

Indice

Prefazione	i	2 Serie di Fourier e spazio dei segnali	35
Cultura libera	ii	2.1 Prerequisiti trigonometrici	35
Complimentary Edition	iii	2.1.1 Numeri complessi	35
Istruzioni per l'uso	iii	2.1.2 Formula di Eulero	36
Prefazione all'edizione 2.0	iv	2.1.3 Fasore	37
1 Una visione di insieme	1	2.2 Serie di Fourier	38
1.1 Trasmissione dei segnali e dell'informazione	1	2.2.1 Serie di Fourier per segnali reali	39
1.2 Segnali analogici e numerici	3	2.2.1.1 Simmetria coniugata o Hermitiana	39
1.2.1 Segnale analogico	3	2.2.1.2 Interpretazione dei coefficienti di Fourier come fasori	40
1.2.1.1 Rappresentazione frequenziale dei segnali analogici	4	2.2.1.3 Serie trigonometrica	41
1.2.1.2 Transito dei segnali attraverso sistemi fisici	4	2.2.1.4 Serie di Fourier di un'onda rettangolare	42
1.2.2 Trasmissione numerica	5	2.2.2 Serie di Fourier troncata	44
1.3 Segnali aleatori	9	2.3 Teorema di Parseval	45
1.3.1 Calcolo delle probabilità e statistica	9	2.4 Spazio dei segnali	47
1.3.1.1 Autocorrelazione e densità di potenza	9	2.4.1 Spazio metrico	47
1.3.1.2 Teoria del traffico	10	2.4.2 Spazio lineare	48
1.4 Sistemi di telecomunicazione	10	2.4.3 Spazio prodotto interno e spazio di Hilbert	50
1.5 Classi di segnale ed operazioni relative	13	2.4.4 Spazi a dimensionalità infinita	53
1.5.1 Spettro di segnale	17	2.4.4.1 Spazio dei segnali periodici	54
1.5.1.1 Segnale limitato in banda	18	2.4.4.2 Spazio dei segnali di energia e di potenza	55
1.5.2 Operazioni sui segnali	18	2.4.4.3 Spazio dei funzionali lineari definiti da un prodotto interno	55
1.5.2.1 Combinazione di segnali	19	2.5 Appendici	57
1.5.3 Segnali di uso frequente	20	2.5.1 Convergenza della serie di Fourier	58
1.5.3.1 Esponenziale complesso	22	2.5.1.1 Ri-definizione dei coefficienti di Fourier	59
1.6 Caratteristiche dei sistemi	25	2.5.2 Sviluppo in serie per alcuni segnali	59
1.6.1 Sistema lineare e permanente	25	3 Trasformata di Fourier e convoluzione	61
1.6.2 Non linearità	27	3.1 Dalla serie alla trasformata	61
I Teoria dei Segnali	29	3.2 Energia mutua, Parseval e densità di energia	63
Prefazione	31	3.3 Prime proprietà della trasformata di Fourier	64
		3.4 Impulso matematico	68
		3.4.1 Risposta impulsiva	70
		3.4.2 Integrale di convoluzione	71
		3.4.3 Risposta impulsiva come funzione memoria	72
		3.4.4 Convoluzione con l'impulso traslato	73
		3.5 Moltiplicazione in frequenza e nel tempo	73
		3.5.1 Moltiplicazione in frequenza (<i>filtraggio</i>)	74
		3.5.2 Moltiplicazione nel tempo (<i>modulazione e finestrazione</i>)	76
		3.6 Derivazione ed integrazione nel tempo	77

3.7	Treno di impulsi	80	5.2.1	Filtro trasversale	124
3.8	Appendici	82	5.2.2	Realizzazione numerica del filtro trasversale	125
3.8.1	Grafico della trasformata di un rettangolo ritardato	82	5.2.3	Filtro trasversale del primo ordine	127
3.8.2	Misura di una differenza di fase	83	5.2.4	Filtro a risposta impulsiva <i>infinita</i> (IIR) del primo ordine	129
3.8.3	Quanti sono i possibili modi di calcolare una trasformata?	83	5.3	Filtri numerici	131
3.8.4	Finestratura e stima spettrale	84	5.3.1	Sintesi FIR a partire dalla descrizione tempo continua	131
3.8.5	Gli esponenziali complessi come base ortogonale	86	5.3.2	Trasformata zeta e filtraggio	132
