

Prefazione all'edizione 1.7

CON l'avvicinarsi della *maggiore età*¹, ho fortemente avvertito la necessità di elevare il tono e l'autorevolezza che il testo si è conquistato nel corso degli anni, mantenendo allo stesso tempo tutte le caratteristiche di originalità che lo contraddistinguono. Ho quindi lavorato secondo due direttive: da un lato, ho introdotto in modo diffuso un livello di *narrazione*, una sorta di voce fuori campo che accompagna il lettore tra i diversi argomenti ed approfondimenti, nel tentativo di stimolare la consapevolezza del contesto in cui collocare i contenuti, essendomi sempre ribellato ai libri che si sviluppano sulla base di dogmi e assiomi, fornendo risultati che non si riesce a collocare in un ragionamento più ampio e strutturato.

D'altro canto, in questa revisione molti dei contenuti già presenti sono stati decisamente rivoluzionati, ed in diversi casi riscritti alterandone l'ordine espositivo oppure approfondendo aspetti prima considerati accessori. In questa fase mi sono sorpreso per tutte le volte che ho dovuto operare a livello puramente grammaticale, nei casi in cui frasi dal soggetto implicito, troppo lunghe, o di tipo retorico² piuttosto che logico, rischiavano di fare confusione anziché chiarire gli aspetti da esse descritti. Così facendo sono anche riuscito a rimuovere alcune *balle* che erano presenti da lunga data, alcune ereditate ed altre frutto della mia fantasia, l'importante è averle eliminate :-)

Questa edizione viene resa disponibile in corrispondenza della *fine* del corso (al secondo semestre) in modo da includere anche le ulteriori revisioni occorse durante la preparazione delle lezioni. Tutta l'attenzione è stata rivolta alla prima parte che ha subito importanti sviluppi, sia nei termini sopra espressi, sia per quanto riguarda alcuni nuovi ambiti culturali introdotti, come lo spazio dei segnali, la statistica, ed i filtri numerici. Altre parti sono state rivisitate ed approfondite, come accaduto per il teorema del campionamento, l'inviluppo complesso, le tecniche di demodulazione, e la distorsione lineare per segnali modulati, per un totale di circa *sessanta* nuove pagine. Poi ho dovuto mettere un punto, e procedere al rilascio di questa edizione, anche se vedo già tracciata la strada per la prossima: rendere più stringente il passaggio dal mondo analogico a quello digitale, visto che qualunque ricevitore moderno, dal telefono al WiFi alla tivù, svolge tutte le operazioni sulla base dei soli dati campionati.

¹La prima edizione pubblica risale al 2001.

²Vedi ad es. https://it.wikipedia.org/wiki/Figura_retorica

Note di rilascio

L'elenco che segue *riassume* le novità in cui l'edizione 1.7 differisce rispetto alla 1.6, raccontate per esteso presso <https://teoriadeisegnali.it/libro/NEWS.txt>. Oltre, come sempre, alla miriade di altri aggiustamenti e precisazioni.

