

Prefazione

L'IDEA di autoprodotto questo testo trae origine da una sorta di desiderio di rivalsa nei riguardi delle fotocopie di appunti scritti a mano su cui da studente preparavo gli esami; con il passare degli anni dalla sua prima edizione, mi avvedo sempre più di aver iniziato un percorso *interminabile*. Incurante di ciò, un po' alla volta ho continuato a migliorare la qualità del testo e ad integrare nuovi argomenti, incoraggiato dal buon successo di lettori riscosso grazie alla sua permanenza on-line, ed a distanza di più di quindici anni dall'inizio dell'avventura, annuncio il rilascio dell'edizione 1.7.

Gli aspetti che vengono affrontati abbracciano un ampio ventaglio di tematiche inerenti le *telecomunicazioni*, il collante nascosto che definisce gli algoritmi implementati da programmi, a loro volta eseguiti mediante circuiti elettronici: tutti protagonisti assoluti della nostra vita e della nostra società *dell'informazione*. Lo sviluppo della trattazione, che nelle prime edizioni era orientato ad un approccio *bottom-up* collegando strettamente gli aspetti teorici con le rispettive applicazioni pratiche, si è via via strutturato ed riorganizzato, raggruppando tra loro argomenti affini secondo la sequenza logica sperimentata attraverso i cicli didattici che ne hanno accompagnato la stesura.

La forma espositiva è tuttora articolata su due livelli, con le numerose note ed appendici dove vengono svolti i passaggi ed affrontate le osservazioni, mentre il testo principale tenta di mantenere il *filo logico* del ragionamento complessivo. Si fa uso sistematico di rimandi e collegamenti che letteralmente *attraversano* l'intero testo, consentendo di *ricucire assieme* argomenti correlati ed interdipendenti, in modo particolarmente interattivo nel caso del formato PDF *navigabile*. Sono inoltre presenti *numerosissime illustrazioni*, che mostrano sia gli schemi (circuitali e simbolici) dei dispositivi discussi, sia l'andamento delle curve di prestazione o di altre grandezze in funzione del tempo, della frequenza, o dei parametri di sistema. Sono poi presenti svariati rimandi a contenuti on-line per gli argomenti solo in parte accennati, principalmente verso *Wikipedia*, da cui il lettore interessato può iniziare un percorso di approfondimento.

Giustamente ci si può chiedere: ma con tutti gli ottimi testi che già esistono su questi argomenti, che bisogno c'era di un ulteriore lavoro? A parte che quando iniziai a scrivere, alcuni testi in italiano ora disponibili non erano ancora usciti, ritengo che il mio lavoro abbia prodotto un risultato con diversi aspetti di originalità. Il più appariscente è probabilmente la *disponibilità gratuita* in formato elettronico, che ha di fatto reso il testo un riferimento comune a tutta la comunità italoфона, e che ne permette la facile consultazione e navigabilità. Il secondo aspetto distintivo è la *varietà di argomenti* presenti, trattati in modo omogeneo e interdipendente, come difficilmente si riesce a fare in ambito universitario, a causa del livello di frammenta-

zione didattica che lo affligge¹. Una terza considerazione riguarda l'elevata *qualità tipografica* per un testo autoprodotta, ottenuta con l'utilizzo esclusivo di strumenti *opensource*. Il quarto punto di forza è la scelta di non affidarsi ad un editore tradizionale, ma affiancare al formato elettronico² quello cartaceo in modalità *stampa on-demand* per mezzo del servizio offerto da *www.youcanprint.it*. Infine, l'aspetto forse più nascosto ma a mio avviso realmente qualificante, è l'attività di *revisione dinamica* a cui è continuamente sottoposto durante i periodi didattici, che lo rende materia in continua evoluzione e ad ogni revisione sempre più completo.

Questo testo è espressione di un *progetto di cultura libera*, cultura che deve poter fluire liberamente dall'accademia al bagaglio di conoscenze di chiunque ne sia interessato, priva di vincoli di costo, intermediari, distribuzione, rating, e con la sola forza della libertà di circolazione delle idee; la sua disponibilità pubblica è pertanto regolata dalle norme di licenza *CREATIVE COMMONS Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo*



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.it>

E' possibile contribuire allo sviluppo del progetto promuovendo la sua diffusione, acquistando una copia a stampa³, o incoraggiandone la prosecuzione attraverso una *donazione*⁴, a cui corrisponde l'accesso *virtualizio* al formato *PDF navigabile* di tutte le edizioni presenti e future, e che viene anche devoluta ai progetti *open source* che hanno reso possibile il lavoro editoriale.