3.8.6	Trasformata di un gradino	86	5.3.2.1	Filtri a risposta impulsiva finita	132
3.8.7	Proprietà della trasformata di Fourier	87	5.3.2.2	Risposta impulsiva infinita	133
3.8.8	Trasformate di segnali	88	5.3.3	Sintesi di un filtro IIR a partire da un filtro analogico	135
4	Campionamento quantizzazione ed elaborazione numerica	89	5.3.3.1	Invarianza della risposta impulsiva	135
4.1	Teorema del campionamento	89	5.3.3.2	Corrispondenza di poli e zeri	136
4.1.1	Aliasing	92	5.3.3.3	Equazioni alle differenze	137
4.1.2	Ortogonalità delle funzioni sinc	92	5.3.3.4	Trasformazione bilineare	137
4.2	Aspetti realizzativi del campionamento	93	5.4	Filtraggio polifase	138
4.2.1	Sovracampionamento e decimazione numerica	93	5.4.1	Filtro di decimazione	138
4.2.2	Generalizzazione del filtro di restituzione	93	5.4.1.1	Decomposizione polifase	139
4.2.3	Interpolazione numerica	94	5.4.2	Filtro interpolatore	140
4.2.4	Approssimazione degli impulsi	94	5.4.2.1	Semplificazione polifase	141
4.2.5	Conversione A/D e D/A	96	5.4.3	Filtro integratore-pettine in cascata	141
4.3	Quantizzazione e codifica binaria	97	6	Probabilità processi e statistica	145
4.3.1	Quantizzazione uniforme	98	6.1	Teoria delle probabilità	145
4.3.1.1	SNR di quantizzazione	99	6.1.1	Assiomi delle probabilità	146
4.3.2	Quantizzazione non uniforme	100	6.1.2	Teoremi di base	146
4.4	Trasformata di Fourier di sequenze	102	6.1.3	Probabilità congiunta, condizionata e marginale	146
4.5	Trasformata discreta di Fourier	103	6.1.4	Probabilità a priori e a posteriori, teorema di Bayes	147
4.5.1	Relazione tra DTFT, DFT e trasformata zeta	107	6.1.5	Indipendenza statistica	148
4.5.2	Fast Fourier Transform	109	6.2	Variabili aleatorie	148
4.5.3	Relazione tra DFT e DCT	110	6.2.1	Densità di probabilità e funzione di distribuzione	149
4.5.4	DFT come un banco di filtri	111	6.2.2	Valore atteso, momento e momento centrato	150
4.6	Filtraggio numerico via DFT	112	6.2.3	Variabile aleatoria uniforme	152
4.6.1	Convoluzione discreta	112	6.2.4	Variabile aleatoria gaussiana	153
4.6.2	Convoluzione circolare	113	6.2.4.1	Probabilità di un evento gaussiano	153
4.6.3	Convoluzione tra sequenze di durata finita via DFT	113	6.2.5	Funzione caratteristica	155
4.6.4	Convoluzione di segnali via DFT	114	6.2.5.1	Densità di probabilità della somma di v.a. indipendenti	155
4.7	Riassumendo	115	6.2.5.2	Funzione caratteristica di una v.a. gaussiana	156
4.7.1	Le frequenze della DFT	116	6.2.6	Variabile aleatoria multivariata	157
4.7.2	Le ampiezze della DFT	116	6.3	Processi stazionari ed ergodici	158
4.8	Sottocampionamento	116	6.3.1	Momento come media di insieme	159
5	Filtri analogici e numerici	119	6.3.2	Media temporale	159
5.1	Filtri analogici	119			
5.1.1	Filtro analogico ad un polo	122			
5.2	Filtri digitali	123			

6.3.3	Media temporale calcolata come media di insieme	160	7.2.4	Processo gaussiano bianco limitato in banda	199
6.3.4	Processo stazionario	160	7.2.5	Processo di segnale dati	201
6.3.5	Processo stazionario ed ergodico	161	7.3	Stima spettrale	201
6.3.6	Riassumendo	162	7.3.1	Periodogramma	202
6.3.7	Processo ad aleatorietà parametrica	162	7.4	Filtraggio di segnali e processi	204
6.4	Trasformazione di v.a. e cambio di variabili	164	7.4.1	Densità spettrale in uscita da un filtro	204
