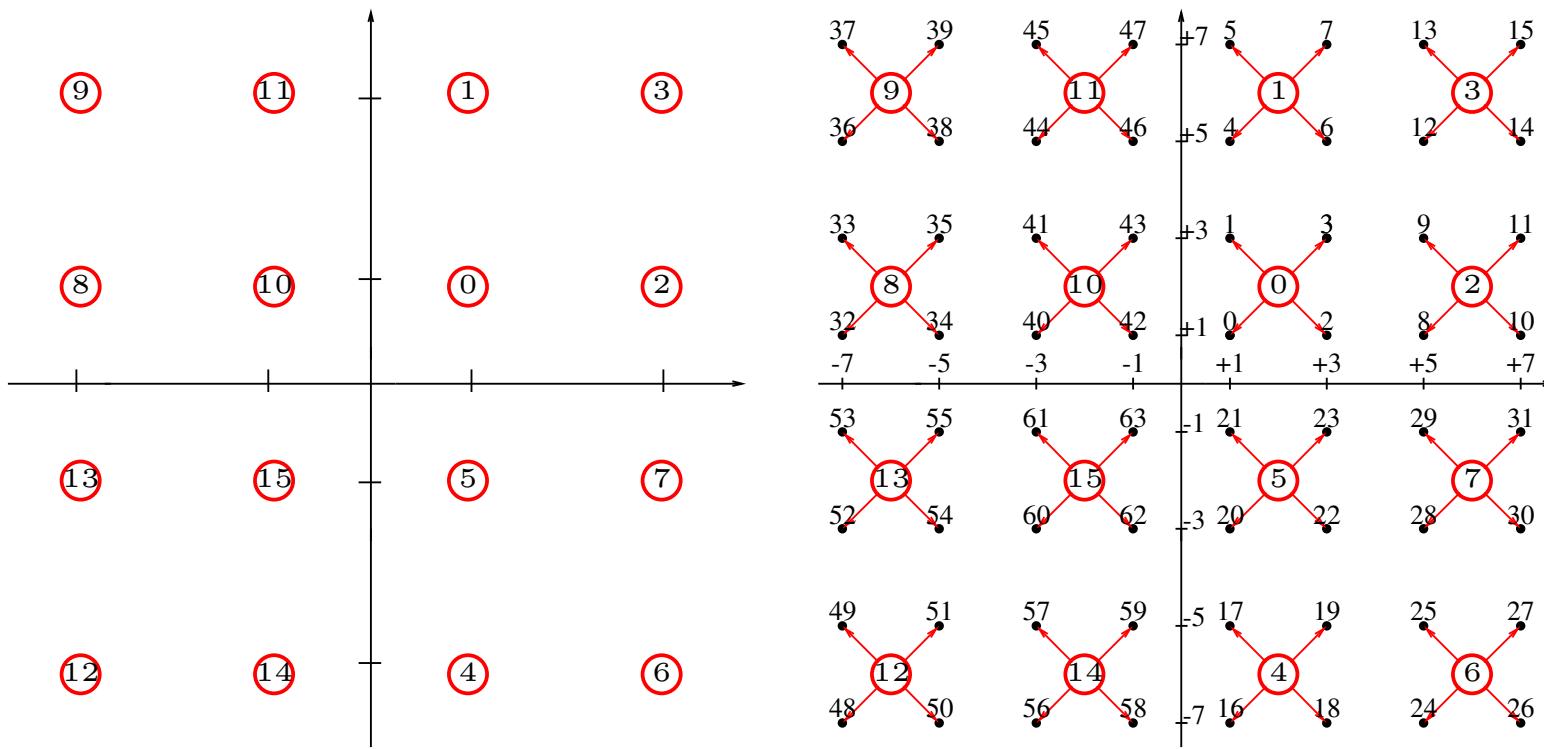
Singola portante: tasso variabile

- Canale non stazionario: ripensare il modem in termini di tasso di segnalazione variabile
- Risorse di calcolo disponibili piuttosto limitate per una evoluzione del prodotto industriale
- Occorre poter gestire una costellazione QAM di dimensione arbitraria





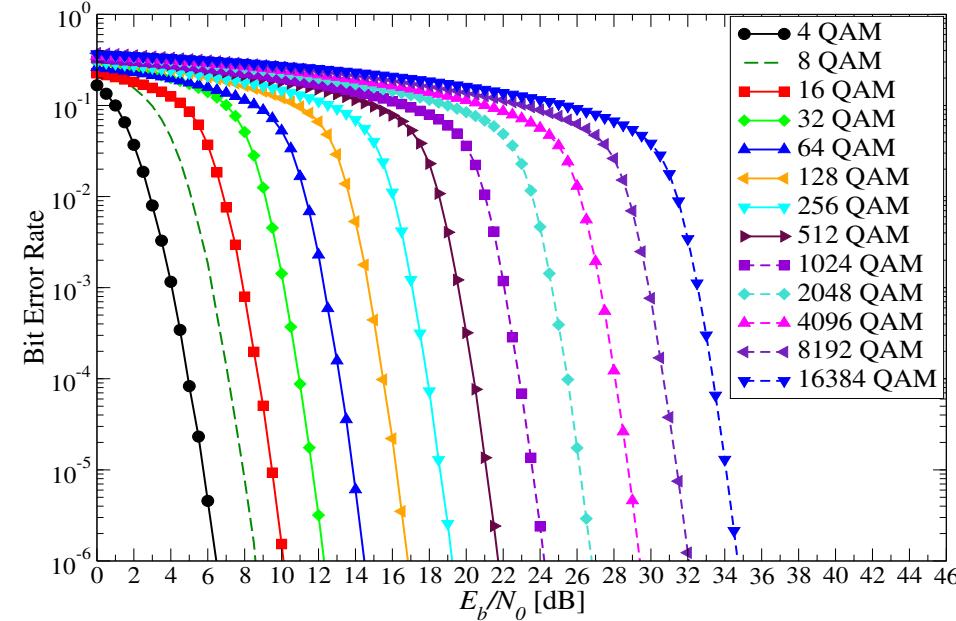
Singola portante: tasso variabile



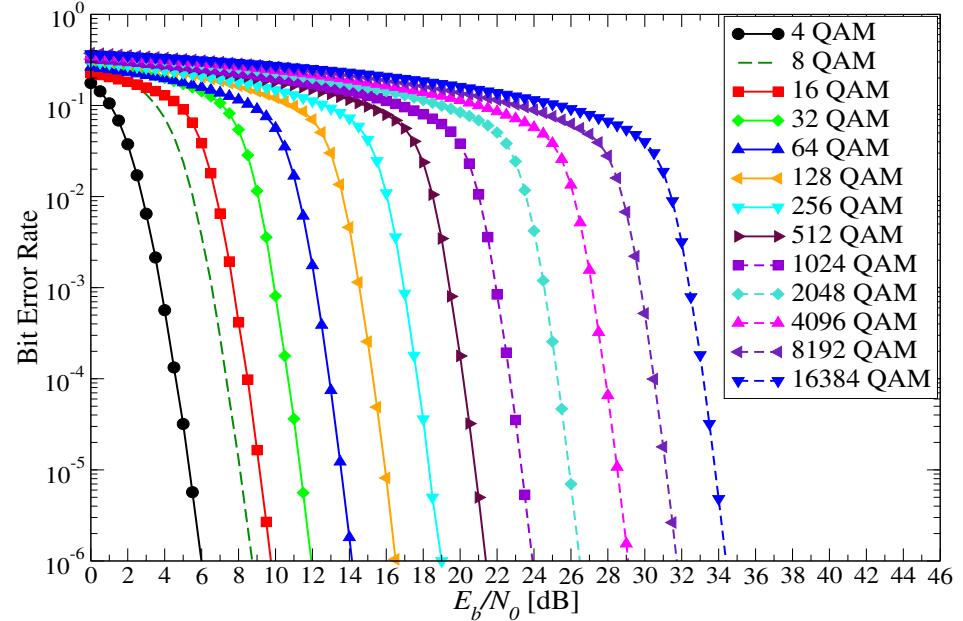
- Algoritmo di mapping a basso costo computazionale
- Rate variabile da 19.2 kbit/s a 172.8 kbit/s su banda da 16 kHz
- Rate variabile da 9.6 kbit/s a 86.4 kbit/s su bande da 8 kHz



Singola portante: prestazioni



Codice a 8 stati



Codice a 16 stati

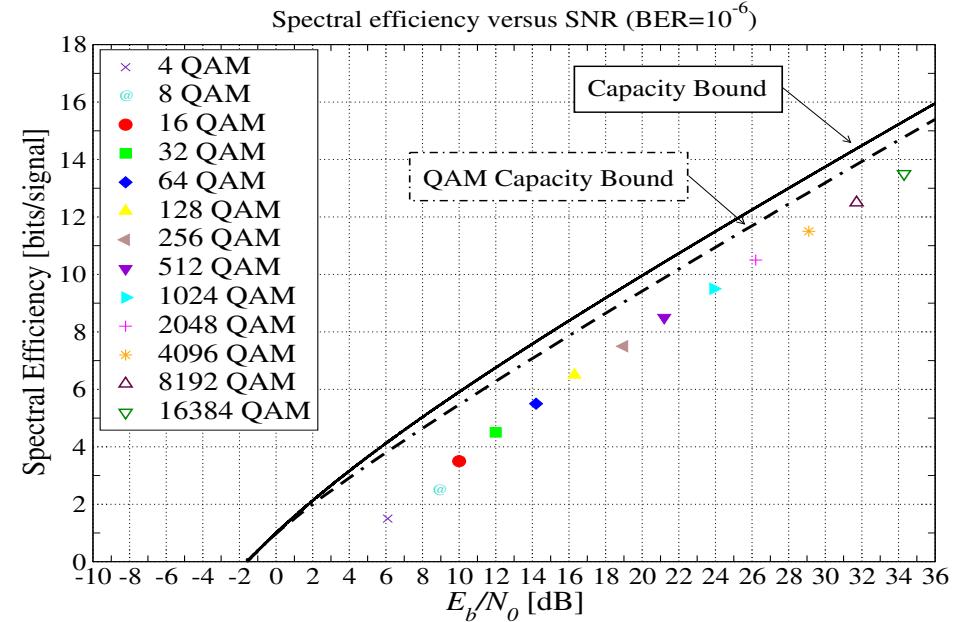
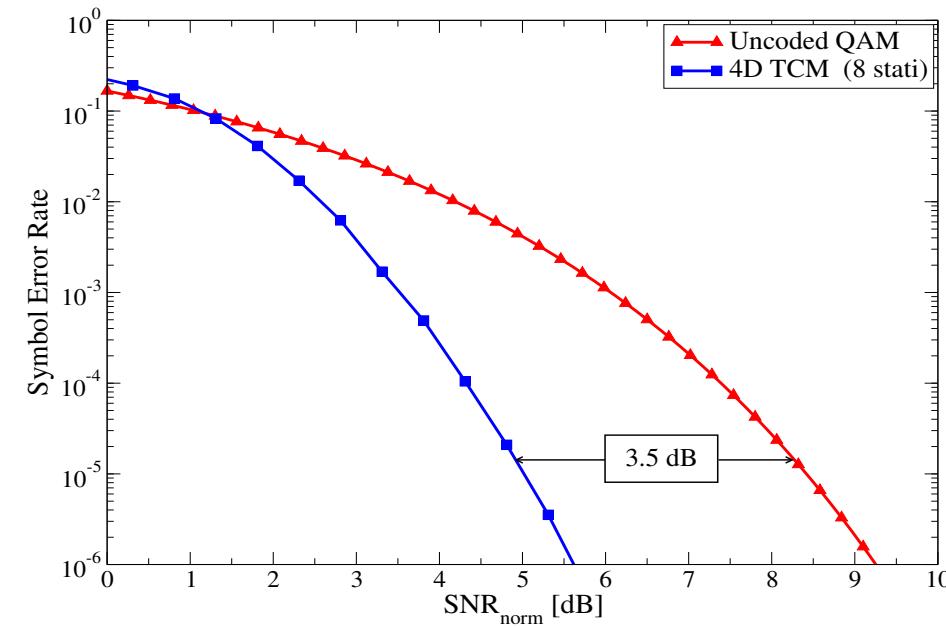
- Guadagno di codifica: definizione di

$$\text{SNR}_{\text{norm}} = \frac{E_s/N_0}{2R - 1}$$

- R è numero di bit di informazione trasmessi per simbolo QAM



Singola portante: prestazioni



- Guadagno di codifica $\gamma_c = 3.5$ dB per codice 8 stati
- Circa 3 dB dalla capacità di canale vincolata a QAM
- Asintoticamente circa 5 dB dalla capacità di canale
- Compromesso tra capacità di correzione e semplicità realizzativa



Singola portante: ottimizzazioni

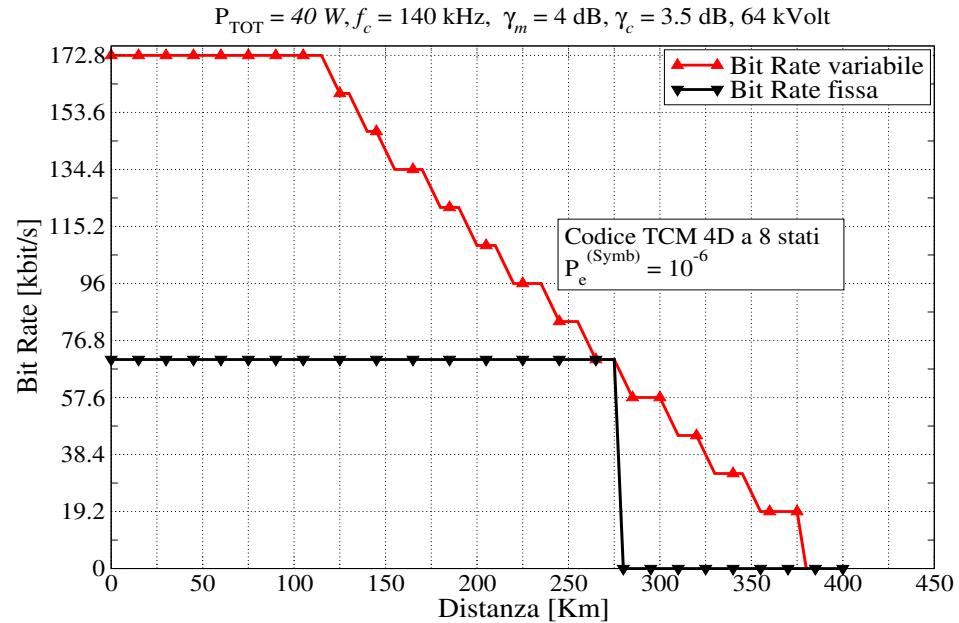
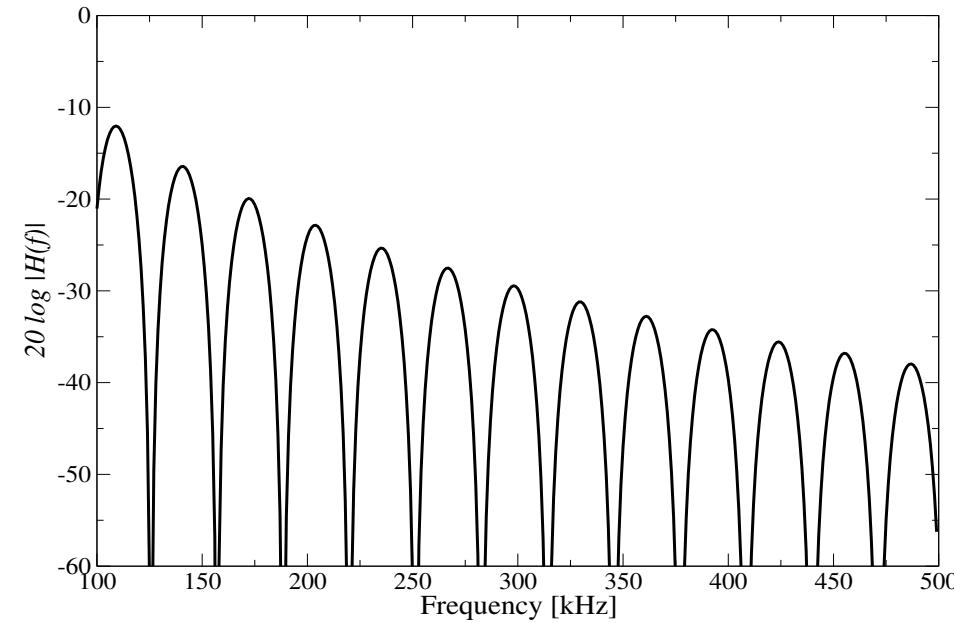
- Carico computazionale espresso in Mips