- Completamente revisionato e riscritto il primo capitolo *Una visione di insieme*, forse il più importante per dare al lettore una idea della qualità delle pagine che seguono. Era inverecondo che fosse *fermo* da 15 anni! - Aggiunte definizioni, figure e tabelle, alterato l'ordine espositivo. Nuova sottosezione sulle operazioni che erano date per scontate come traslazione e scalatura, la combinazione di segnali per somma e prodotto ed il grafico risultante, ed i segnali di uso frequente. Approfondimento sull'esponenziale complesso come prolungamento analitico;
- nel titolo del secondo capitolo oltre a *Serie di Fourier* è ora citato anche lo *Spazio dei Segnali*, avendo incluso una nuova sezione che approfondisce i concetti di spazio lineare, normato e prodotto interno, estesi al caso di spazi ad infinite dimensioni come quello dei segnali periodici, di energia e di potenza, ed applicabili ad un qualunque operatore funzionale lineare. Approfondita inoltre la genesi della formula di Eulero, chiarita la nota sulle armoniche in senso musicale, riviste le figure sui coefficienti di Fourier come fasori e sullo spettro di un'onda rettangolare, e migliorati diversi passaggi del testo;
- il terzo capitolo accoglie nel titolo oltre a *Trasformata di Fourier* anche la parola *convoluzione*. Vengono aggiunti diversi nuovi paragrafi per separare i concetti affrontati, e si fa riferimento allo spazio dei segnali a proposito di energia mutua, Parseval e densità di energia. Unificata la sezione sull'impulso matematico con tutte le relative proprietà ed applicazioni, resa la proprietà di setacciamento direttamente usabile per la convoluzione, per la quale si puntualizza il ruolo di calcolare un valore dell'uscita. Esplicitato che se un fattore di un prodotto nel tempo è un coseno allora si parla di modulazione, ovvero di finestratura se il fattore ha durata limitata. Rivisto il treno di impulsi, inserendo tioletti di paragrafo per la sua definizione, la relativa serie e trasformata di Fourier, l'applicazione ad un segnale periodico e somma di Poisson. Eliminata la trattazione confusa della trasformata di costante, e dimostrato che gli esponenziali complessi sono un base ortonormale, ma nello spazio dei segnali di potenza;
- l'inizio del capitolo su *Campionamento, quantizzazione ed elaborazione numerica* vede invertito l'ordine espositivo, eseguendo ora prima l'analisi nel tempo, e quindi la verifica in frequenza, e facendo notare (con l'ausilio di una figura) che $X^*(f)$ ha un guadagno pari a f_c , rimosso dal filtro di restituzione. Introdotta la conversione A/D a rampa lineare e D/A a resistenze pesate dubito prima della quantizzazione, che può prevedere anche uno stadio di codifica binaria come per il PCM. La codifica lineare viene affrontata ex-novo, eliminando vecchie figure per introdurne una nuova con $Q(x)$ di tipo mid-rise ed L pari, utile per rivedere il calcolo dell' SNR_q . Aggiunto schema grafico con le relazioni tra DFT, DFT e trasformata zeta, e figura per l'overlap and add. Nuova sezione sul sottocampionamento, tutto sommato semplice, anche grazie ad una costruzione grafica originale per illustrare la periodizzazione come somma di repliche traslate;
- per quanto riguarda *Probabilità, processi, e statistica* si è dato impulso alla terza, aggiungendo la valutazione dell'intervallo di confidenza per la stima di media nei casi di varianza nota o stimata, introducendo la nozione di percentile, ed arrivando alla t di Student. Si passa quindi all'intervallo di confidenza per una frazione ed alla necessaria dimensione campionaria, per poi affrontare il test chi quadro e la verifica di distribuzione. Com-

pleta questa parte un accenno alla stima di forma d'onda, ed alla tecnica di media delle ripetizioni.