6.4.1	Caso unidimensionale	164	7.4.2	Caratteristiche statistiche in uscita da un filtro	207
6.4.2	Caso multidimensionale	166	7.5	Operazioni elementari sui segnali	208
6.5	Gaussiana multidimensionale	167	7.5.1	Ritardo	209
6.5.1	Indipendenza statistica per v.a. gaussiane incorrelate	168	7.5.2	Somma tra segnali aleatori	209
6.5.2	Trasformazione lineare di v.a. gaussiane	169	7.5.3	Prodotto tra segnali aleatori	210
6.5.3	Processo gaussiano	169	7.5.4	Stima della autocorrelazione	211
6.6	Elementi di statistica	170	7.6	Filtro adattato	212
6.6.1	Test di verifica di ipotesi	170	7.6.1	Segnalazione antipodale	217
6.6.2	Funzione di verosimiglianza	171	7.6.2	Segnalazione ortogonale	217
6.6.2.1	Decisione di massima verosimiglianza	171	7.7	Appendici	218
6.6.2.2	Curva operativa	171	7.7.1	Regressione lineare	219
6.6.3	Stima di parametro	172	7.7.2	Coefficiente di correlazione di Pearson	222
6.6.3.1	Stima di massima verosimiglianza	173	7.7.3	Teorema di Wiener per processi	223
6.6.4	Stima di intervallo	174	7.7.4	Densità spettrale per onda PAM	224
6.6.4.1	Intervallo di confidenza per una frazione	178	7.7.5	Autocorrelazione di un processo in uscita da un filtro	228
6.6.5	Test chi quadro e verifica di distribuzione	179	7.7.6	Grafici di esempio	229
6.6.6	Stima di forma d'onda	181	8	Distorsione e rumore	231
6.7	Appendici	182	8.1	Misure di potenza in decibel	233
6.7.1	Approfondimento sulla gaussiana	182	8.2	Distorsione lineare	235
6.7.2	Teorema centrale del limite	183	8.2.1	Distorsione di ampiezza	236
6.7.3	Matrice di covarianza e forma quadratica associata	185	8.2.2	Distorsione di fase	237
7	Correlazione, densità spettrale e filtraggio	189	8.2.3	Effetto della distorsione lineare sui segnali	239
7.1	Correlazione, covarianza e autocorrelazione	189	8.3	Distorsione di non linearità	241
7.1.1	Correlazione tra variabili aleatorie	190	8.3.1	Ingresso sinusoidale	242
7.1.2	Covarianza, indipendenza statistica e incorrelazione	192	8.3.2	Ingresso aleatorio	243
7.1.3	Correlazione di un processo stazionario ergodico	193	8.4	Disturbi additivi	244
7.1.4	Autocorrelazione e intercorrelazione di segnali certi	193	8.4.1	Valutazione dell'SNR dovuto a diverse fonti di disturbo	244
7.1.5	Proprietà dell'autocorrelazione	195	8.4.2	Rumore gaussiano	245
7.2	Spettro di densità di potenza	197	8.4.2.1	Rumore termico nei bipoli passivi	245
7.2.1	Teorema di Wiener	197	8.4.2.2	Rumore termico di un generatore di segnale	246
7.2.2	Segnale periodico	198	8.5	Appendice	247
7.2.3	Processo armonico	199	8.5.1	Distorsione non lineare del rumore gaussiano	247
			9	Teoria dell'informazione e codifica di sorgente	249
			9.1	Codifica di sorgente discreta	250
			9.1.1	Entropia	251
			9.1.1.1	Entropia di sorgente binaria	252

9.1.1.2	Ridondanza	252	9.5.4.2	Funzione distorsione-velocità per sorgente gaussiana con memoria	276
9.1.1.3	Entropia di sorgente L-aria . . .	253	9.5.4.3	Sorgente non gaussiana	278
9.1.2	Intensità informativa e codifica binaria	253	9.6	Appendici	278
9.1.2.1	Teorema della codifica di sorgente	254	9.6.1	Metodo dei moltiplicatori di La- grange	279
9.1.2.2	Codebook e codeword	254	9.6.2	Massimo dell'entropia per variabile aleatoria gaussiana	281
