

**Università degli Studi di Palermo**  
**A.A.2013/2014**

**Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM)**  
**Laurea in Ingegneria Elettronica**  
**Fondamenti di Telecomunicazioni (9 cfu)**

**Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica e Meccanica (DICGIM)**  
**Laurea in Ingegneria Informatica e delle Telecomunicazioni**  
**Comunicazioni elettriche (6 cfu)**

*Programma del corso*

Schema di principio di un collegamento punto a punto.

*Richiami di teoria dei segnali*

Potenza istantanea, energia e potenza media. Sviluppo in serie di Fourier in forma esponenziale. Richiami sulla trasformata di Fourier. Proprietà della trasformata di Fourier: linearità, segnale traslato, segnale modulato, segnale derivato, segnale riscaldato, teorema dell'area. Trasformate di Fourier notevoli: rect, sinc, costante, delta di Dirac, gradino unitario, impulso Gaussiano. Relazione di Parseval per la trasformata di Fourier, densità spettrale di energia e di potenza. Prodotto di convoluzione: definizione, relazione con la trasformata di Fourier e con la risposta nell'uscita dei sistemi lineari e tempo-invarianti. Concetto di filtro, filtro passa-basso ideale, filtro passa-banda.

Cenni al calcolo della probabilità. Densità di probabilità congiunta di più variabili aleatorie. Variabili aleatorie statisticamente indipendenti. Medie e momenti, correlazione ed incorrelazione di variabili aleatorie. Variabili aleatorie Gaussiane. Distribuzione di probabilità e calcolo della densità di probabilità di funzioni di variabili aleatorie. Teorema del limite centrale. Processi aleatori. Densità di probabilità di processi. Stazionarietà. Autocorrelazione e quasi-stazionarietà. Densità spettrale di potenza. Segnale analitico ed inviluppo complesso di un segnale passabanda. Densità spettrale di potenza di un processo di rumore bianco e del suo inviluppo complesso. Autocorrelazione di un processo di rumore Gaussiano bianco filtrato. Statistica dei campioni di rumore Gaussiano bianco filtrato. Condizioni per l'indipendenza statistica dei campioni di un processo di rumore filtrato. Densità di probabilità della somma di variabili aleatorie nel caso generale e nel caso di indipendenza. Trasformazione affine di una variabile aleatoria. Variabili aleatorie congiuntamente Gaussiane non indipendenti. Densità di probabilità dell'angolo di una variabile circolare Gaussiana. Densità di probabilità del modulo di una variabile circolare Gaussiana e della proiezione lungo una direzione qualsiasi.

*Potenze e rumore nei vari punti di un collegamento*

Potenza disponibile di un generatore. Guadagno disponibile di un biporta. Condizioni di adattamento e di massimo trasferimento di potenza. Il processo di rumore termico di Johnson-Nyquist. Modello del rumore bianco Gaussiano. Densità spettrale e potenza disponibile del rumore termico. Biporta rumorosi. Temperatura di sistema, di ingresso e di uscita di un biporta rumoroso. Cifra di rumore di un biporta. Cifra di rumore della cascata di biporta rumorosi. Esempi di calcolo della cifra di rumore e delle temperature di sistema di cascate di biporta rumorosi.