	8 kHz		16 kHz	
	Coder	DeCoder	Coder	DeCoder
2D TCM 64 QAM	0,6	33,6	1,3	67,3
4D TCM 64 QAM \Rightarrow	0,8	17,3	1,7	34,6
4D TCM 16 QAM (ottimizzato)	0,7	15,9	1,5	31,9
4D TCM 4096 QAM (ricorsivo)	1,1	106,8	2,3	213,7
4D TCM 4096 QAM (standard)	1,1	80,4	2,3	160,9
4D TCM 4096 QAM (ottimizzato)	1,1	26,1	2,3	52,3

- Ottimizzazione del codice per l'algoritmo di demapping:
utilizzo di look-up table
- Suddivisione della costellazione in quadranti con al più 4 punti
- Associazione univoca dei bit liberi per ciascuno dei 4 punti



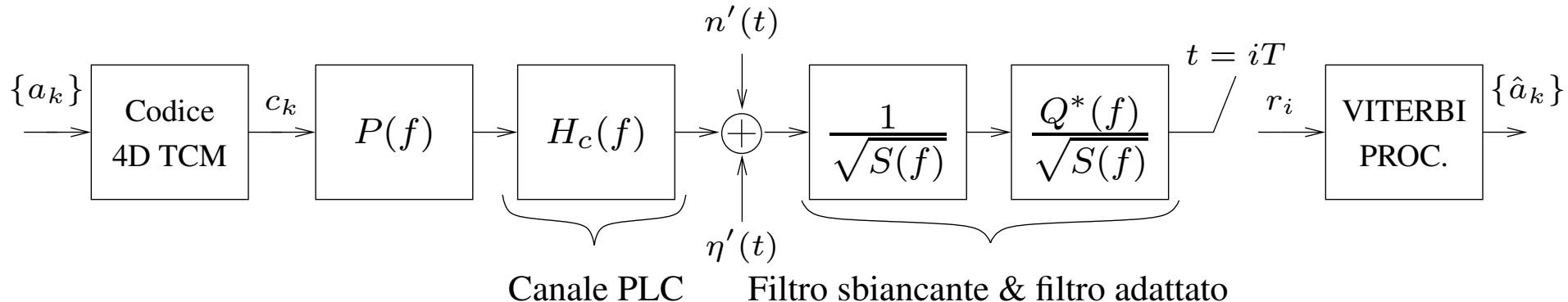
Singola portante: prestazioni



- L'elettrodotto operante a 64 kV
- Coefficiente di attenuazione $\alpha = 0.14 \text{ dB/km}$
- Potenza di rumore su banda di 4 kHz pari a -36 dBm
- Frequenza di portante $f_c = 140 \text{ kHz}$ e frequenza di simbolo $f_s = 12.800$ simboli al secondo



Singola portante: rumore colorato



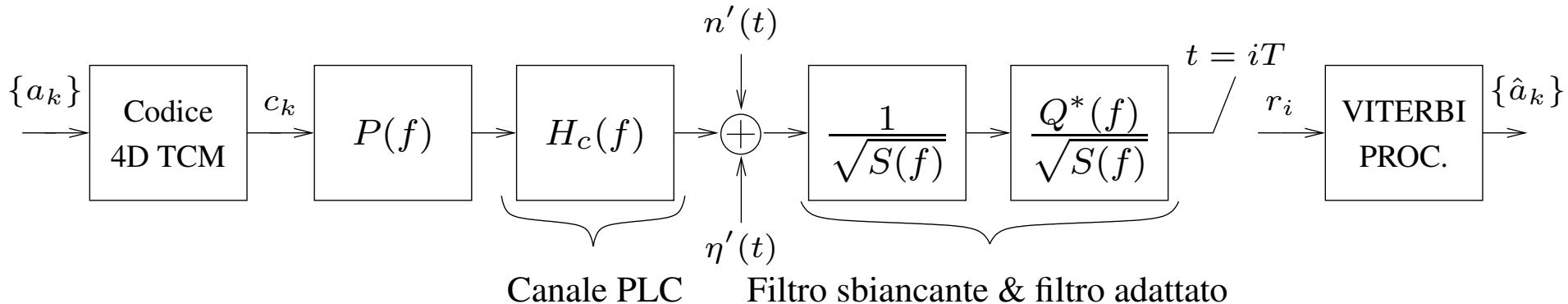
- I sistemi di trasmissione ad onda convogliata su singola portante sono limitati da rumore colorato

$$S(f) = S_{\eta'}(f) + S_{n'}(f)$$

- Obiettivo: introdurre nel modem commerciale la capacità di compensare il rumore colorato
- Vincolo: ridotta capacità di calcolo disponibile
- Vincolo: lasciare inalterata la parte di elaborazione analogica



Singola portante: rumore colorato



● Strategia di rivelazione MAP

$$\hat{\mathbf{a}} = \operatorname{argmax}_{\mathbf{a}} p(\mathbf{r}|\mathbf{a})P\{\mathbf{a}\}$$

$$= \operatorname{argmax}_{\mathbf{a}} \prod_{k=0}^{K-1} p(R_k | \mathbf{R}_0^{k-1}, \mathbf{a}_0^k) P\{a_k\}$$

$$\simeq \operatorname{argmax}_{\mathbf{a}} \prod_{k=0}^{K-1} p(r_{2k} | \mathbf{r}_{2k-2-\nu}^{2k-1}, a_k, \zeta_k) \cdot p(r_{2k-1} | \mathbf{r}_{2k-2-\nu}^{2k-2}, a_k, \zeta_k) P\{a_k\}$$

● Definizione di stato $\zeta_k = (\mu_k, C_{k-1}, C_{k-2}, C_{k-3}, \dots, C_{k-(L+\nu)/2})$



Singola portante: rumore colorato

- Fattorizzazione in 2 pdf complesse Gaussiane con medie condizionate e varianze condizionate

$$\begin{aligned}\hat{r}_{2k} &= E \left\{ r_{2k} \mid \mathbf{r}_{2k-2-\nu}^{2k-1}; a_k, \zeta_k \right\} & \hat{\sigma}_{r_{2k}}^2 &= E \left\{ |r_{2k} - \hat{r}_{2k}|^2 \mid \mathbf{r}_{2k-2-\nu}^{2k-1} a_k, \zeta_k \right\} \\ \hat{r}_{2k-1} &= E \left\{ r_{2k-1} \mid \mathbf{r}_{2k-2-\nu}^{2k-2}; a_k, \zeta_k \right\} & \hat{\sigma}_{r_{2k-1}}^2 &= E \left\{ |r_{2k-1} - \hat{r}_{2k-1}|^2 \mid \mathbf{r}_{2k-2-\nu}^{2k-2}; a_k, \zeta_k \right\}\end{aligned}$$

- \hat{r}_{2k} e \hat{r}_{2k-1} possono essere interpretate, rispettivamente, come le stime lineari di r_{2k} e r_{2k-1} , e $\hat{\sigma}_{r_{2k}}^2$ insieme a $\hat{\sigma}_{r_{2k-1}}^2$ come i relativi errori quadratici medi di predizione (MSPE)
- Metriche di ramo

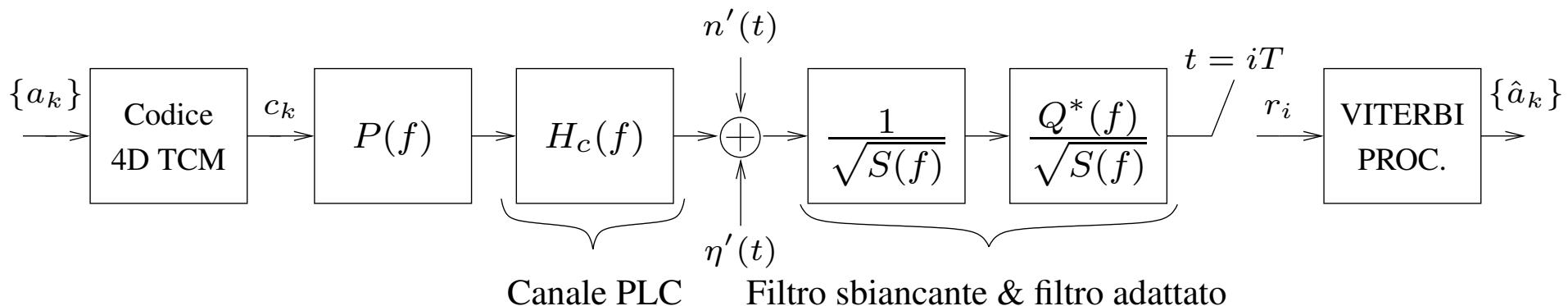
$$\lambda_k(a_k, \zeta_k) = \sum_{i=0}^1 \left\{ \frac{|r_{2k-i} - \hat{r}_{2k-i}|^2}{\hat{\sigma}_{r_{2k-i}}^2} + \ln \hat{\sigma}_{r_{2k-i}}^2 \right\}.$$



Singola portante: RSSD

Q	ν	S	S'
1	2	$8 \times (2^7)^1 = 1024$	$8 \times 8 = 64$
2	4	$8 \times (2^7)^2 = 131072$	$8 \times 8^2 = 512$
3	6	$8 \times (2^7)^3 = 16777216$	$8 \times 8^3 = 4096$
4	8	$8 \times (2^7)^4 = 2147483648$	$8 \times 8^4 = 32768$

- Lo stadio di ingresso è molto complesso e richiede elevata adattatività e perfetta conoscenza del canale

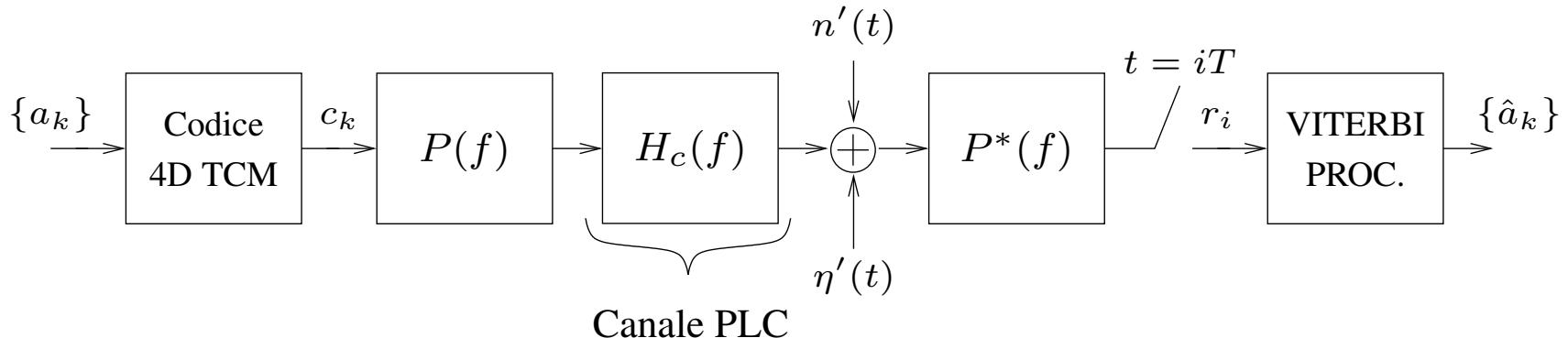




Singola portante: RSSD

Q	ν	S	S'
1	2	$8 \times (2^7)^1 = 1024$	$8 \times 8 = 64$
2	4	$8 \times (2^7)^2 = 131072$	$8 \times 8^2 = 512$
3	6	$8 \times (2^7)^3 = 16777216$	$8 \times 8^3 = 4096$
4	8	$8 \times (2^7)^4 = 2147483648$	$8 \times 8^4 = 32768$