9.1.2.3	Efficienza del codice	254	9.6.3	Misura di piatezza spettrale di processo gaussiano	282
9.1.3	Codifica con lunghezza di parola variabile	255	9.6.4	Autocorrelazione di sequenza auto- regressiva	283
9.1.3.1	Regola del prefisso	255	10	Codifica di sorgente multimediale	285
9.1.3.2	Codice ottimo	256	10.1	Codifica audio	285
9.1.3.3	Codice di Huffman	257	10.1.1	Codifica di forma d'onda	286
9.1.3.4	Codifica dinamica (di Huffman) .	258	10.1.1.1	DPCM o PCM Differenziale . . .	286
9.1.4	Codifica per blocchi	259	10.1.1.2	ADPCM o DPCM Adattivo . . .	287
9.1.4.1	Compromesso velocità-ritardo .	260	10.1.1.3	Codifica per sottobande	288
9.2	Sorgente discreta con memoria . . .	261	10.1.2	Codifica basata su modello	289
9.2.1	Sorgente Markoviana	261	10.1.2.1	Produzione del segnale vocale . .	290
9.2.1.1	Autovettore della matrice di transizione	262	10.1.2.2	Codifica a predizione lineare - LPC	292
9.2.2	Codifica per sorgenti con memoria	262	10.1.2.3	Predizione lineare ad eccitazione residuale - RELP	295
9.2.2.1	Codifica run-length	263	10.1.2.4	Quantizzazione vettoriale del- l'eccitazione	297
9.2.2.2	Codifica predittiva	263	10.1.2.5	Predizione lineare ad eccitazione codificata - CELP	298
9.2.3	Compressione basata su dizionario	264	10.1.3	Codifica psicoacustica	300
9.2.3.1	Metodo di Lempel-Ziv-Welsh . .	264	10.2	Codifica di immagine	303
9.2.3.2	Algoritmo Deflate	265	10.2.1	Dimensioni	303
9.3	Contenuto informativo di sorgente continua	266	10.2.2	Spazio dei colori	305
9.3.1	Entropia differenziale di sorgente continua	266	10.2.3	Formato GIF	308
9.3.2	Entropia differenziale di sorgente gaussiana	267	10.2.4	Codifica JPEG	309
9.3.2.1	Massima informazione per pro- cesso gaussiano	267	10.3	Codifica video	315
9.4	Misure di informazione per una coppia di v.a.	268	10.3.1	Standard video	321
9.4.1	Entropia congiunta	268	10.3.1.1	H.261	321
9.4.2	Entropia condizionale	268	10.3.1.2	H.263	324
9.4.3	Informazione mutua media	269	10.3.1.3	MPEG-1	325
9.4.4	Entropia relativa	270	10.3.1.4	MPEG-2	326
9.4.5	Entropia di Rényi	270	10.3.2	Contenitori	328
9.5	Codifica di sorgente con perdita di informazione	271	10.3.2.1	Transport Stream	330
9.5.1	La distorsione di codifica	272	II	Modulazione per segnali analogici	333
9.5.2	Funzione velocità-distorsione . . .	272	Prefazione	335	
9.5.2.1	Shannon lower bound	273	11	Segnali modulati	337
9.5.3	Curva velocità-distorsione per sor- gente gaussiana	274	11.1	Contesti applicativi e prime definizioni	338
9.5.4	Sorgente continua con memoria . .	275			
9.5.4.1	Entropia e potenza entropica di sorgente gaussiana con memoria	275			

11.1.1	Multiplazione a divisione di frequenza	338	12.2.2.2	Phase Locked Loop o <i>PLL</i>	368
11.1.1.1	Collegamenti punto-multipunto	338	12.2.3	Errori di fase e di frequenza	370
11.1.1.2	Collegamenti punto-punto	338	12.2.3.1	Demodulazione I e Q in presenza di errore di fase	370
11.1.1.3	Accesso multiplo	338	12.2.4	Demodulazione incoerente	371
11.1.2	Canale telefonico	339	12.2.5	Demodulatore di inviluppo per AM-BLD-PI	372
11.1.3	Antenne e lunghezza d'onda	340	12.2.6	Demodulazione per segnali a banda laterale unica e ridotta	372
11.1.4	Banda di segnale	341	12.2.7	Demodulatore eterodina	373
11.2	Rappresentazione dei segnali modulati	341	12.2.7.1	Supereterodina	374