- la parte su *Densità spettrale e filtraggio* presenta molti piccoli aggiustamenti, sia di natura estetico-funzionale che chiarificatrice ed organizzativa, come anche da punto di vista dei rimandi interni. Aggiunto il caso dell'autocorrelazione che non si azzerava all'infinito per segnali a media non nulla, ed il corrispondente impulso nell'origine dello spettro di densità di potenza. Rimossa un balla: non è per niente detto che un segnale filtrato passa basso si gaussianizzi. Aggiunto elenco delle possibili combinazioni di segnali certi ed aleatori, e la dimostrazione informale del risultato per la densità di probabilità della somma di processi, ed una più formale per quella del prodotto. Introdotti il filtro a pettine e quelli a media mobile uniforme ed esponenziale, aggiunta dimostrazione della trasformata dell'esponenziale. Spostato il filtro adattato a fine capitolo e semplificata la notazione. Corretti conti e figura per la densità spettrale dell'onda PAM. Aggiunta una nuova parte su architettura e sintesi di filtri numerici: campionamento della risposta impulsiva, trasformata zeta, espressione generale dei filtri FIR ed IIR e relativa $H(z)$, architettura in forma diretta e forma canonica. Sintesi di un filtro IIR a partire da un filtro analogico mappando piano s e piano z per realizzare l'invarianza della risposta impulsiva, la mappa di poli e zeri, l'equivalenza tra equazioni differenziali ed alle differenze, e la trasformazione bilineare.
- il capitolo su *Distorsione e rumore* presenta poche novità, ma buone. Spiegato meglio il cambio di unità di misura in dB, osservato che l'orecchio è SENSIBILE alla distorsione di fase (ma non lo è per segnali periodici), notato che la potenza disponibile di rumore è sempre bianca, mentre quella di segnale non è detto. Corretta una falsa credenza: T_0 è pari a 300 °Kelvin e non 290, pari a 27 °Celsius e non 17!
- per quanto riguarda la *Trasmissione dati in banda base* sono state aggiunte le figure di forma d'onda e densità spettrale per segnali RZ, NRZ e multilivello, per la scelta dell'impulso dati e per illustrare il filtro a coseno rialzato; sono cambiati alcuni titoli ed introdotti nuovi paragrafi, discussa l'alternativa se equalizzare in trasmissione od in ricezione. Uniformato il simbolo λ della soglia di decisione con i casi di decisione statistica e filtro adattato; migliorata la distinzione tra parametri di sistema (P_R , $N_0/2$ e f_b) e di trasmissione (L e γ) ai fini della definizione di E_b/N_0 . Spostato il ricevitore ottimo, dall'appendice a subito dopo la P_e^{bit} , approfondito il ragionamento sulla correlazione del rumore filtrato ovvero sulla sua predicibilità. Approfondita l'approssimazione della d.d.p. di Bernoulli per la probabilità di più errori nella stessa parola ed aggiunte tre figure; suddivisa l'esposizione del codice a blocchi in più paragrafi con titolo, chiarito il concetto di prob. residua di errore, approfondito il compromesso banda-potenza, anche per quanto riguarda la codifica.
- l'ordine espositivo dei *Segnali modulati* è stato alterato, dando maggiore evidenza ad alcune definizioni, anticipando qui la demodulazione in fase e quadratura e rimandando l'approfondimento della trasformata di Hilbert ad una appendice, che viene ora associata alla parte immaginaria di $\underline{x}(t) e^{j\omega_0 t}$ mentre il segnale modulato ne è la parte reale. Il segnale analitico è ora definito a partire dall'analogia tra fasore e involuppo complesso in modo da individuare subito $x^+(t)$ e $x^-(t)$ messe facilmente in relazione con $x(t)$ e $\hat{x}(t)$. Il risultato del calcolo di $\mathcal{P}_{x_c}(f)$ e $\mathcal{P}_{x_s}(f)$ svolto in appendice anche per processi viene riportato subito, assieme alla figura. Riorganizzata la trattazione del filtro di Hilbert.
- in *Modulazione (e ritorno) per segnali analogici*, dopo aver descritto meglio l'indice di modulazione di segnali a portante intera, ed aver accennato al metodo di Weaver per

generare un segnale a banda laterale unica, si affronta la demodulazione, innanzitutto omodina (*conversione diretta, zero-IF*), spiegando meglio l'ambiguità di segno della portante ricostruita con il metodo della *quadratura*; rimossa la palla che si possa utilizzare un d. involuppo sui segnali a banda laterale unica, neanche per sogno. La parte *sull'eterodina* subisce una revisione profonda, con una introduzione storica che parte dalla *radiotelegrafia* con una nuova figura, e dopo aver definito i problemi di *zero-IF* come la *deriva* della portante (all'epoca valvolare) ed il suo *rientro* nel mixer che provoca una componente continua, rimuove una seconda palla: *supereterodina* non significa $f_e > f_0$, ma che f_M è *sopra* la banda audio. Nuova figura con la sintonia eterodina per due diverse stazioni, migliorata la logica della scelta $f_e > f_0$; accennato alla standardizzazione di f_M per le bande adibite al *broadcast*, migliorato l'elenco dei vantaggi, e citato il caso della conversione multipla. Aggiunto cenno al campionamento IQ. Nuova appendice sulle soluzioni di *mo-demodulazione*: a riguardo del *mixer* si approfondisce lo studio della modalità *switching*, e citato il diodo come esempio di mixer *non lineare*; descritta quindi la *sintesi di frequenza* con PLL ed oscillatore a cristallo, e descritto tramite figura il *comparatore di fase* tra onde quadre.