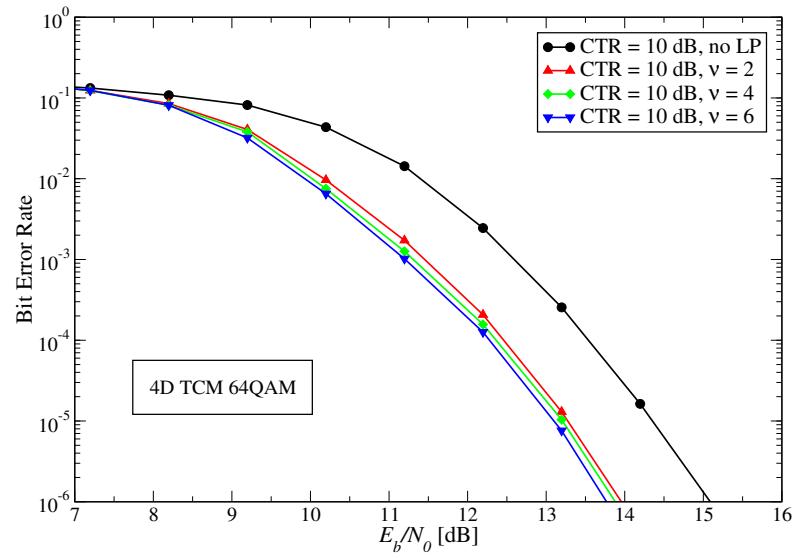
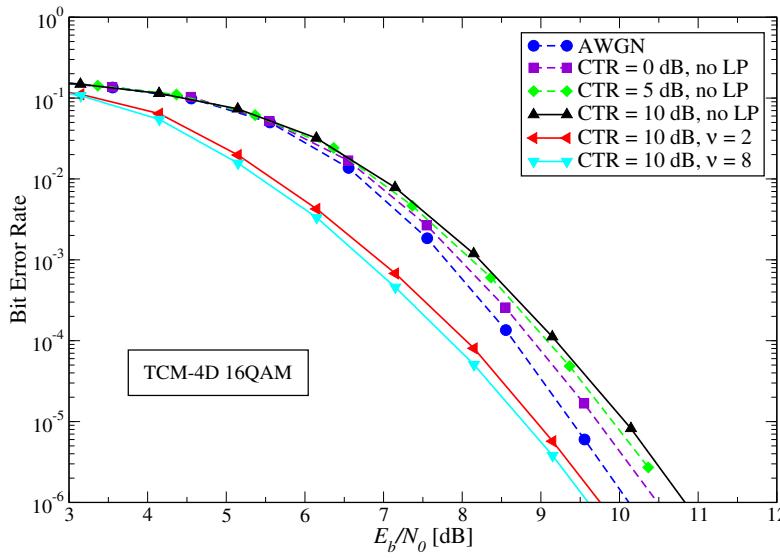
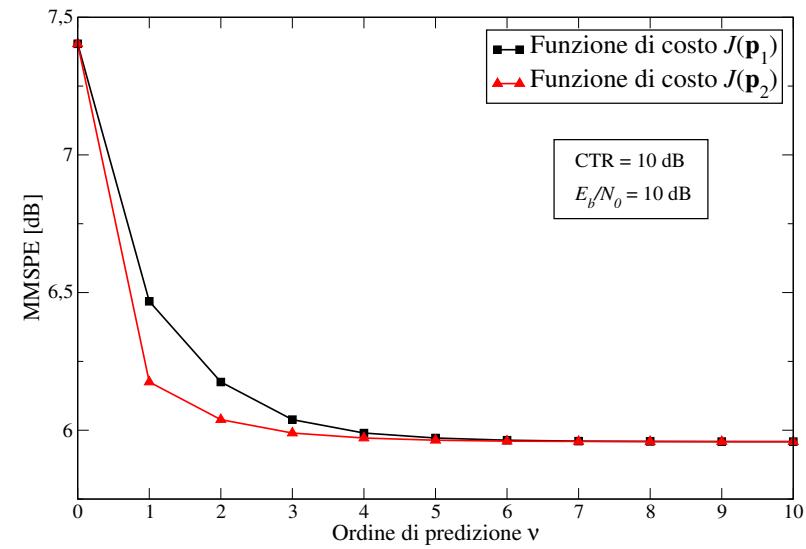
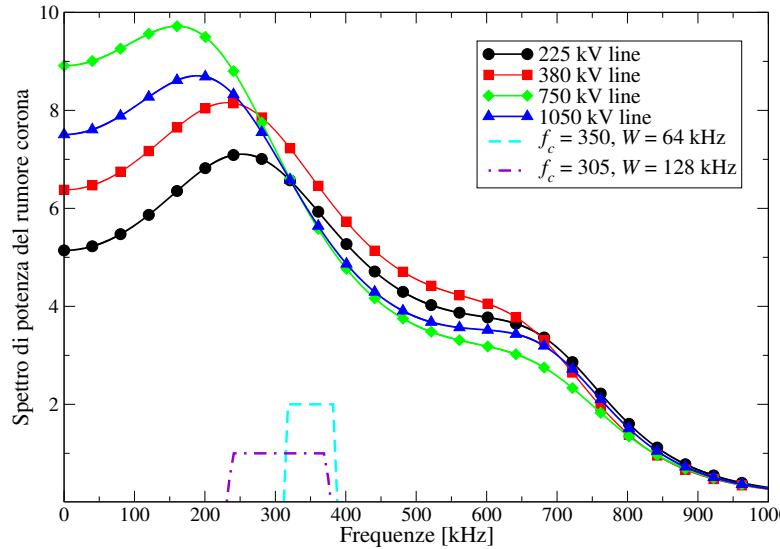
- Realizzazione pratica del ricevitore



- La complessità è spostata interamente all'interno del ricevitore (su DSP)



Singola portante: rumore corona



- “Corona-to-Thermal noise power Ratio”: $\text{CTR} = \sigma_n^2 / \sigma_\eta^2$



Sistema multiportante Selta

- Modem di “terza generazione” caratterizzato da elevati livelli di programmabilità, adattabilità alle condizioni della linea e flessibilità.



Sistema multiportante Selta

- Modem di “terza generazione” caratterizzato da elevati livelli di programmabilità, adattabilità alle condizioni della linea e flessibilità.
- Studio di fattibilità di un sistema di trasmissione digitale a larga banda su elettrodotti basato sulle tecnologie OFDM e DMT (Discrete MultiTone).



Sistema multiportante Selta

- Modem di “terza generazione” caratterizzato da elevati livelli di programmabilità, adattabilità alle condizioni della linea e flessibilità.
- Studio di fattibilità di un sistema di trasmissione digitale a larga banda su elettrodotti basato sulle tecnologie OFDM e DMT (Discrete MultiTone).
- Progetto di massima di un modem digitale tenendo conto di:
 - normative esistenti (banda disponibile e potenza consentita)
 - caratteristiche dei dispositivi di accoppiamento (elevato costo, difficoltà nella sostituzione).



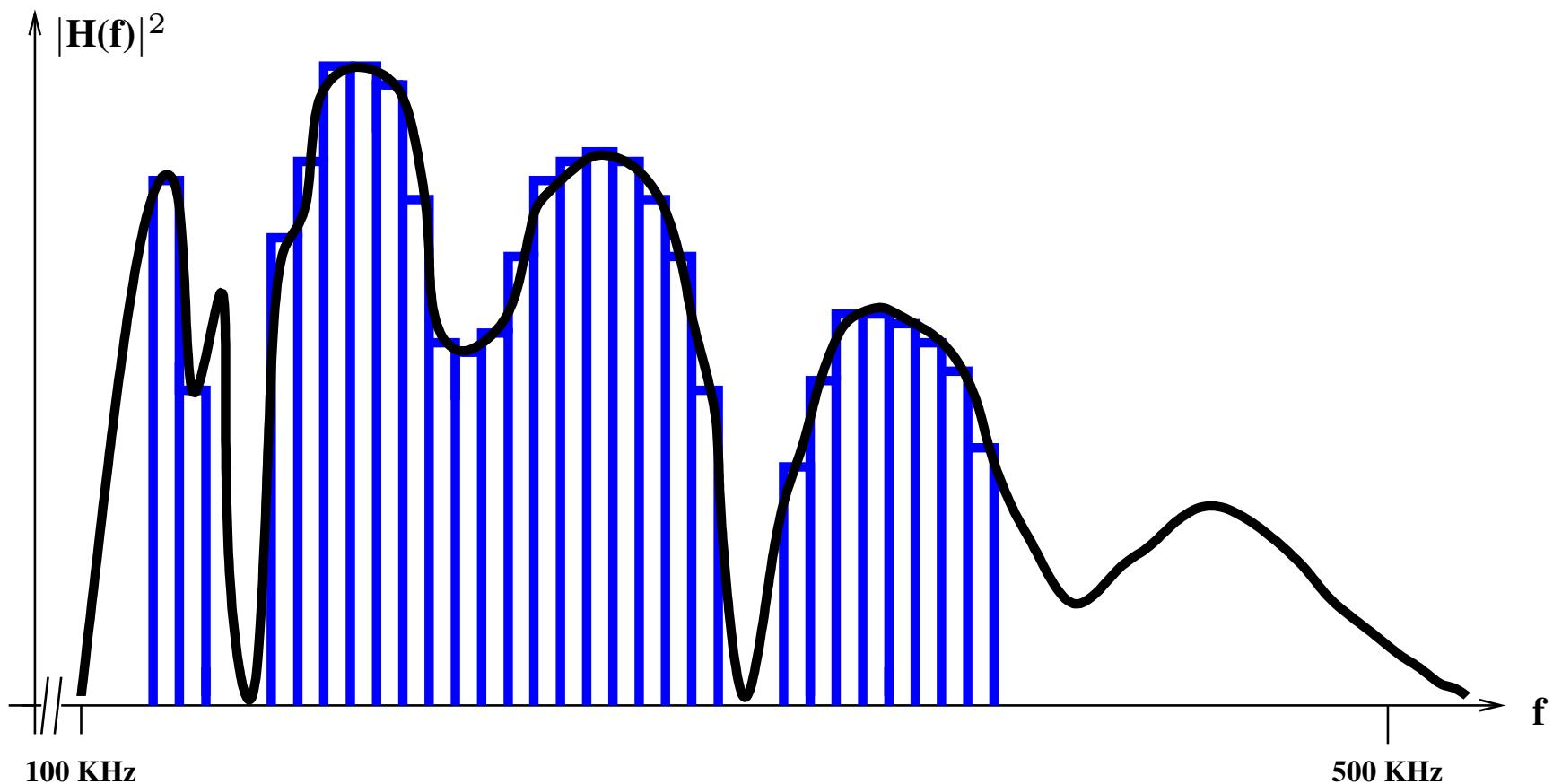
Sistema multiportante Selta

- Modem di “terza generazione” caratterizzato da elevati livelli di programmabilità, adattabilità alle condizioni della linea e flessibilità.
- Studio di fattibilità di un sistema di trasmissione digitale a larga banda su elettrodotti basato sulle tecnologie OFDM e DMT (Discrete MultiTone).
- Progetto di massima di un modem digitale tenendo conto di:
 - normative esistenti (banda disponibile e potenza consentita)
 - caratteristiche dei dispositivi di accoppiamento (elevato costo, difficoltà nella sostituzione).
- Utilizzo di algoritmi efficienti ed ottimizzati per realizzazione su DSP



Sistema multiportante: motivazioni

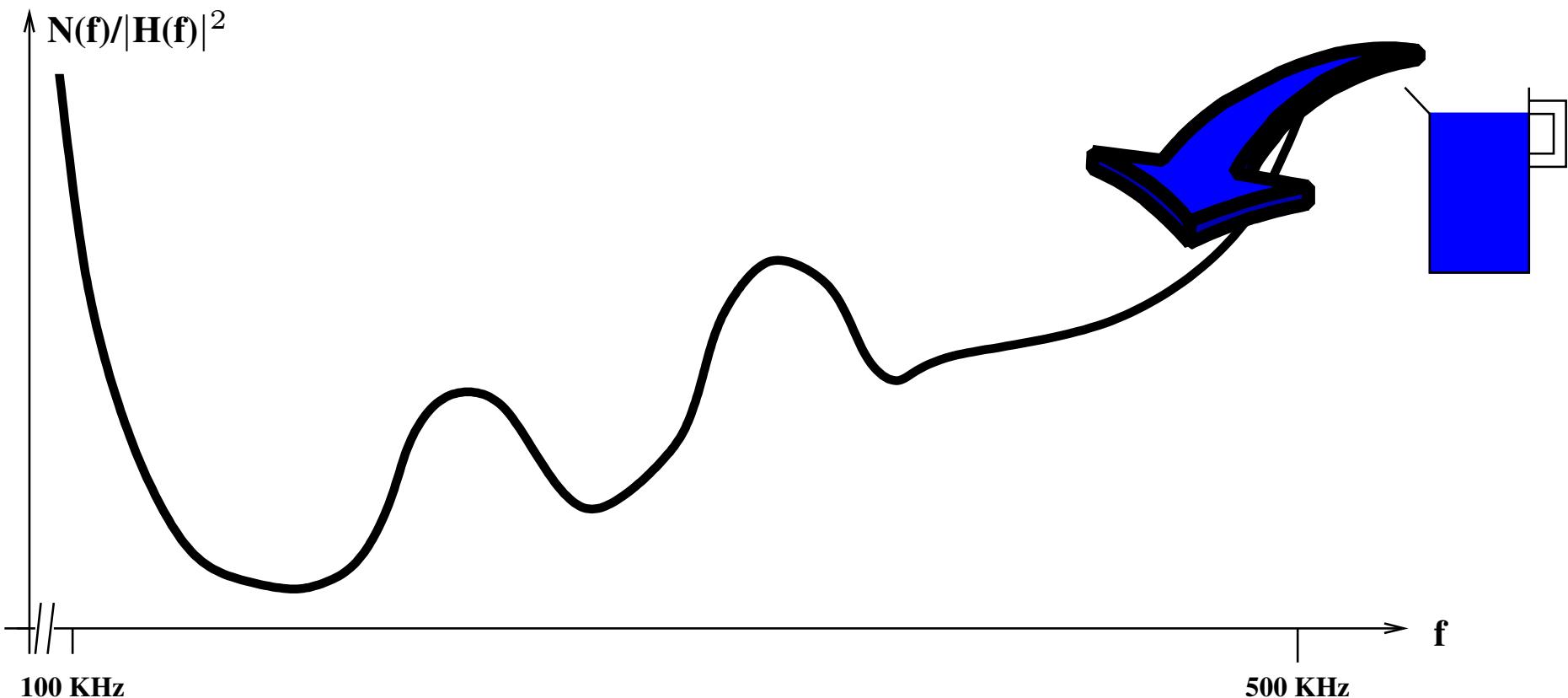
- Obiettivo: massimizzare la quantità di informazione trasferibile.





Sistema multiportante: motivazioni

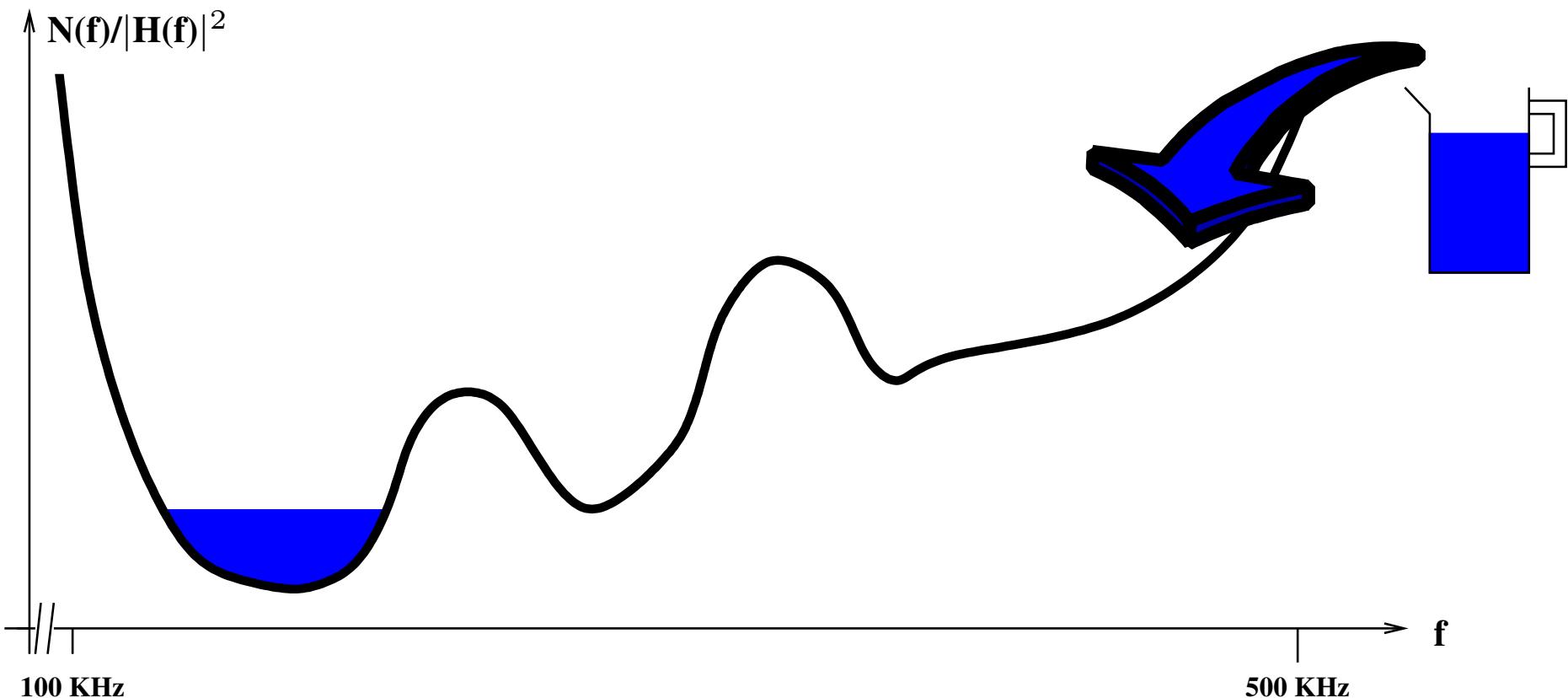
- Soluzione: allocazione ottimale della potenza da trasmettere (water-filling).