11.2.1	Inviluppo complesso	341	12.2.7.2	Frequenza immagine	375
11.2.2	Modulazione di ampiezza, di fase e di frequenza	342	12.3	Modulazione angolare	377
11.2.3	Componenti analogiche di bassa frequenza	343	12.3.1	Generazione di un segnale a modulazione angolare	378
11.2.4	Demodulazione in fase e quadratura	343	12.3.2	Ricezione di un segnale a modulazione angolare	379
11.2.5	Trasformata di Hilbert	345	12.3.2.1	Ricevitore a PLL	379
11.2.6	Segnale analitico	346	12.3.2.2	Ricevitore a discriminatore	380
11.2.7	Densità spettrale di segnali passa-banda	348	12.3.3	Densità spettrale di segnali a modulazione angolare	381
11.2.8	Schema delle trasformazioni	349	12.3.3.1	Segnale modulante sinusoidale	382
11.3	Densità spettrale delle c. analogiche di processi	350	12.3.3.2	Regola di Carson	385
11.4	Appendici	352	12.3.3.3	Densità spettrale per FM ad alto indice	386
11.4.1	Filtro di Hilbert	352	12.3.3.4	Indice di modulazione per processi	387
11.4.2	Trasformata di Hilbert di un segnale modulato	353	12.3.3.5	Densità spettrale per FM a basso indice	387
11.4.3	Trasmissione a banda laterale unica	354	12.4	Appendici	388
11.4.4	Processo passa banda	355	12.4.1	Mixer mediante non linearità	388
11.4.4.1	Conclusioni	357	12.4.2	Mixer a commutazione	388
11.4.4.2	Processo gaussiano bianco limitato in banda	357	12.4.3	Sintesi di frequenza con PLL ed oscillatore a cristallo	389
11.4.5	Autocorrelazione di processi passa-banda	358	12.4.3.1	Sintesi digitale diretta	391
12	Modulazione (e ritorno) di segnali analogici	361	12.4.4	Densità di potenza per segnali AM a banda laterale unica	391
12.1	Modulazione di ampiezza - <i>AM</i>	361	12.4.5	Calcolo della potenza di un segnale AM BLU	391
12.1.1	Banda laterale doppia - <i>BLD</i>	362	12.4.5.1	Calcolo della potenza di segnali BLD-PI, PS, PPS	392
12.1.1.1	Portante soppressa - <i>PS</i>	363	12.4.6	Modulazione FM a basso indice	392
12.1.1.2	Portante intera - <i>PI</i>	363	13	Distorsione per segnali modulati	395
12.1.1.3	Portante parzialmente soppressa - <i>PPS</i>	364	13.1	Filtraggio passa banda	395
12.1.1.4	Efficienza energetica per portante intera e <i>PPS</i>	364	13.1.1	Intermodulazione tra componenti analogiche	396
12.1.2	Banda laterale unica - <i>BLU</i>	364	13.1.1.1	Equalizzazione in fase e quadratura	397
12.1.2.1	Generazione di segnali <i>BLU</i>	366	13.1.1.2	Equalizzazione complessa	397
12.1.3	Banda laterale ridotta - <i>BLR</i>	366	13.1.1.3	Canale equalizzato	398
12.1.4	Potenza di un segnale AM	367			
12.2	Demodulazione di ampiezza	367			
12.2.1	Demodulazione coerente o omodina	367			
12.2.2	Sincronizzazione di portante	368			
12.2.2.1	Metodo della quadratura	368			

15.6.2.1	Codice a blocco	469	16.8.10	Modulazione codificata	524
15.6.2.2	Codice a ripetizione n:1	471	16.8.11	Portanti pilota	525
15.6.2.3	Interleaving	472	16.8.12	Accesso multiplo OFDMA	526
15.6.3	Detezione di errore	473	16.9	Sistemi a spettro espanso	526
15.6.3.1	Controllo di parità	473	16.9.1	Sequenze pseudo-casuali	527
15.6.3.2	Somma di controllo o <i>checksum</i>	474	16.9.2	Modulazione per sequenza diretta	528
15.6.3.3	Codice polinomiale e CRC	474	16.9.2.1	Guadagno di processo	529
15.7	Sincronizzazione dati	477	16.9.2.2	Despreading	529
15.7.1	Trasmissione asincrona	478	16.9.2.3	Prestazioni in presenza di rumore	530
