

# Prefazione

L'IDEA di autoprodurre questo testo trae origine da un desiderio di rivalsa rispetto alle fotocopie di appunti scritti a mano su cui da studente preparavo gli esami; con il passare degli anni dalla sua prima edizione del 2001, mi rendo sempre più conto di aver intrapreso un percorso *interminabile*. Un po' alla volta ho continuato infatti a migliorare la qualità del testo e ad integrare nuovi argomenti, incoraggiato dal gran numero di lettori raggiunti grazie alla sua accessibilità on-line, ed a distanza di più di venti anni dall'inizio dell'avventura annuncio il rilascio dell'edizione 2.0.

Gli aspetti affrontati abbracciano un ampio spettro di tematiche relative alle *telecomunicazioni*, il collante nascosto che definisce gli algoritmi implementati da programmi, a loro volta eseguiti mediante circuiti elettronici: tutti protagonisti assoluti della nostra vita immersa nella 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 numerose note ed appendici dove vengono svolti i passaggi e sviluppate 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*. Ci si avvale inoltre di *numerossime illustrazioni*, per mostrare 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 infine presenti svariati rimandi a contenuti on-line per gli argomenti accennati solo in parte, 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 frammentazione didattica che lo affligge<sup>1</sup>. 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 elettronico ad accesso pubblico<sup>2</sup> quello cartaceo in modalità *stampa on-demand*. 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.

## Cultura libera

Nell'era di Internet un libro a carattere tecnico-scientifico non è un oggetto statico, bensì qualcosa che evolve per mantenere il passo con l'evoluzione di ciò che descrive. Questo testo è inoltre 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 libera circolazione delle idee; 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>

E' possibile contribuire allo sviluppo del progetto promuovendo la sua diffusione, acquistando una copia a stampa<sup>3</sup>, o incoraggiandone lo sviluppo ulteriore attraverso una *donazione*<sup>4</sup>, a cui corrisponde l'accesso *vitalizio* al formato PDF *navigabile* di tutte le edizioni presenti e future. Le donazioni ricevute sono poi in gran parte devolute ai progetti *open source* che hanno reso possibile il lavoro editoriale.

<sup>1</sup>In realtà il mondo universitario di afflizioni 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.

<sup>2</sup>Presso <https://teoriadeisignali.it/libro/> è disponibile il *download* del testo in PDF, il formato HTML che viene indicizzato dai motori di ricerca, gli esercizi di esame svolti, e... molto altro!

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

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

## Complimentary Edition

Una *Complimentary Copy* individua la copia *omaggio* o gratuita che un editore *regala* agli autori di un libro in vendita, e le sue iniziali CC sono state poi usate come abbreviazione (specie nelle email) di *carbon copy* o, in italiano, di *copia per conoscenza*. Nel presente contesto il termine è usato per descrivere il PDF liberamente scaricabile e re-distribuibile, in perfetta sintonia con i principi della cultura libera e di cui la licenza Creative Commons definisce gli utilizzi. Sebbene il possessore di questa copia è nel pieno diritto (anzi, è incoraggiato) a cederla ad amici e colleghi, vorrei pregarlo di non depositarla presso siti che la rendano pubblicamente disponibile. Solo così posso tener traccia della dimensione della sua diffusione!

Come tutte le cose gratuite, la *complimentary edition*<sup>5</sup> presenta limitazioni, che tuttavia non implicano alcuna modifica ai contenuti del testo. La maggior limitazione è l'assenza di navigabilità del PDF, ovvero la mancanza di un indice strutturato (la maggior parte dei PDF reperibili in rete non lo prevede) e della possibilità di *clickare* sui riferimenti incrociati interni al testo e sui link web di approfondimento (che sono comunque mostrati testualmente). Altre limitazioni sono la presenza occasionale di una scritta in filigrana, e l'inserimento alla fine di ogni capitolo di due pagine il cui contenuto vi lascio scoprire a tempo debito. Al contrario, l'edizione *navigabile* (e per questo con maggior praticità di utilizzo) è quella riservata a chi sostiene il progetto mediante una donazione o l'acquisto di una copia a stampa, ai quali è garantito l'accesso *vitalizio* anche a tutte le (eventuali) edizioni future.

## Istruzioni per l'uso

Anche se un libro è esso stesso una spiegazione, e non dovrebbe averne di ulteriori, a volte 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 gli sviluppi analitici fini a se stessi, e ritengo più importante che siano afferrati i concetti e le modalità di procedere piuttosto che memorizzare i singoli passaggi senza avere al contempo una idea precisa del loro ruolo. D'altra parte *i conti* sono ciò che ci fa procedere nella conoscenza e che prova la sua esattezza: per questo *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.

---

<sup>5</sup>Precedentemente indicata come copia *di cortesia*, traduzione letterale di *courtesy copy*, termine usato con lo stesso significato.