Sistema multiportante: motivazioni

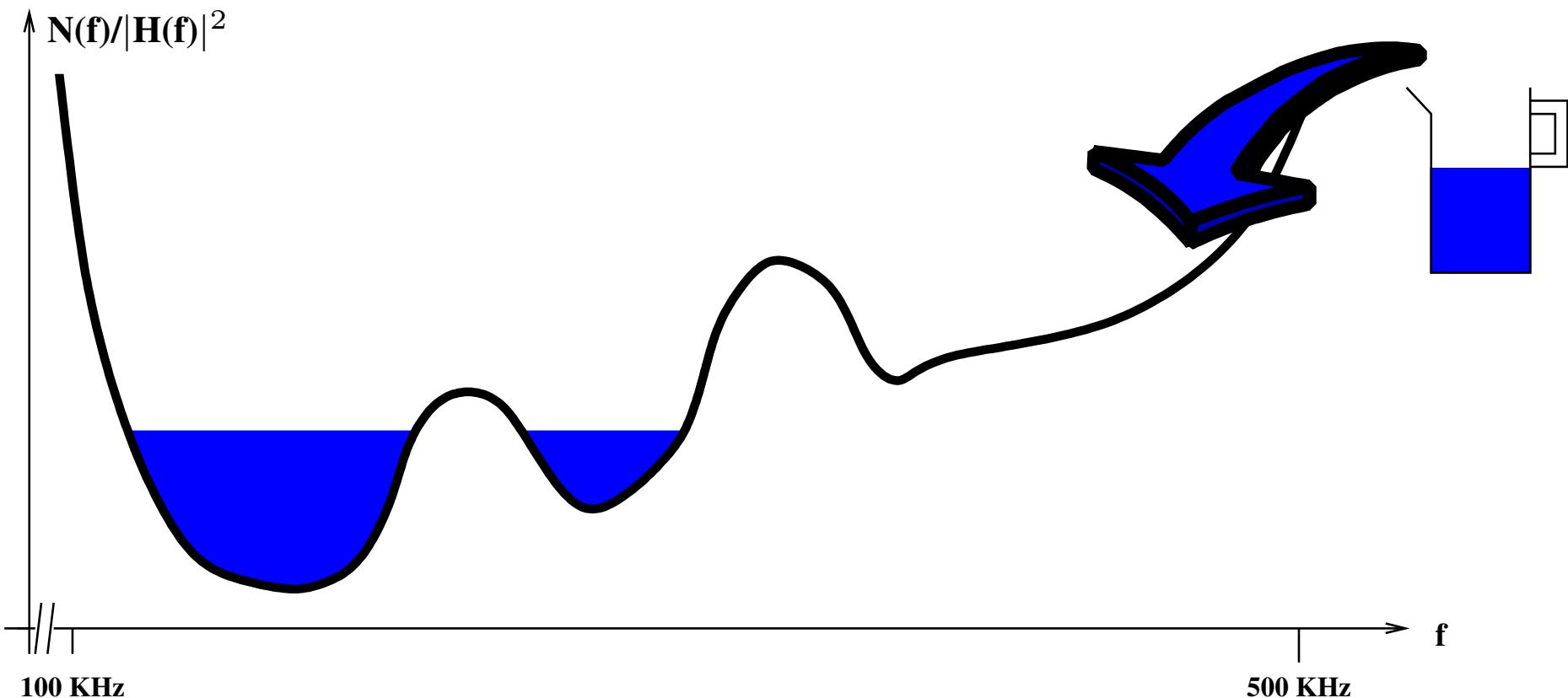
- Soluzione: allocazione ottimale della potenza da trasmettere (water-filling).





Sistema multiportante: motivazioni

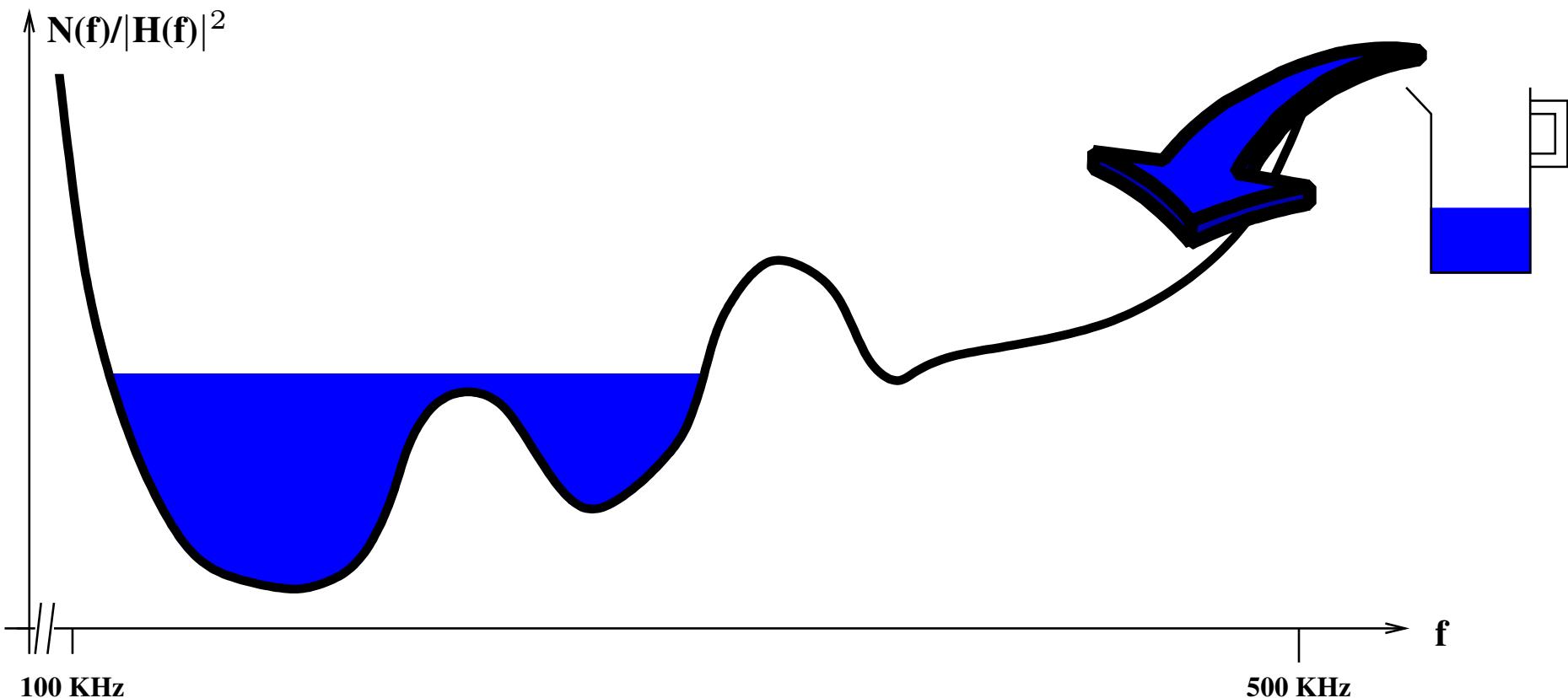
- Soluzione: allocazione ottimale della potenza da trasmettere (water-filling).





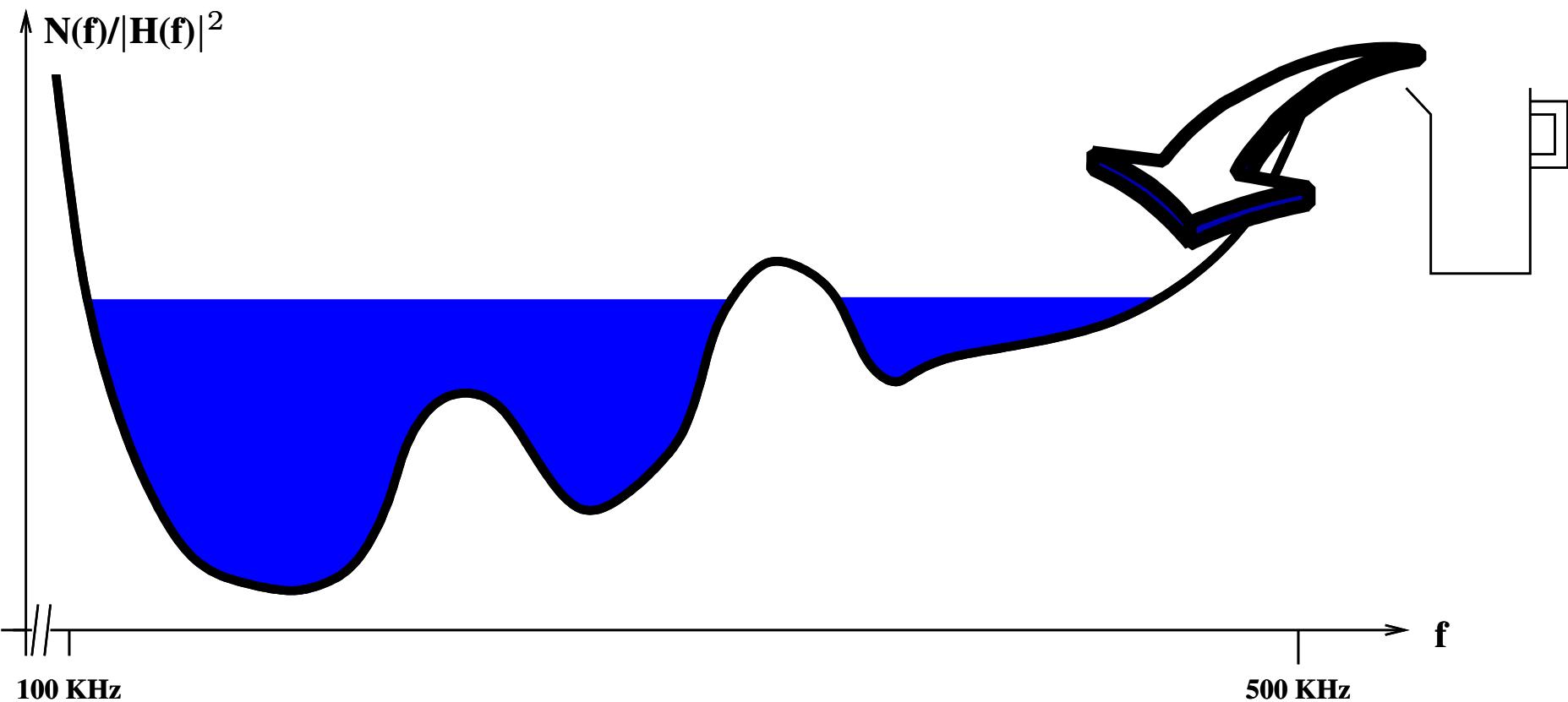
Sistema multiportante: motivazioni

- Soluzione: allocazione ottimale della potenza da trasmettere (water-filling).



Sistema multiportante: motivazioni

- Soluzione: allocazione ottimale della potenza da trasmettere (water-filling).

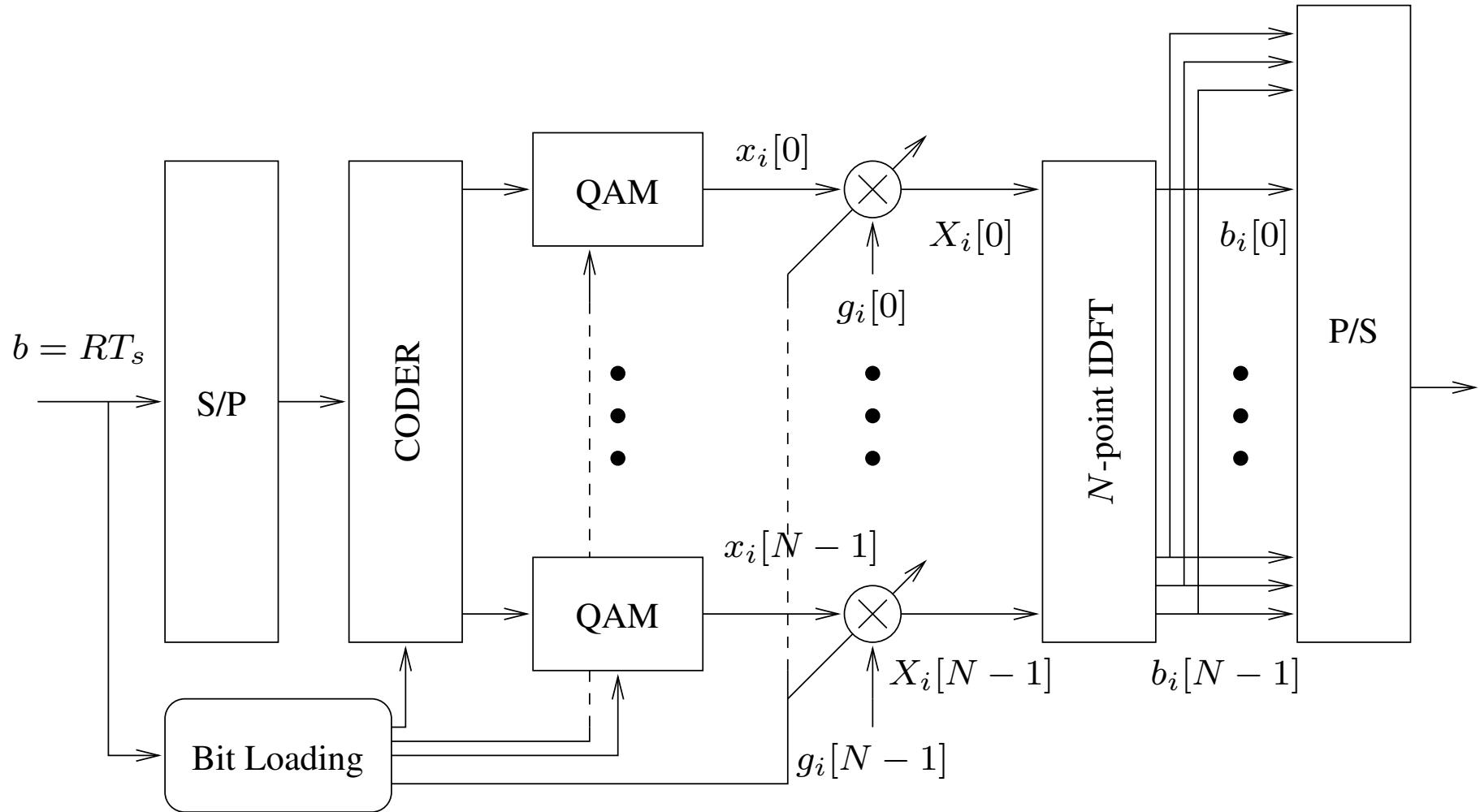


- Realizzazione: determinare la potenza di trasmissione ed il numero di bit per ogni canale (bit-loading).