15.7.2	Trasmissione sincrona	480	16.9.2.4	Prestazioni in presenza di un tono interferente	531
15.7.2.1	Sincronizzazione di simbolo	480	16.9.2.5	Accesso multiplo CDMA	532
15.7.2.2	Sincronizzazione di parola e di trama	481	16.9.3	Sequenze pseudo casuali	533
15.8	Appendici	482	16.9.4	Frequency Hopping	535
15.8.1	Potenza di un segnale dati	482	16.9.5	Time Hopping o UWB	536
15.8.2	Prestazioni del ricevitore ottimo equalizzato	483	16.10	Altre possibilità	536
15.8.2.1	Equalizzazione distribuita	485	16.11	Sincronizzazione	539
15.8.2.2	Discussione	485	16.11.1	Sincronizzazione per sistemi a spettro espanso	540
15.8.3	Esercizio	486	16.12	Appendici	542
15.8.4	Codifica di carattere	488	16.12.1	Ortogonalità tra simboli sinusoidali	542
15.8.4.1	Codifica UNICODE	489	16.12.2	Prestazioni della modulazione OFDM	544
16	Modulazione numerica	491	16.12.2.1	Calcolo della P_e per portante	544
16.1	Modulazione di ampiezza	492	16.12.2.2	Potenza di rumore per portante	546
16.1.1	Modulazione BPSK	492	16.12.2.3	Prestazioni per portante	548
16.1.2	Modulazione L-ASK	493	16.12.2.4	Caso di rumore bianco	548
16.1.3	Valutazione delle prestazioni	495	16.12.2.5	Confronto con la portante singola	548
16.2	Modulazione di fase	497	16.12.3	Allocazione ottima della potenza OFDM	549
16.2.1	Modulazione QPSK ed L-PSK	497	17	Capacità e codifica di canale	551
16.2.2	Prestazioni QPSK	499	17.1	Dove arrivare, e come partire	551
16.2.3	Prestazioni L-PSK	501	17.1.1	Canale binario simmetrico	552
16.3	Modulazione QAM	502	17.1.2	Decisione a verosimiglianza ed a posteriori	552
16.3.1	Prestazioni di QAM	504	17.1.3	Informazione mutua media per canale numerico L -ario	554
16.4	Codifica differenziale	506	17.2	Capacità di canale discreto	556
16.4.1	Modulazione DBPSK	507	17.2.1	Capacità di un canale L -ario non rumoroso	557
16.4.2	DQPSK	508	17.2.2	Capacità del canale binario simme- trico	557
16.5	Modulazione di frequenza L-FSK	509	17.3	Capacità di canale continuo	558
16.5.1	Modulazione FSK ortogonale	510	17.3.1	Sistema di comunicazione ideale	560
16.6	Demodulazione incoerente	513	17.3.2	Minima energia per bit	561
16.7	Schema riassuntivo delle prestazioni	514	17.3.3	Compromesso banda-potenza e capacità massima	561
16.8	Modulazione OFDM	515	17.3.4	Limite inferiore per $\frac{E_b}{N_0}$	562
16.8.1	Rappresentazione nel tempo ed in frequenza	515	17.3.5	Confronto con le prestazioni di sistemi di modulazione reali	562
16.8.2	Architettura di modulazione	518	17.4	Codifica di canale	563
16.8.3	Efficienza dell'OFDM	520	17.4.1	Codifica a blocco	565
16.8.4	Architettura di demodulazione	520			
16.8.5	Prestazioni	521			
16.8.6	Sensibilità alla temporizzazione	521			
16.8.7	Equalizzazione	522			
16.8.8	Codifica differenziale	522			
16.8.9	Distribuzione ottima di potenza	523			

17.4.1.1	Codice di Hamming	567	18.4	Equalizzazione numerica	618
17.4.1.2	Codice ciclico	570	18.4.1	Equalizzatore zero forcing	620
17.4.1.3	Codice BCH	571	18.4.2	Equalizzatore MMSE e filtro di Wiener	622
17.4.1.4	Codice di Reed-Solomon	572	18.4.3	Metodo del gradiente	627
17.4.1.5	Codifica concatenata	573	18.4.3.1	Equalizzazione adattiva LMS	627
17.4.2	Codifica convoluzionale	574	18.4.4	Equalizzatore a reazione	629