## Prefazione all'edizione 2.0

Anche se ormai il testo si è fatto *maggiorenne*<sup>6</sup> i suoi contenuti non potevano che continuare ad espandersi, sia in termini di approfondimenti che di nuovi argomenti. Il formato è un po' cambiato, da 16x23 siamo passati a 17x24 cm, ed il corpo dei font è passato da 9 ad 11, prima erano veramente *troppo piccoli!* Oltre a queste (ed altre) operazioni di *maquillage*, l'insieme dei contenuti è stato suddiviso in *quattro* parti<sup>7</sup>:

- teoria dei segnali (I);
- modulazione (II);
- trasmissione dei segnali (III);
- sistemi di telecomunicazione (IV);

con un associato rimescolamento degli argomenti tra i capitoli. Se le primissime edizioni di questo testo (in cui gli argomenti, sia pur disparati, erano resi contigui) incontrassero questa loro progenie cresciuta, immagino che non la riconoscerebbero!

### Principali novità

Questa edizione ha subito nel corso del suo sviluppo rallentamenti vari, ha attraversato il periodo del Covid per ritrovarsi con una guerra in Europa. Con l'auspicio che il buon senso possa prevalere sulla follia, vediamo cosa ci porta di nuovo l'edizione 2.0.

- sono investigati gli aspetti implementativi del *campionamento*, a cui segue il nuovo capitolo dedicato esclusivamente al *filtraggio*, che ora affronta anche le architetture *polifase* e *integratore-pettine in cascata*, chiudendo così il cerchio con la tecnica di sovracampionare e decimare;
- aggiunte figure esplicative della relazione tra DFT, DTFT e trasformata *zeta*;
- nel capitolo di *probabilità* si è approfondito lo studio della d.d.p. *gaussiana*, menzionata la funzione  $Q()$ , e dimostrato il *teorema centrale del limite*; è stata inoltre sviluppata l'esposizione della *funzione caratteristica*, e la relazione tra momenti e serie di potenze della d.d.p;
- il capitolo sulla *correlazione* si arricchisce della sezione dedicata alla *regressione lineare*, sia semplice che *multipla*, e della relazione che intercorre tra questa ed il *metodo dei minimi quadrati*, introducendo la matrice *pseudo inversa* e svolgendo esemplificazioni figurate dei *concetti geometrici* associati;
- aggiunto un esempio figurato sulla *distorsione non lineare* presente in una sinusoide che va in *saturazione*;
- la *teoria dell'informazione* è ora suddivisa in due capitoli, il primo orientato alla *codifica di sorgente* ed il secondo a quella *di canale*:

<sup>6</sup>La prima edizione pubblica risale al 2001.

<sup>7</sup>Precedentemente erano tre, ora la modulazione ha acquisito lo status di parte a sé, dato che è un argomento che non necessariamente occorre spiegare (ad esempio) a studenti di (bio)informatica.

- approfondito lo studio della sorgente informativa *gaussiana*, con il calcolo della sua *entropia differenziale* (anche per il caso *multidimensionale*), e la dimostrazione che questa è massima applicando il metodo dei *moltiplicatori di Lagrange*, a cui è stata dedicata una apposita appendice corredata di grafico esplicativo;
  - aggiunta sezione sull’informazione per coppie di v.a.: *entropia congiunta e condizionale*, *informazione mutua media*, *entropia relativa* (o divergenza di *Kullback Leibler*) ed entropia di *Rényi*;
  - estesa la trattazione della *teoria velocità-distorsione*, e dimostrato il *limite inferiore di Shannon*  $R(D) \geq h(X) - \frac{1}{2} \log_2(2\pi eD)$  con  $h(X)$  pari all’entropia differenziale della sorgente e  $\frac{1}{2} \log_2(2\pi eD)$  quella di una v.a. gaussiana con varianza  $D$ ;
  - valutata l’entropia di un processo *gaussiano con memoria* e l’associata misura di *piattezza spettrale*, a cui segue la definizione di *funzione distorsione-velocità* mediante il procedimento di *water filling*;
  - la trattazione della *codifica di canale* si allinea agli sviluppi intercorsi nelle ultime decadi, affrontando argomenti come il codice di Reed-Solomon *accorcato*, la *codifica concatenata* e l’*interleaving* da associarvi; è stato aggiunto lo *pseudo codice* della decodifica di *Viterbi*, illustrata la tecnica del *tail-biting* ed approfondito il principio di *decisione soffice* con la verosimiglianza associata, graficate le *prestazioni* di Viterbi per diverse *lunghezze di vincolo*. Dopo un accenno alle alternative di codifica convoluzionale, si descrive il codice *perforato* e la *concatenazione* Solomon-Viterbi, affrontando quindi la decodifica di Viterbi con *uscite soffici*;
  - un significativo avanzamento riguarda poi la trattazione dei codici *TURBO* e di quelli a bassa densità di controllo parità (*LDPC*): per i primi dopo aver illustrato la *codifica ricorsiva parallela* e la decodifica *SISO*, sono definiti il rapporto di verosimiglianza logaritmica *LLR* e l’*informazione estrinseca*, valutata la *LLR* di ingresso e di uscita al *SISO*, e sviluppato l’algoritmo di *decodifica turbo*;
  - l’elegante codifica *LDPC* viene affrontata dopo aver attinto a diverse fonti, tutte citate, realizzando una sintesi senza per questo sprofondare nei conti. Dopo aver illustrato le particolarità della *matrice di controllo H* e l’associato *grafo di Tanner*, si affronta la decodifica *iterativa* basata sullo scambio di messaggi tra nodi secondo un principio di *propagazione della credenza*, che può essere implementato mediante un algoritmo *somma-prodotto*. Come per le altre tecniche vengono forniti grafici prestazionali per diverse condizioni operative, e gli attuali contesti di adozione.
- alla trattazione della *ricezione ottima* di una trasmissione numerica tramite canale con distorsione lineare e rumore bianco, si è aggiunta la dimostrazione di come una *equalizzazione ripartita* tra i due estremi del collegamento sia quella in