Sistema DMT: schema a blocchi

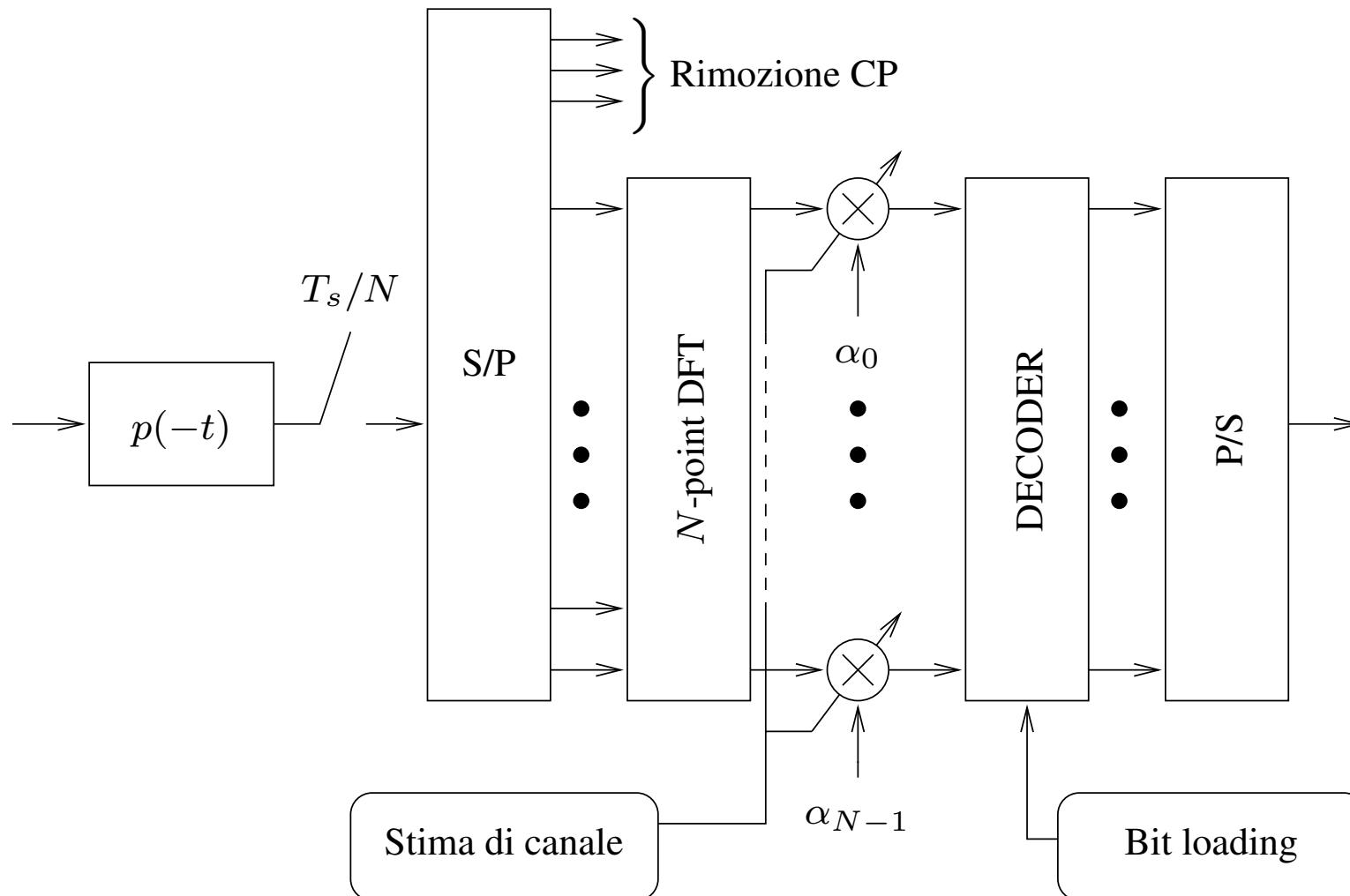
- L'operazione di modulazione e demodulazione avviene in ambito numerico, utilizzando algoritmi veloci di Fourier (FFT).





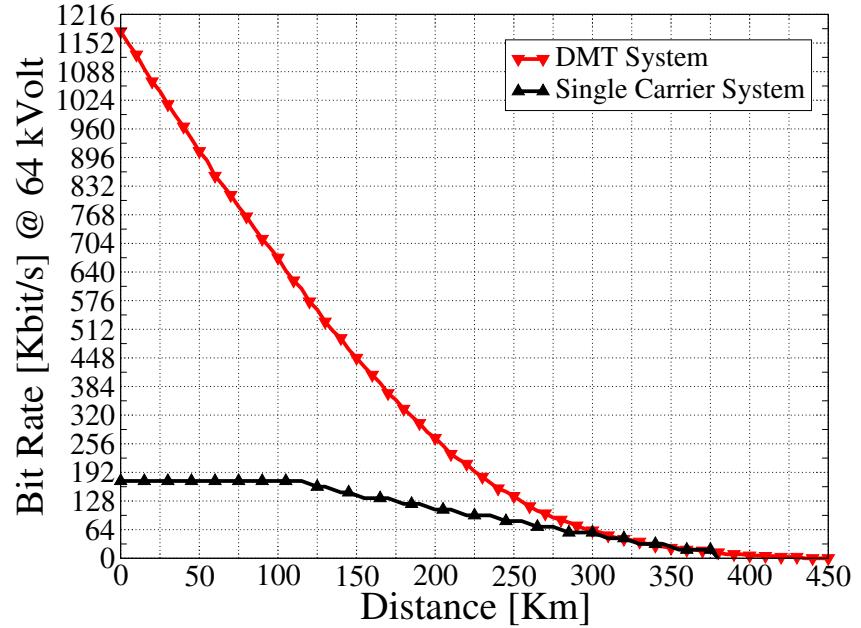
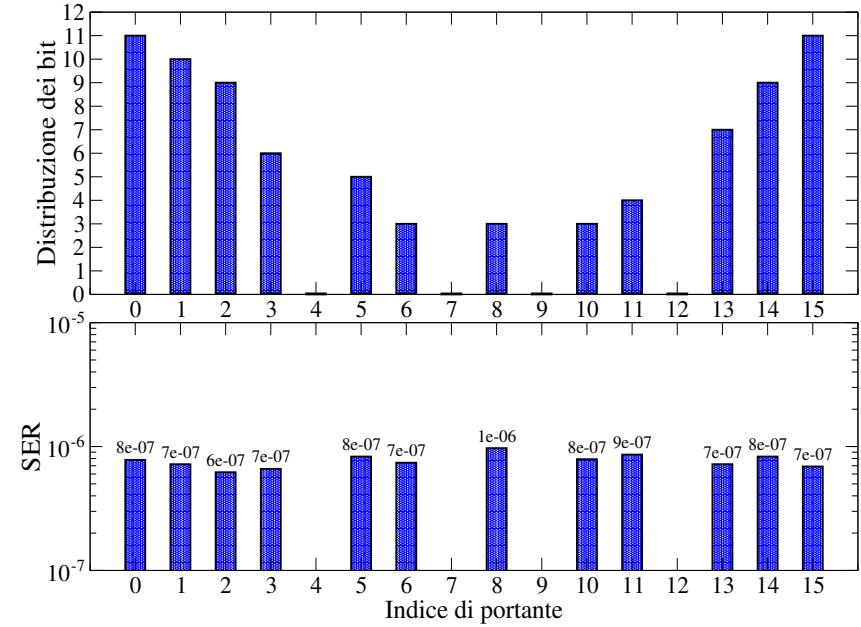
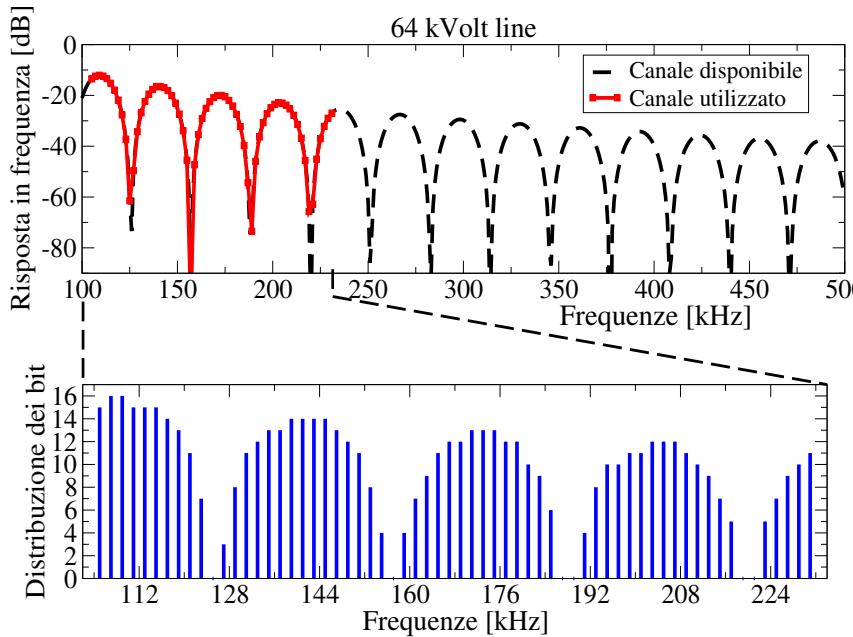
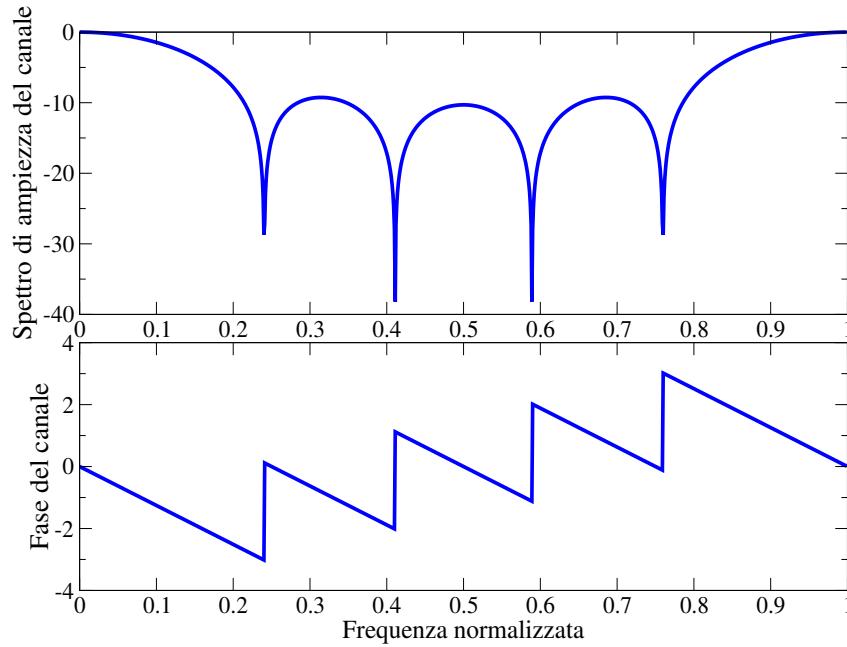
Sistema DMT: schema a blocchi

- L'operazione di modulazione e demodulazione avviene in ambito numerico, utilizzando algoritmi veloci di Fourier (FFT).