17.4.2.1	Criterio di decodifica	576	18.4.5	Equalizzazione come sequenza di massima verosimiglianza	631
17.4.2.2	Tail biting	580	18.4.6	Confronto delle prestazioni di equalizzazione	633
17.4.2.3	Decodifica a decisione soffice	581	18.4.7	Considerazioni conclusive	633
17.4.2.4	Altri schemi di codifica convoluzionale	582	18.5	Appendici	634
17.4.2.5	Codice perforato	582	18.5.1	Potenza assorbita da un bipolo	634
17.4.2.6	Concatenazione Solomon-Viterbi	583	18.5.2	Condizioni per il massimo trasferimento di potenza	635
17.4.2.7	Viterbi con uscite soffici	583	18.5.3	Potenza ceduta ad un carico $Z_c(f) \neq Z_g^*(f)$	635
17.5	Verso il limite di Shannon	586	19 Collegamenti in cavo e fibra ottica	637	
17.5.1	Codifica turbo	586	19.1	Bilancio di collegamento	638
17.5.2	Codifica a bassa densità di controllo parità	590	19.2	Collegamenti in cavo	640
17.5.2.1	Decodifica iterativa	592	19.2.1	Costanti distribuite, grandezze derivate, e condizioni generali	640
17.5.2.2	Attenti a quel ciclo	594	19.2.2	Trasmissione in cavo	642
17.5.2.3	Implementazione Min-Sum	594	19.2.2.1	Casi limite	645
17.5.2.4	Prestazioni	595	19.2.3	Tipologie di cavi per le telecomunicazioni	646
17.5.2.5	Adozione	597	19.2.3.1	Coppia simmetrica	646
18 Caratterizzazione circuitale, rumore ed equalizzazione dati	599		19.2.3.2	Cavo coassiale	648
18.1	Modello circuitale dei segnali	599	19.3	Collegamenti in fibra ottica	649
18.1.1	Bipoli	600	19.3.1	Trasmissione ottica	650
18.1.1.1	Potenza assorbita da un bipolo	601	19.3.2	Bilancio di collegamento	654
18.1.1.2	Connessione tra generatore e carico	601	19.3.3	Seconda generazione	658
18.1.1.3	Potenza disponibile e massimo trasferimento di potenza	602	19.3.3.1	Amplificazione ottica	658
18.1.1.4	Adattamento di impedenza per assenza di distorsione lineare	602	19.3.3.2	Moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda - WDM	659
18.1.2	Reti due porte	603	19.3.3.3	Controllo della dispersione	660
18.1.2.1	Modello circuitale	603	19.3.4	Sistemi in fibra ottica	661
18.1.2.2	Schema simbolico	604	19.3.4.1	Dalle fibre ottiche alle reti ottiche	661
18.1.2.3	Trasferimento energetico	604	19.3.4.2	Rete ottica di trasporto	663
18.2	Rumore nelle reti due porte	607	19.3.4.3	Rete passiva di distribuzione	664
18.2.1	Reti passive	608	19.3.5	Ridondanza e pericoli naturali	664
18.2.1.1	Rapporto SNR in uscita	608	20 Collegamenti radio	665	
18.2.1.2	Fattore di rumore per reti passive	609	20.1	Trasduzione elettromagnetica	666
18.2.2	Reti attive	609	20.2	Bilancio di collegamento per spazio libero	667
18.2.2.1	Fattore di rumore per reti attive	609	20.3	Fenomeni propagativi e atten. supplementare	668
18.2.3	Fattore di rumore per reti in cascata	611	20.3.1	Condizioni di visibilità	669
18.3	Rumore nei ripetitori	614	20.3.2	Condizionamenti atmosferici	670
18.3.1	Ripetitore trasparente	615			
18.3.1.1	Rumore termico accumulato	615			
18.3.1.2	Compromesso tra rumore termico e distorsione	616			
18.3.2	Ripetitore rigenerativo	617			

20.3.2.1	Dimensionamento di un collegamento soggetto a pioggia	671	21.5.5	Compromesso diversità - multiplazione	730
20.3.3	Cammini multipli	672	21.6	Trasmissione multiutente o MU - MIMO	732
20.3.3.1	Collegamento in diversità	674	21.6.1	Precodifica	733