- creato il nuovo capitolo *Distorsione per segnali modulati* che riunisce aspetti prima affrontati in modo frammentario. Dopo avere introdotto il passa basso *equivalente* ad un passa banda ed aver mostrato il fenomeno *dell'intermodulazione* tra c.a di b.f., viene evidenziato che è comunque possibile effettuare una equalizzazione, purché in forma *complessa*, con filtri numerici fisicamente *non* realizzabili. Vengono quindi affrontate le condizioni perfette che non comportano intermodulazione, e colte le sottili sfumature: un canale passa banda ideale non produce alterazioni, un equivalente passa basso perfetto introduce un ritardo (*di gruppo*) sulle c.a. di b.f., un passa banda perfetto introduce un ritardo sia sulle c.a. di b.f. che sulla portante, ovvero una rotazione che dipende dal ritardo *di fase*; mentre per un segnale a banda stretta, c'è solo la rotazione. La visione unitaria è fornita dalla *approssimazione* che conduce alla definizione di ritardo di gruppo e di fase, dopo la quale è più facile enunciare il risultato del tutto generale: per evitare intermodulazione serve $\underline{h}(t)$ reale e dunque $\underline{H}(f)$ Hermitiano, a meno di una fase a gradino, o rotazione di portante. Seguono gli approfondimenti su come i tipi di modulazione (sia di ampiezza che angolare) rispondono alla possibile distorsione lineare. Per quanto riguarda la distorsione *non* lineare, si è aggiunto l'accenno alla possibilità di eseguire una *predistorsione* del segnale da trasmettere, illustrata da una nuova figura.
- nelle *Prestazioni delle trasmissioni modulate* si pone subito in evidenza il concetto di SNR_0 di riferimento, con una riorganizzazione dei calcoli per i casi di demodulazione AM. Rivista la struttura espositiva per la detezione incoerente di sinusoidi, evidenziato il compromesso tra intervallo di ricerca e prob. di errore, definito il criterio ML come rapporto, indicato come calcolare la soglia; aggiunti gli aspetti di decisione Bayesiana e di costo delle decisioni.
- in *Teoria dell'informazione e codifica* si è chiarito il concetto di ridondanza e formalizzata la sua relazione con l'efficienza di codifica; inserito qualche passaggio che non era del tutto evidente, corretto per l'ennesima volta l'esercizio sul codice di Huffman, aggiunto esercizio che calcola l'efficienza, riscritte le note su Huffman adattivo. Aggiunta dimostrazione che aumentando la dimensione del blocco di codifica si aumenta l'efficienza avvicinando \bar{N} a H_s , aggiunta figura e nota riassuntiva. Semplificata la codifica predittiva e realizzata una figura che illustra l'architettura di un predittore binario di primo ordine. Miglioramenti al BSC, completata la figura, e cambiata la notazione dei rapporti ML e MAP. Evidenziata la relazione tra tasso di codifica di canale, velocità binaria ed

E_b/N_0 , approfondita quella tra distanza di Hamming, distanza minima e capacità correttiva. Aggiunta figura del cubo del codebook per il codice a ripetizione 3:1, aggiunta spiegazione di come le righe della matrice generatrice \mathbf{G} di un codice lineare siano pari alle codeword associate ai vettori della base dello spazio di segnale da proteggere. Migliorata la trattazione per il codice di Hamming, in relazione alla struttura delle codeword ed a quella della matrice di controllo \mathbf{H} , semplificata la spiegazione della correzione basata sulla sindrome; aggiunto esercizio sulla P_e residua.

Un sentito grazie a tutti coloro che mi hanno incoraggiato a continuare, ed *io continuerò!*

Alessandro Falaschi, Giugno 2019