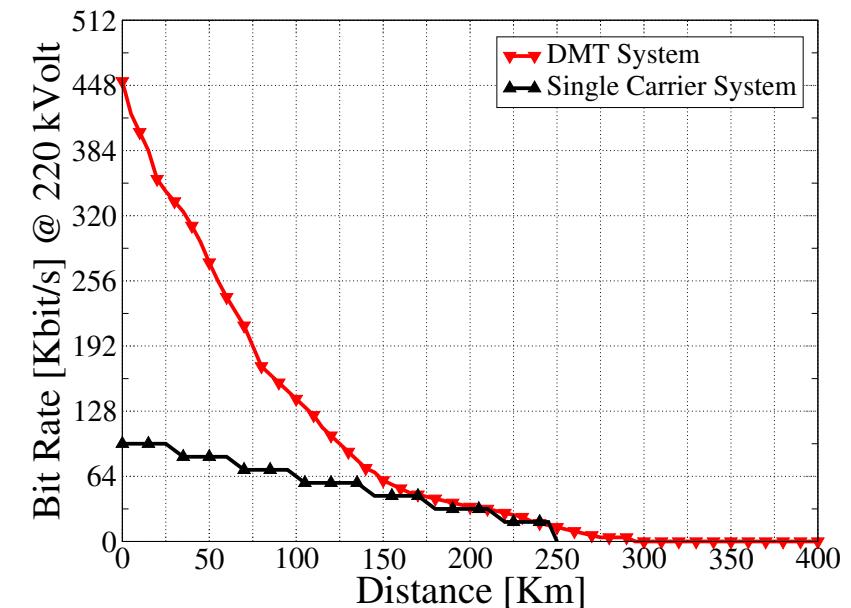
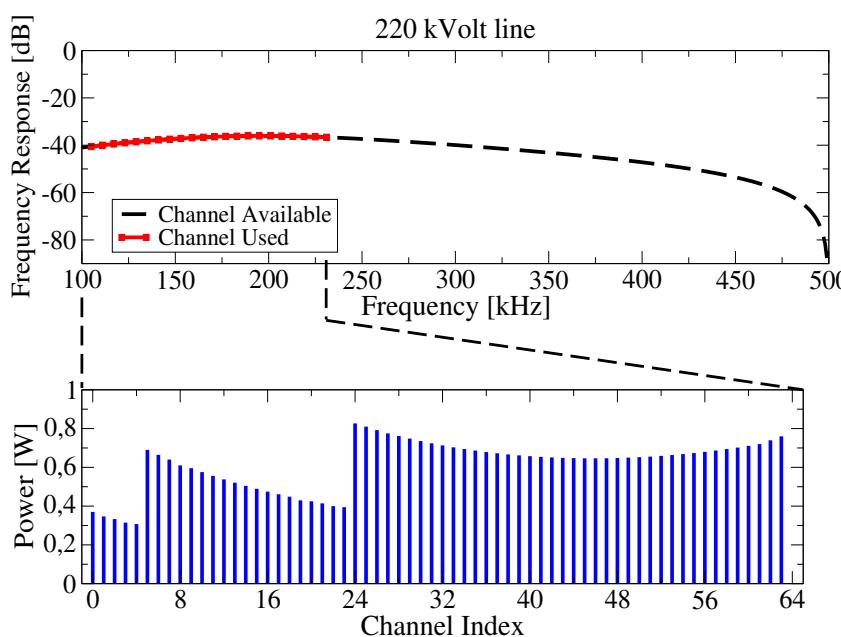
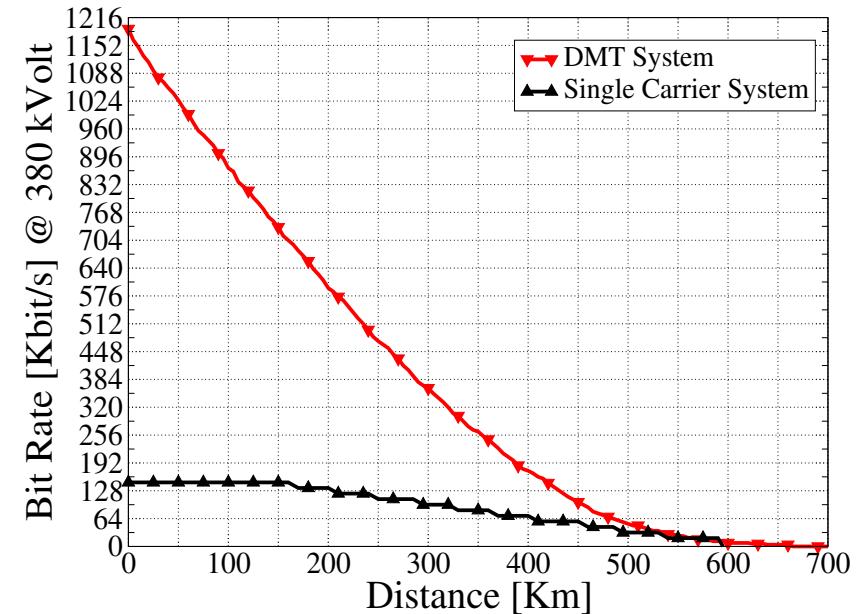
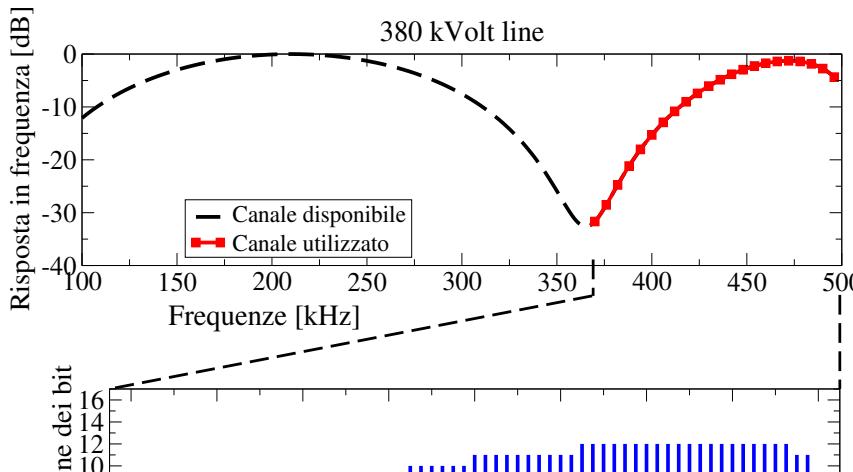


Sistema DMT: risultati numerici



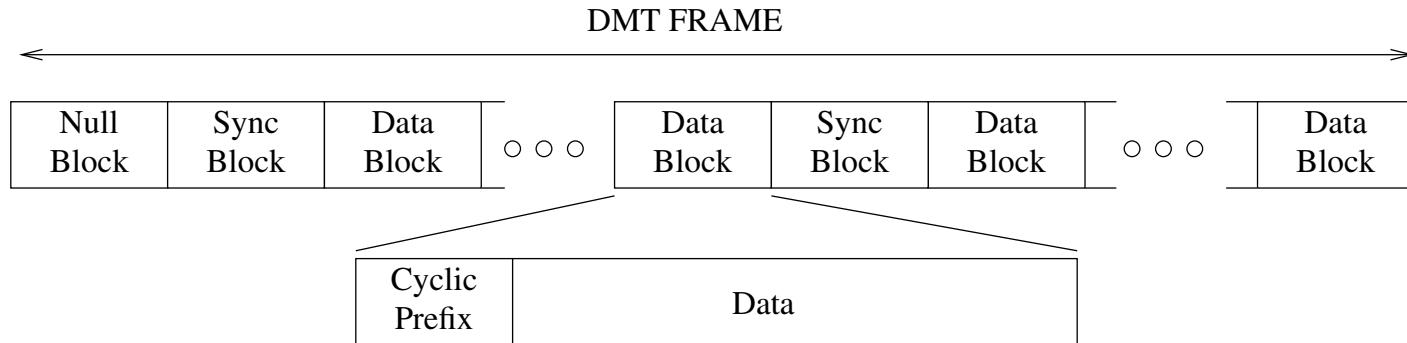


Sistema DMT: risultati numerici





Sistema DMT: sincronismo di simbolo



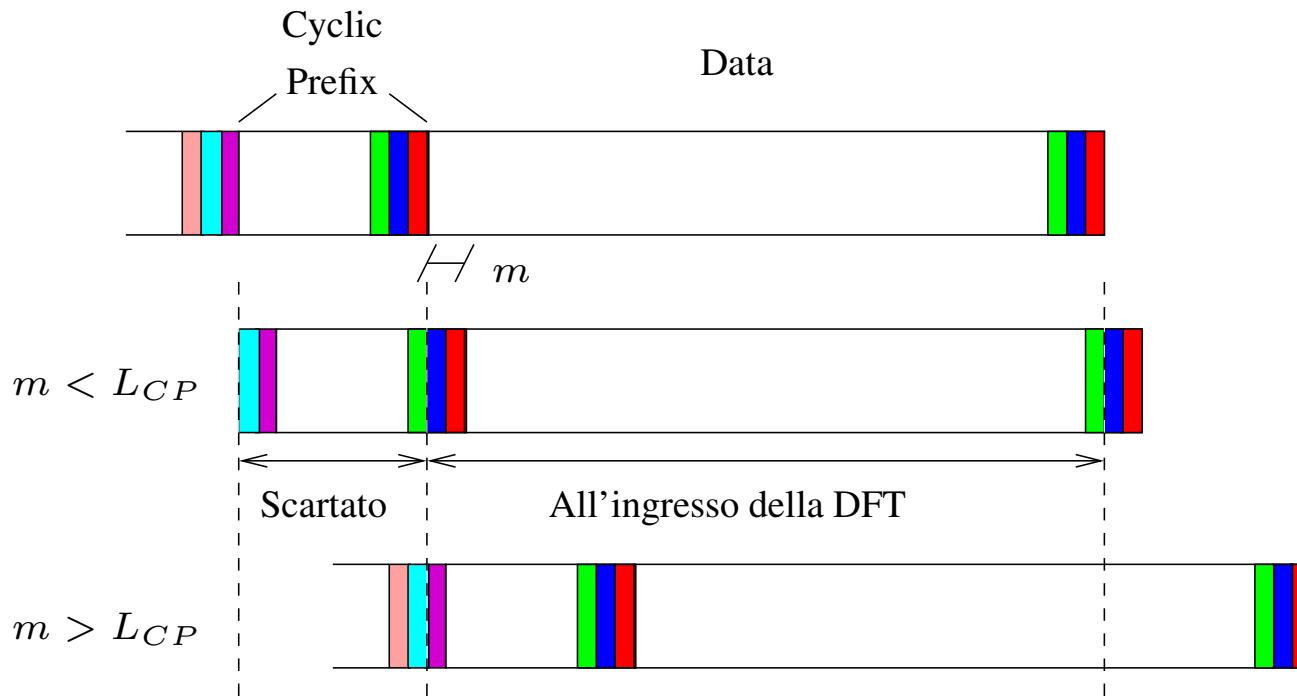
- Dentro ogni frame, occorre individuare l'inizio dei pacchetti
- L'intervallo di guardia garantisce robustezza ad errori di allineamento di pacchetto
- Se l'errore di allineamento m è inferiore alla durata del prefisso ciclico

$$r[(n - m)_N] \rightarrow R[k]e^{-j2\pi km/N}$$

il ritardo è compensabile attraverso una derotazione dei campioni (operazione svolta dal FEQ)



Sistema DMT: sincronismo di simbolo



- Se l'errore di allineamento m è inferiore alla durata del prefisso ciclico

$$r[(n - m)_N] \rightarrow R[k]e^{-j2\pi km/N}$$

il ritardo è compensabile attraverso una derotazione dei campioni (operazione svolta dal FEQ)



Sistema DMT: sincronismo di simbolo

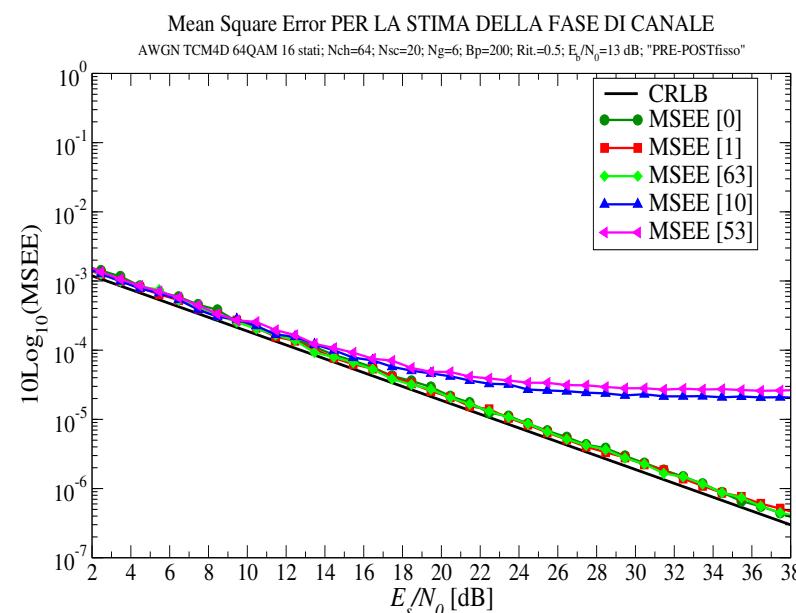
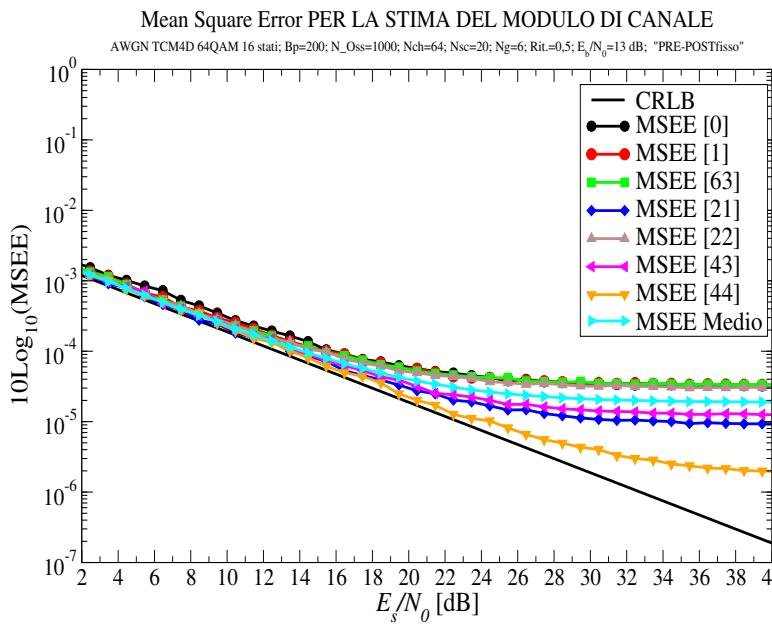
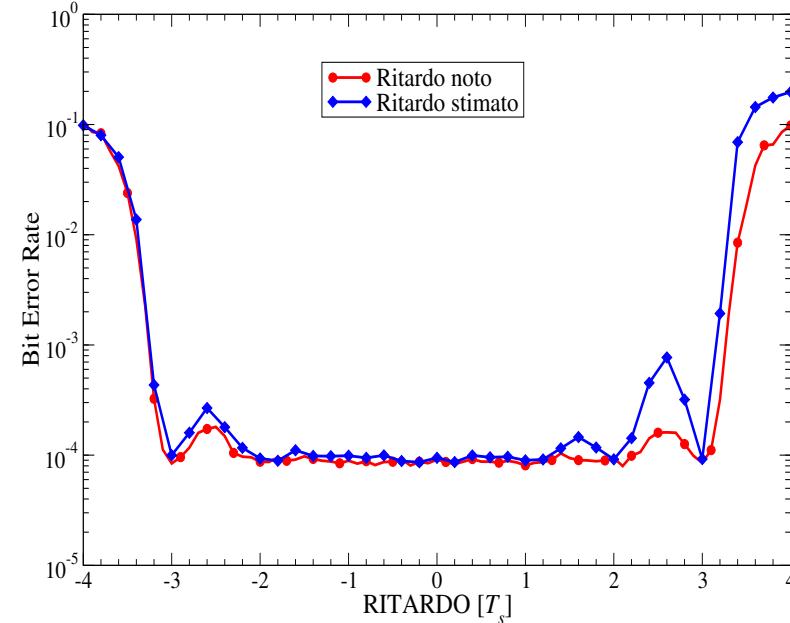
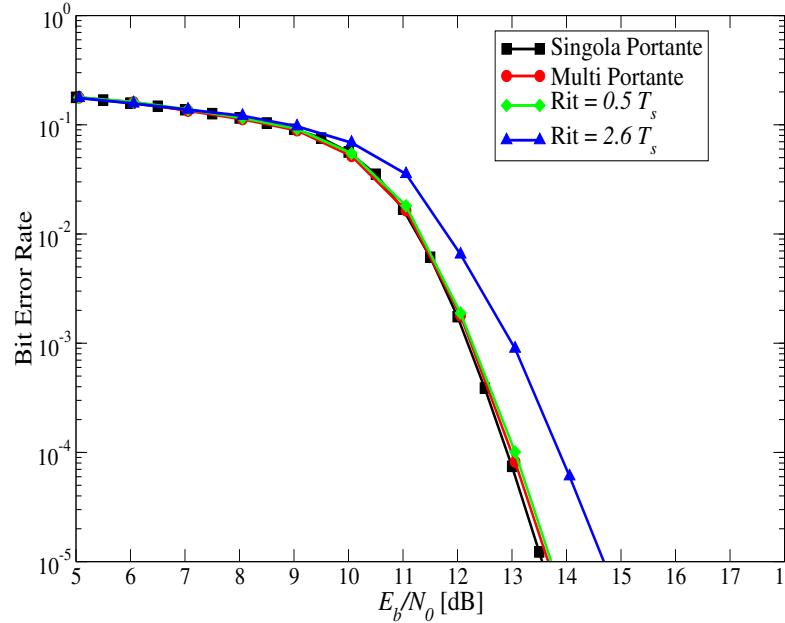
- Si è proposto un algoritmo di stima di canale basato sul criterio della massima verosimiglianza (ML)

$$\widehat{|H_c|}[i] = \left| \sum_{n=0}^{B_p-1} R_n[i] X_n^{(p)}[i] \right| / \sum_{n=0}^{B_p-1} |X_n^{(p)}[i]|^2$$
$$\widehat{\phi_c}[i] = \arg \left\{ \sum_{n=0}^{B_p-1} R_n[i] X_n^{(p)*}[i] \right\}$$