Istruzioni per l'uso

Anche se un libro è esso stesso una spiegazione, e non dovrebbe averne di ulteriori, di tanto in tanto qualche studente mi chiede: *ma quali sono le cose principali da sapere?* Purtroppo è una domanda senza risposta, o meglio, a cui potrebbe rispondere lo studente stesso dopo aver studiato, e infatti è quel genere di cose che vengono tramandate mediante *passa parola*. Io per primo non ho troppa simpatia per i conti fini a se stessi, e reputo molto più importante che siano afferrati i concetti e le modalità di procedere, piuttosto che la memorizzazione dei passaggi analitici, senza eventualmente avere del tutto chiaro a cosa servano. Per questo *i conti* ce li ho messi praticamente tutti, proprio lì dove è giusto che siano, dentro un libro, in modo che all'occorrenza, si sappia dove andarli a cercare. Forse in una qualche edizione futura riuscirò a corredare ogni capitolo con una sezione di riassunto finale, leggendo la quale si possa avere una visione sintetica degli argomenti trattati, e dei risultati più rilevanti ottenuti. Ma come consiglio generale allo studio, posso solo suggerire di provare a scrivere per proprio conto un riassunto del genere, perché è proprio attraverso la scrittura e la ripetizione che si rinforza la memoria; viceversa, leggendo e sottolineando è più probabile che si concili il sonno. Questa è una materia tanto affascinante quanto noiosa, non posso farci nulla.

¹In realtà il mondo universitario di affezioni ne ha diverse, come ad esempio il fatto che un lavoro come questo ha VALORE ZERO per quanto riguarda la carriera accademica. Sì, perché il mestiere del docente, a quanto pare, NON È INSEGNARE BENE, ma scrivere *tanti articoli*, da far vendere alle riviste scientifiche, ovviamente a carico delle biblioteche universitarie.

²Presso <https://teoriadeisegnali.it/libro/> è disponibile il *download*, gli esercizi di esame svolti, e... molto altro!

³Nella copia a stampa dopo l'ultimo capitolo viene fornito il link al download del PDF completamente navigabile.

⁴Le donazioni sono raccolte a partire da <https://teoriadeisegnali.it/donazione.html>, mediante *Paypal* o carta.

Prefazione all'edizione 1.7

Con l'avvicinarsi della *maggiore età*⁵, 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 retorico⁶ 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'involuppo 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.

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://teoriadeisignali.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 inveroconco 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

⁵La prima edizione pubblica risale al 2001.

⁶Vedi ad es. https://it.wikipedia.org/wiki/Figura_retorica

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 finestrazione se il fattore ha durata limitata. Rivisto il treno di impulsi, inserendo titoli per la sua definizione, la relativa serie e trasformata di Fourier, l'applicazione ad un segnale periodico, e la generalizzazione della 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 subito 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 DTFT, 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. Completa 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 azzerà 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.

va, 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 (\mathcal{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 demodulatore di involuppo con i 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'accento 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

L'opera

Trasmissione dei Segnali e Sistemi di Telecomunicazione

fa parte di un progetto di cultura libera iniziato a fine anni '90, da allora sempre aggiornato ed evoluto fino alla forma attuale. La sua disponibilità pubblica è regolata dalle norme di licenza CREATIVE COMMONS

Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.it>

Tutte le risorse associate al testo sono accessibili presso

<https://teoriadeisignali.it/libro/>

E' possibile contribuire al suo sviluppo svolgendo una azione promozionale alla sua diffusione, e/o supportarne la redazione attraverso una donazione, a cui corrisponde l'accesso *vitalizio* al formato PDF *navigabile* di tutte le edizioni presenti e future, e che viene anche devoluta ai progetti *open source*⁵⁷ grazie ai quali ne è stata possibile la produzione.

57

- . Lyx - <http://www.lyx.org/>
- . L^AT_EX- <https://www.latex-project.org/>
- . Inkscape - <http://www.inkscape.org/>
- . Gnuplot - <http://www.gnuplot.info/>
- . Octave - <http://www.gnu.org/software/octave/>
- . Genius - <https://www.jirka.org/genius.html>
- . Linux - <https://www.linux.it/>
- . Wikipedia - <https://it.wikipedia.org>