*Modulazioni analogiche*

Introduzione alle modulazioni su portante sinusoidale e su portante impulsiva. Forma generale del segnale modulato di ampiezza. Spettro a frequenze positive. Inviluppo complesso. Modulazioni analogiche di ampiezza: differenze tra AM e DSB-SC. Efficienza di modulazione. Rivelazione coerente e rivelazione ad inviluppo. Modulazioni analogiche d'ampiezza a banda laterale singola (SSB) e a banda laterale ridotta (VSB). Trasformatore di Hilbert. Necessità della modulazione VSB per segnali modulanti passabasso. Densità spettrale di potenza dei segnali a modulazione analogica di ampiezza. Potenza del segnale modulato in funzione dei parametri del segnale. Rapporto segnale-rumore all'ingresso del ricevitore. Rapporto segnale-rumore all'uscita del demodulatore con modulazioni analogiche di ampiezza. Modulazione analogiche d'angolo: differenze tra modulazioni di fase e di frequenza. Valutazione dell'occupazione di banda del segnale modulato di frequenza. Formula di Carson. Approssimazione di Armstrong. Demodulazione non coerente del segnale FM. Demodulazione coerente del segnale FM. Densità spettrale di potenza dei segnali a modulazione analogica di frequenza. Rapporto segnale-rumore all'uscita del demodulatore con modulazione analogica di frequenza.

*Segnali numerici*

La rappresentazione a tempo discreto dei segnali. La proprietà campionatrice dell'impulso. Il teorema del campionamento e la condizione di Shannon-Nyquist per la ricostruzione. Schema del sistema campionario, filtro anti-aliasing, interpolazione. Completamento dello schema dei convertitori A/D e D/A: la quantizzazione. Cenni alla

Modulazione PCM. Modulazione PCM: rapporto segnale rumore di un sistema di campionamento e quantizzazione in funzione della banda e del numero di bit per campione.

#### *Modulazioni numeriche*

Modulazione di frequenza FSK: espressione analitica del segnale e struttura del modulatore. Modulazione PPM: espressione analitica del segnale e struttura del modulatore. Modulazione numerica di ampiezza bilivello in banda base su portante impulsiva. Filtro di trasmissione nella modulazione impulsiva di ampiezza: condizioni per l'annullamento dell'interferenza intersimbolica nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza. Struttura del ricevitore per segnali numerici PAM in banda base. Filtro del ricevitore, equalizzatore. Modulazione impulsiva multilivello in banda base PAM. Probabilità di errore della modulazione binaria di ampiezza con ricevitore a soglia. Modulazione impulsiva di ampiezza in banda traslata. Modulazione impulsiva di ampiezza in fase e quadratura QAM. Generalizzazioni: PSK, QAM non quadrate. Modello equivalente in banda base con sincronizzazione e canale perfetto e senza interferenza intersimbolica. Probabilità di errore di un sistema di trasmissione numerica binario. Condizione di filtro adattato. Densità spettrale di potenza di un segnale modulato. Interpretazione della formula per la probabilità di errore in termini della varianza dei simboli trasmessi. Probabilità di errore per un sistema di trasmissione multilivello in banda base e caso particolare della M-PAM. Codifica di Gray. Probabilità di errore sul bit di una modulazione 4-PAM con mapping di Gray.

#### *Cenni di teoria dell'informazione*

Sorgenti discrete. Entropia. Canali discreti. Informazione mutua e capacità di canale. Cenni alla codifica di canale. Astrazione dei livelli fisici e collegamento dati, cenni alle tecniche di ritrasmissione automatica.

#### *Applicazioni con MATLAB*

Generazione di variabili aleatorie con distribuzione arbitraria. Istogramma, stima del valore medio e del valore quadratico medio. Simulazione del processo di tensione di rumore su un resistore. Stima numerica della trasformata di Fourier e dello spettro di potenza. Lettura di un file audio PCM, sottocampionamento ed effetti dell'aliasing. Dimostrazione di un sistema di modulazione e demodulazione analogica FM. Dimostrazione di modulazioni numeriche di ampiezza: diagramma ad occhio.

#### *Dimostrazioni*

Analizzatore di spettro. Deduzione della cifra di rumore dello strumento. Analisi dello spettro dei segnali FM, GSM, UMTS, IEEE 802.11, Bluetooth, DVB-T.

#### *Materiale didattico di riferimento*

- Maria Gabriella Di Benedetto, "Comunicazioni elettriche – Fondamenti" ed "- Approfondimenti", Casa Editrice Pearson – Prentice Hall Italia