- Lo stimatore non è polarizzato
- La qualità di stima aumenta con il numero di simboli pilota trasmessi B_p
- Carico computazionale richiesto basso: sincronizzazione basata su simboli pilota



Sistema DMT: sincronismo di simbolo





Sistemi PLC: rumore impulsivo

- I sistemi di trasmissione ad onda convogliata sono affetti da rumore impulsivo
- Obiettivo: studio dei limiti fondamentali di trasmissione
- Metodo: analisi del tasso di informazione e delle prestazioni di probabilità d'errore
- Definizione di informazione media mutua

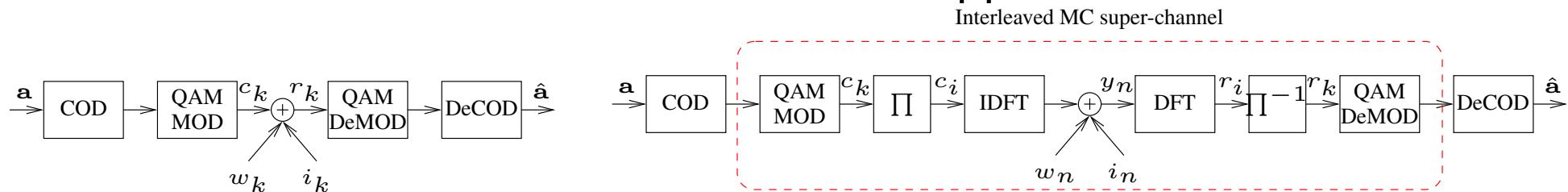
$$I(A; R) = h(R) - h(R|A)$$

- Proposto algoritmo simulativo basato su predizione lineare e tecniche di riduzione di complessità
 - algoritmo generale utilizzabile in presenza di qualunque tipo di rumore colorato e dipendente dai dati

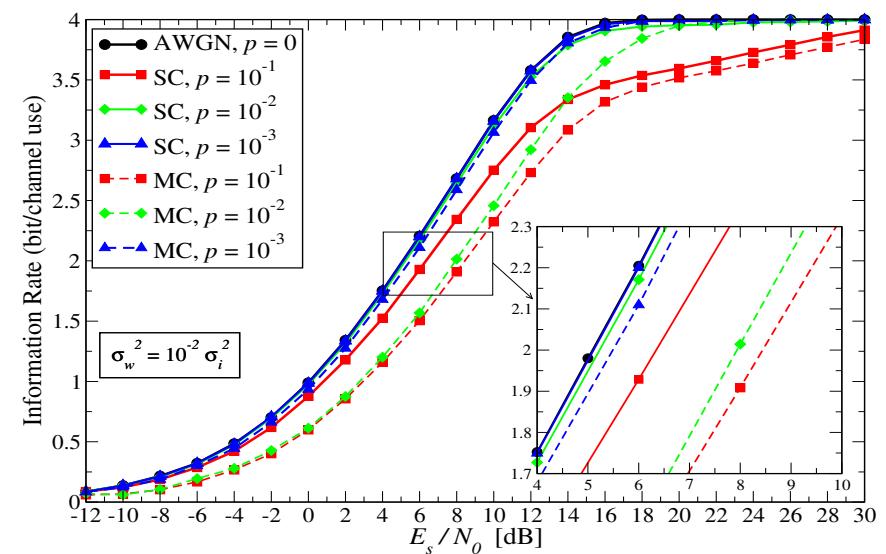
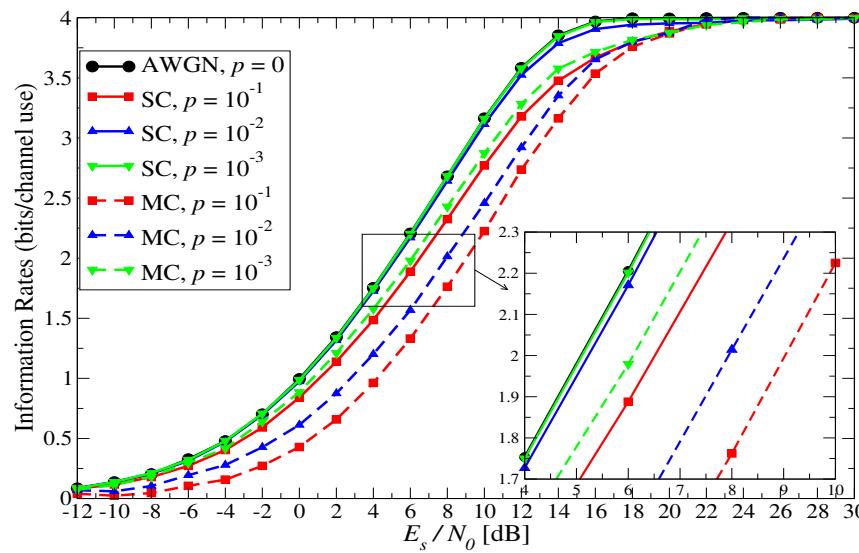


Sistemi PLC: rumore impulsivo

- Introduzione di 2 modelli di canale opportuni



- Studio di $I(A; R)$ in differenti condizioni di rumore

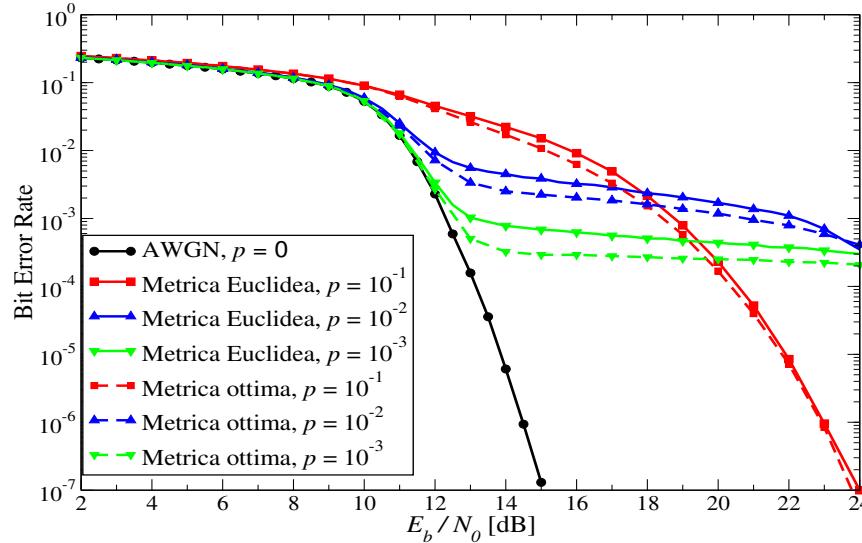


$$\sigma_w^2 = p \sigma_i^2$$

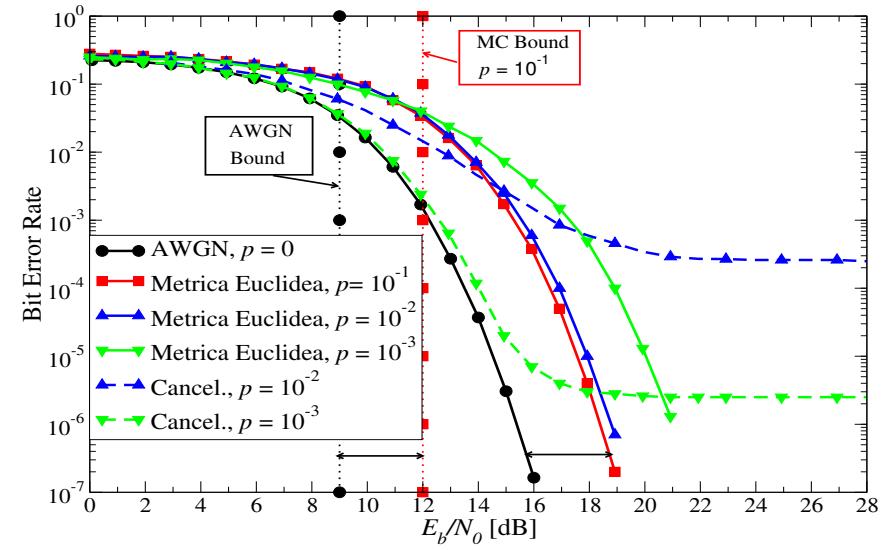
$$\sigma_w^2 = 10^{-2} \sigma_i^2$$

Sistemi PLC: rumore impulsivo

- Studio di tasso d'errore per sistemi SC e MC con differenti tipi di codifica



SC con codice 4D TCM



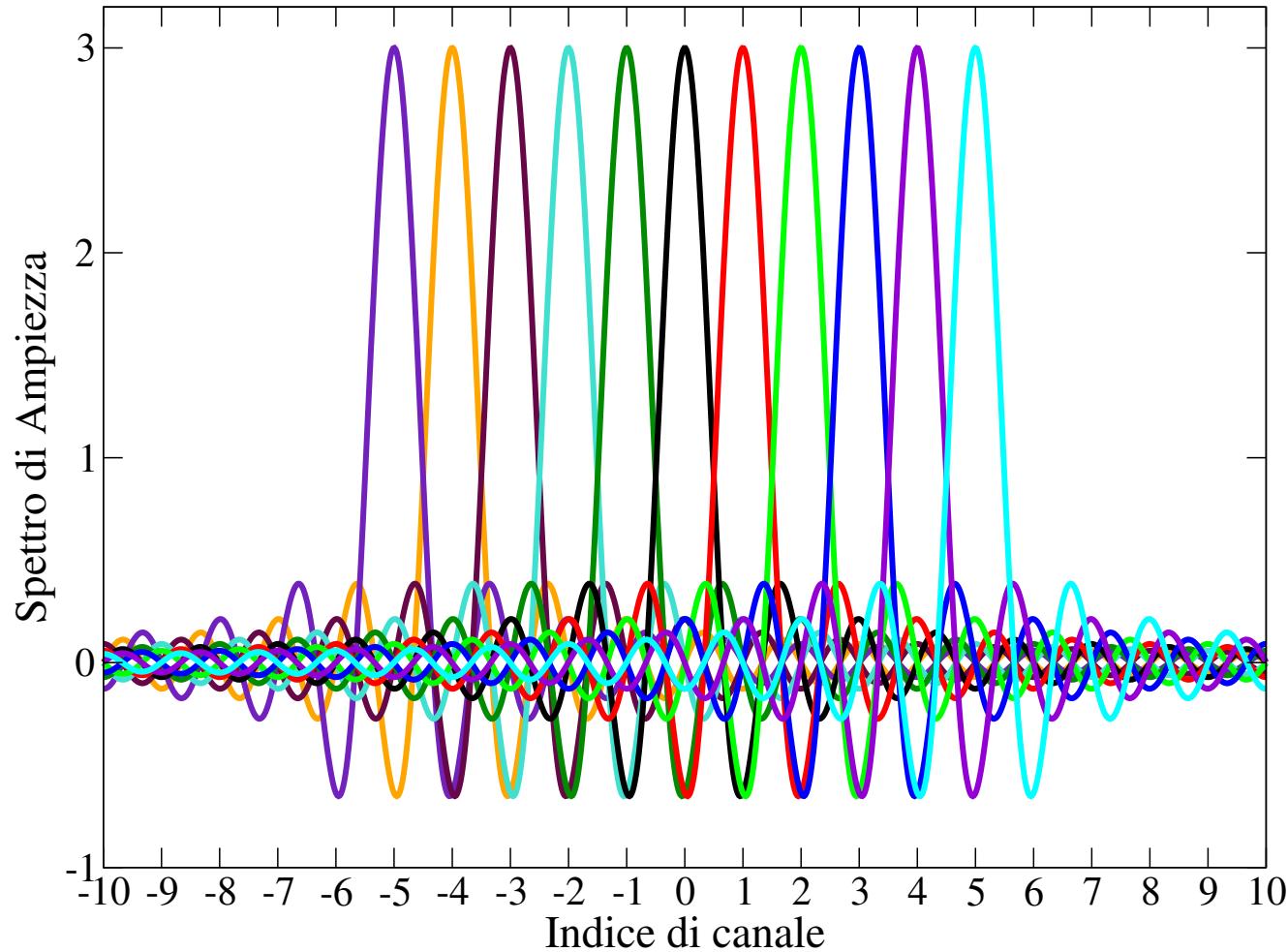
MC con codice 2D TCM

- Dimostrato che l'elaborazione ottima può essere fatta nel dominio del tempo, cioè prima della demodulazione



Sistema MC e banchi di filtri

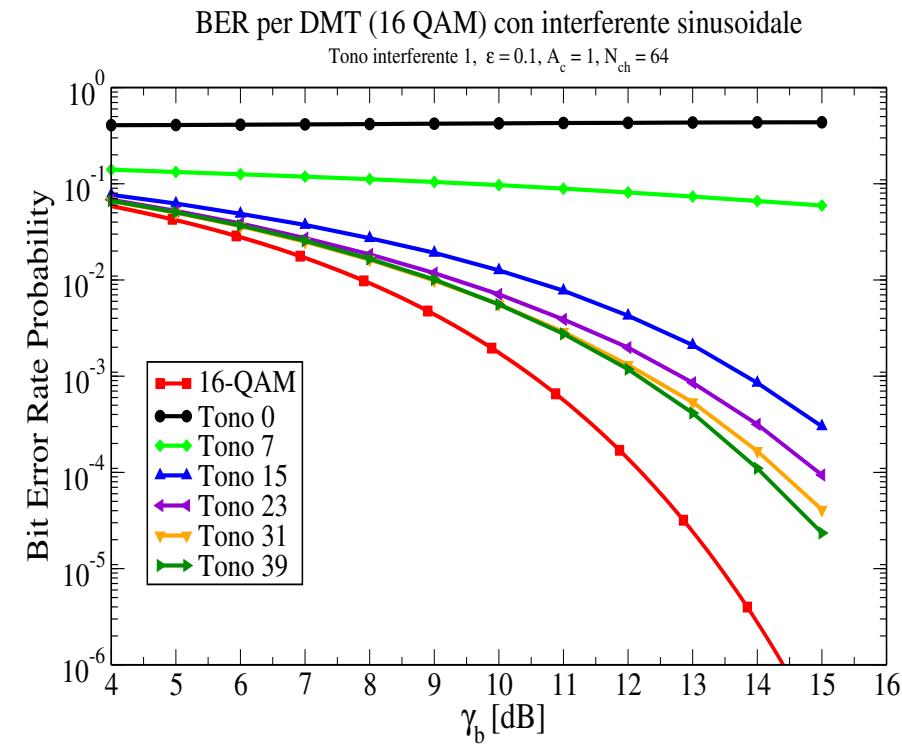
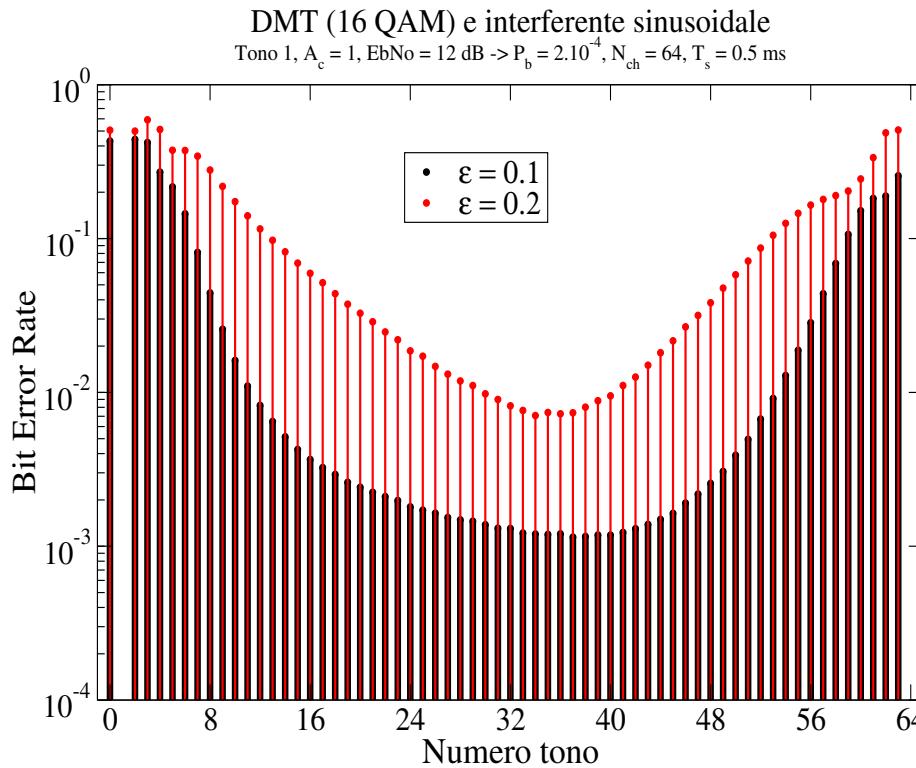
- Il sistema DMT ha canali poco selettivi in frequenza.