grado di garantire le migliori prestazioni, e valutata la perdita conseguente alla necessità di localizzare tutta l'equalizzazione al ricevitore;

- alla discussione sulla *ripartizione della potenza complessiva* tra le diverse portanti dell'OFDM si è aggiunto lo studio analitico della massimizzazione della *capacità aggregata* che porta all'espressione della soluzione ottima di tipo *water-filling*;
- anche il capitolo sui *mezzi trasmissivi* si è scisso in due, il primo dedicato a *cavo e fibra*, ed il secondo ai collegamenti *radio*;
- infine la novità *più poderosa* di questa edizione sono le 60 pagine del capitolo sui sistemi *multiantenna* o MIMO! La possibilità (offerta dalla tecnologia) di dotarsi di *più di una antenna* ha aperto le porte ad una *evoluzione* che giunge fino ai nostri giorni, e che è ripercorsa nei suoi diversi aspetti. Il *canale vettoriale* MIMO viene definito come una matrice complessa  $\mathbf{H}$  i cui elementi rappresentano il *guadagno aleatorio* del canale passa basso equivalente associato ad ogni coppia di antenne ai due lati del collegamento. Si mostra quindi come nel caso SIMO di più antenne al solo lato ricevente, quest'ultimo sia in grado di combinare in modo *coerente* le copie di messaggio ricevuto, e poi come nel caso MISO di più antenne al solo lato trasmittente si possano definire *codici spazio-tempo* STC che consentono di *diluire* l'informazione trasmessa oltre che nel tempo, anche sulle antenne, permettendo di ottenere un *guadagno di diversità*. Segue poi un impegnativo approfondimento sulla *capacità* del canale MIMO vero e proprio, da confrontare con quella per i casi SISO, SIMO e MISO. Il risultato che si ottiene è la possibilità di operare su di un set di *canali virtuali indipendenti*, ottenibile eseguendo un opportuno *signal processing* dal lato del trasmettitore, purché quest'ultimo sia a conoscenza dei valori di  $\mathbf{H}$ ; in tal caso si conseguono le prestazioni *ottime* dopo aver ripartito la potenza sui diversi canali virtuali con la tecnica del *riempimento d'acqua*.
  - Ma siamo solo a metà capitolo! Qui il discorso *si allarga* introducendo la tecnica della *multiplazione spaziale*, ossia dell'invia di diversi messaggi in simultanea dalle diverse antenne di trasmissione. Il ricevitore multiantenna può allora applicare diverse strategie di decodifica, di *massima verosimiglianza* o ML, *sphere decoding*, *zero forcing*, MMSE, VBLAST.
  - Si passa quindi a trattare la trasmissione multiutente o MU - MIMO, in cui le precedenti tecniche vengono per così dire *ribaltate* al trasmettitore (purché conosca  $\mathbf{H}$ ) che può così effettuare il *precoding* dei messaggi da trasmettere. Nel caso di una trasmissione FDD sussiste quindi il problema di comunicare  $\mathbf{H}$  tra Rx a Tx, oppure di realizzare un *beamforming opportunistico*.
  - Nella trasmissione MIMO - OFDM alla *molteplicità* delle antenne si aggiunge quella delle sottoportanti, risolvendo allo stesso tempo in modo semplice il problema della *equalizzazione* necessaria alle velocità più elevate. Il canale risultante acquisisce oltre alla *diversità* spaziale anche quella di *frequenza*, permettendo di definire *codici spazio-tempo-frequenza* in grado

di trarre vantaggio da entrambe. La trattazione dei sistemi *multiutente* MU-MIMO-OFDM si focalizza al caso TDD che *non* comporta la trasmissione della matrice  $H$  tra utenti mobili e stazione radio base (BS) e permette la definizione dei *blocchi di coerenza* entro i quali le parti si alternano a trasmettere, mentre la BASE STATION stima il canale di *downlink* mediante opportune *sequenze pilota ortogonali*. Il caso viene quindi calato nel contesto delle moderne *reti cellulari*, per le quali si forniscono gli opportuni rimandi di approfondimento.