Sistema MC e banchi di filtri

- Il sistema DMT ha canali poco selettivi in frequenza.

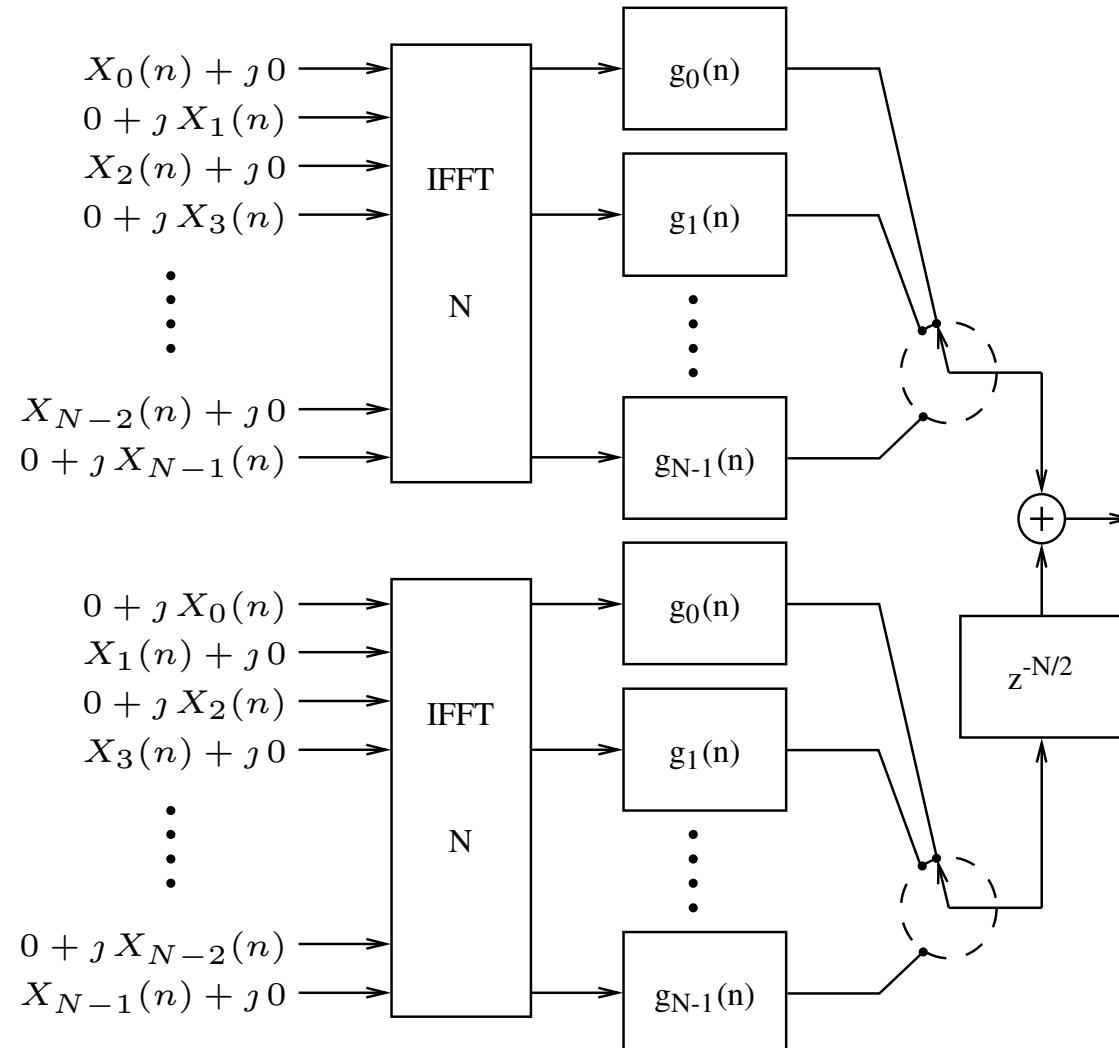


- Un segnale a radiofrequenza che cade nella banda di un sottocanale viene disperso su tutti gli altri
- Occorre che i sottocanali abbiano spettri più limitati in banda



Sistema MC e banchi di filtri

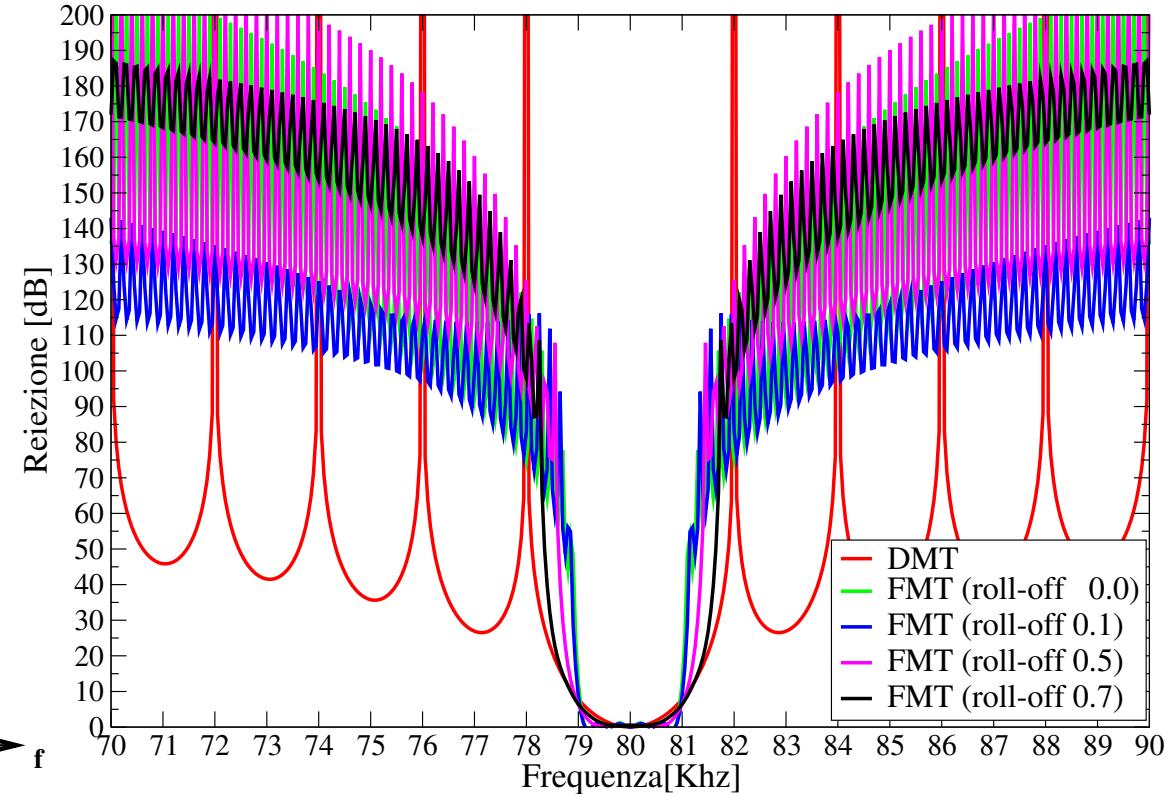
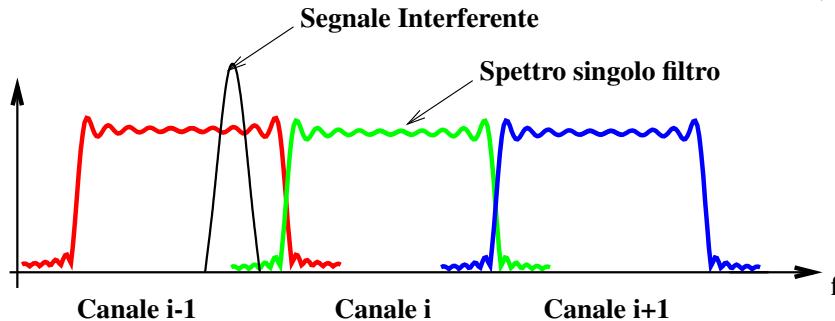
- Soluzione al problema: banchi di filtri.





Sistema MC e banchi di filtri

- Soluzione al problema: banchi di filtri.



- L'aumentato rapporto di reiezione rende il sistema multiportante più robusto nei confronti dei disturbi radio.



Sviluppi dell'attività

- Compensazione degli effetti non lineari:
 - Studio di tecniche di predistorsione in trasmissione o sovraccampionamento in ricezione.



Sviluppi dell'attività

- Compensazione degli effetti non lineari:
 - Studio di tecniche di predistorsione in trasmissione o sovraccampionamento in ricezione.
- Compensazione di offset di frequenza
 - Aspetto critico: insorge ISI e ICI



Sviluppi dell'attività

- Compensazione degli effetti non lineari:
 - Studio di tecniche di predistorsione in trasmissione o sovraccampionamento in ricezione.
- Compensazione di offset di frequenza
 - Aspetto critico: insorge ISI e ICI
- Risoluzione di problemi di complessità computazionale e realizzativi



Sviluppi dell'attività

- Compensazione degli effetti non lineari:
 - Studio di tecniche di predistorsione in trasmissione o sovraccampionamento in ricezione.
- Compensazione di offset di frequenza
 - Aspetto critico: insorge ISI e ICI
- Risoluzione di problemi di complessità computazionale e realizzativi
- Proposta ed approvazione di un progetto regionale dal titolo *“Modem digitale per trasmissioni a larga banda su elettrodotti”* nell’ambito del Programma Regionale per la Ricerca Industriale, l’Innovazione e il Trasferimento Tecnologico (PRRIITT).



Elenco delle pubblicazioni

- 1 R. Pighi, R. Raheli e U. Amadei, "Multidimensional signal processing and detection for storage systems with data dependent transition noise", accettato per pubblicazione su *IEEE Trans. on Magnetics*.
- 2 R. Pighi, R. Raheli e U. Amadei, "Multidimensional receiver front-end for storage systems with data dependent transition noise", in *Proc. IEEE Intern. Symp. Inform. Theory with Appl.*, (ISITA'04), Parma, Italy, Ottobre 2004.
- 3 R. Pighi e R. Raheli, "On multicarrier signal transmission for high-voltage power lines", in *Proc. Intern. Symp. on Power Line Communications*, (ISPLC'05), Vancouver, Canada, Aprile 2005.
- 4 R. Pighi, R. Raheli e F. Cappelletti, "Information rates of multidimensional front-ends for digital storage channels with data-dependent transition noises", in *Proc. IEEE Intern. Symp. on Information Theory*, (ISIT'05), Adelaide, Australia, Settembre 2005.
- 5 R. Pighi, U. Amadei e R. Raheli, "Oversampled detector for transition-noise-limited digital storage systems", accettato per pubblicazione in *Proc. IEEE Intern. Conf. on Communications*, (ICC'06), Istanbul, Turchia, Giugno 2006.
- 6 R. Pighi, R. Raheli e F. Cappelletti, "Information rates of multidimensional front-ends for digital storage channels with data-dependent transition noises," proposto per la pubblicazione su *IEEE Trans. on Magnetics*, dicembre 2005.



Elenco delle pubblicazioni

- 7 R. Pighi e R. Raheli, "Linear predictive detection for power line communications impaired by colored noise", proposto per la pubblicazione in atti di congresso internazionale.
- 8 R. Pighi, M. Franceschini, G. Ferrari e R. Raheli, "Fundamental performance limits for PLC systems impaired by impulse noise", proposto per la pubblicazione in atti di congresso internazionale.
- 9 R. Pighi, M. Franceschini, G. Ferrari e R. Raheli, "Fundamental performance limits for power line communications with impulse noise", in fase di proposta per la pubblicazione su rivista internazionale.
- 10 R. Pighi e R. Raheli, "Analisi delle prestazioni del sistema di trasmissione 2D TCM 64 QAM Selta", rapporto tecnico No. 1 redatto per Selta S.p.A., Giugno 2003.
- 11 R. Pighi e R. Raheli, "Analisi delle prestazioni di un sistema di trasmissione 4D TCM 64 QAM Selta", rapporto tecnico No. 2 redatto per Selta S.p.A., Luglio 2003.
- 12 R. Pighi e R. Raheli, "Analisi delle prestazioni di sistemi di trasmissione 4D TCM a 8 e 16 stati", rapporto tecnico No. 3 redatto per Selta S.p.A., Settembre 2003.
- 13 R. Pighi e R. Raheli, "Trasmissione multiportante su elettrodotto", rapporto tecnico No. 4 redatto per Selta S.p.A., Maggio 2004.



Elenco delle pubblicazioni

- 14 R. Pighi e R. Raheli, "Sistema 4D TCM a bit rate variabile", rapporto tecnico No. 5 redatto per Selta S.p.A., Novembre 2004.
- 15 R. Pighi, U. Amadei e R. Raheli, "Simulatore TCM 4D a bit rate programmabile", rapporto tecnico No. 6 redatto per Selta S.p.A., Marzo 2005.
- 16 R. Pighi e R. Raheli, "Sincronizzazione di frequenza e stima di canale per trasmissioni multiportante", rapporto tecnico No. 7 redatto per Selta S.p.A., in preparazione.