- Il capitolo si conclude con l'applicazione della tecnica MISO al caso della diffusione *broadcast televisiva digitale* DVB-T mediante una *single frequency network* o SFN, in cui dopo una introduzione all'architettura ed agli aspetti trasmissivi, si approfondisce quello della sincronizzazione da parte del ricevitore TV dei simboli OFDM trasmessi da molteplici ripetitori, mediante l'utilizzo del segnale GPS e l'inserimento nel flusso MPEG di uno speciale pacchetto *mega frame initialization packet* o MIP.

Queste le novità in cui l'edizione 2.0 differisce rispetto alla 1.7 (sì, ho saltato due decimali, ma ci voleva!) raccontate per esteso presso <https://teoriadeisignali.it/libro/NEWS.txt>. Oltre, come sempre, alla miriade di altri aggiustamenti e precisazioni.

Posso dire di essere riuscito a mettere tutto dentro? Di certo gli ultimi sforzi pongono il testo su di un livello ancora più ambizioso! Anche se c'è ancora la situazione della quarta parte, che non ho toccato, e che potrebbe crescere includendo almeno i tratti essenziali di *cose di tutti giorni* come la *telefonia mobile*, l'IPv6, il *bluetooth*, il wireless ottico, il GPS... ma probabilmente queste possono ancora attendere: prima vorrei riuscire ad affrontare due argomenti più di base, il primo già acquisito dalla tecnologia, ed il secondo emergente. Si tratta rispettivamente della *software digital radio* o SDR, ossia le particolarità che assumono i processi di *mo-demodulazione* quando realizzati su dati campionati, e dei *segnali sui grafi*, che sfruttano le relazioni non topologiche<sup>8</sup> definite da una matrice di adiacenza, per sviluppare su questo tipo di segnali una analisi spettrale e definire approcci a filtraggio, sottocampionamento, inferenza e predizione. A chi può chiedersi *Si, ma cosa sono questi segnali sui grafi?* rispondo *di tutto*, dalle reti di sensori ai social network alle reti reputazionali, fino alle reti biologiche, di interazione proteica e malattia-farmaco, per arrivare alla medicina di precisione. E ti pare poco?

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

*Alessandro Falaschi, Settembre 2022*

---

<sup>8</sup>Mentre per i campioni di segnale nel tempo la topologia associata è definita dalla relazione di vicinanza unidirezionale *uno contro l'altro*, e per le immagini la topologia corrisponde a quella di una mappa spaziale bidimensionale, per i dati sui grafi la topologia è definita a partire dalla *matrice di adiacenza*, che si fa beffe di mappe e sequenze.

L'opera

# ***Trasmissione dei Segnali e Sistemi di Telecomunicazione***

è il risultato di un progetto ventennale di cultura libera, aggiornato di continuo ed evolutosi 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>

e tutte le risorse relative al testo sono accessibili presso

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

Puoi contribuire al suo successo promuovendone la diffusione e supportarne lo sviluppo attraverso una donazione, in buona parte devoluta ai progetti *open source*<sup>1</sup> che ne hanno resa possibile realizzazione e divulgazione. Ai donatori viene accordato un accesso *vitalizio* al formato PDF *navigabile* di tutte le edizioni presenti *e future*.

---

1

- . Lyx - <http://www.lyx.org/>
- . L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X - <https://www.latex-project.org/>
- . TeX Users Group - <https://tug.org/>
- . Inkscape - <http://www.inkscape.org/>
- . Gnuplot - <http://www.gnuplot.info/>
- . Octave - <http://www.gnu.org/software/octave/>
- . Geany - <https://www.geany.org/>
- . Linux - <https://www.linux.it/>
- . Free Software Foundation - <https://shop.fsf.org/>
- . GNOME Foundation - <https://www.gnome.org/>
- . Mozilla Foundation - <https://www.mozilla.org/it/>
- . Wikipedia - <https://it.wikipedia.org>
- . Internet Archive - <https://archive.org/about/>
- . Creative Commons - <https://creativecommons.it/chapterIT/>
- . WordPress - <https://it.wordpress.org/>
- . Phplist - <https://www.phplist.org/>