20.4	Collegamenti radiomobili	675	21.6.2	Controllo di potenza	734
20.4.1	Le componenti del fading	675	21.6.3	Prioritizzazione degli utenti	734
20.4.2	Path loss	677	21.6.4	Precodifica con feedback limitato	735
20.4.3	Fading su larga scala e shadowing	677	21.6.5	Beamforming	738
20.4.4	Fading su piccola scala	678	21.7	Trasmissione MIMO - OFDM	739
20.4.5	Fading selettivo in frequenza	682	21.7.1	Modello di canale MIMO-OFDM	740
20.4.6	Dispersione spettrale e variabilità temporale	686	21.7.2	Codice spazio-tempo-frequenza	741
20.4.7	Tipologia di canale radiomobile	689	21.7.3	Sistema multiutente MU-MIMO-OFDM	742
20.5	Appendici	690	21.7.3.1	Ripartizione delle risorse	744
20.5.1	Probabilità di errore in presenza di fading di Rayleigh	690	21.7.3.2	Stima di canale	746
20.5.2	Ricevitore Rake	692	21.7.3.3	Rete cellulare	748
20.5.3	Allocazione delle frequenze radio	694	21.8	Single frequency network - SFN	750
20.5.4	Caratterizzazione della dispersione temporale	696	21.9	Appendice	755
21	Sistemi multiantenna o MIMO	697	21.9.1	Entropia di variabile gaussiana complessa multivariata	755
21.1	Lo scenario delle possibilità	698			
21.2	Il canale MIMO	701	IV	Sistemi di Telecomunicazione	759
21.3	Diversità spaziale	702		Prefazione	761
21.3.1	Ricevitore multi-antenna	702	22	Sistema di servizio, teoria del traffico, e delle reti	763
21.3.1.1	Selezione di diversità	703	22.1	Distribuzione binomiale per popolazione finita	763
21.3.1.2	Combinazione di massimo rapporto - MRC	704	22.2	Distribuzione di Poisson	765
21.3.1.3	Combinazione equal gain	707	22.2.1	Variabile aleatoria esponenziale negativa	767
21.3.2	Trasmettitore multiantenna	707	22.3	Sistema di servizio orientato alla perdita	768
21.3.2.1	Codice a traliccio spazio - tempo	708	22.3.1	Frequenza di arrivo e di servizio	768
21.3.2.2	Codice a blocco spazio - tempo	708	22.3.2	Intensità media di traffico	769
21.3.2.3	Codice di Alamouti	709	22.3.3	Probabilità di rifiuto	769
21.3.2.4	Ricezione multiantenna di un codice di Alamouti	711	22.3.4	Efficienza di giunzione	771
21.3.3	Prestazioni limite	713	22.3.5	Validità del modello	772
21.3.4	Codici sub ottimi	714	22.4	Sistemi di servizio orientati al ritardo	773
21.4	Capacità di canale con fading di Rayleigh	716	22.4.1	Risultato di Little	774
21.4.1	Capacità del canale MIMO	717	22.4.2	Sistemi a coda infinita ed a servente unico	774
21.4.1.1	Trasmissione a potenza differenziata	720	22.4.3	Sistemi a coda finita e con più serventi	776
21.4.1.2	Codifica a riempimento d'acqua	722	22.5	Reti per trasmissione dati	778
21.5	Multiplazione spaziale	725	22.5.1	Il pacchetto dati	779
21.5.1	Ricevitore a massima verosimiglianza (ML)	726	22.5.2	Modo di trasferimento delle informazioni	780
21.5.2	Ricevitore zero-forcing	726	22.5.2.1	Schema di multiplazione	780
21.5.3	Ricevitore lineare a minimo errore medio quadratico L-MMSE	727	22.5.2.2	Principio di commutazione	781
21.5.4	Ricevitore a cancellazioni successive - VBLAST	728			

22.5.2.3	Architettura protocollare	784	23.2	ATM	812
22.6	Protocolli a richiesta automatica	787	23.2.1	Architettura ATM	813
22.6.1	Send and wait	787	23.2.2	Strato fisico	813
22.6.2	Continuous RQ	788	23.2.3	Strato ATM	814
22.6.2.1	Go back N	789	23.2.4	Classi di traffico e Qualità del Servizio (QoS)	815
22.6.2.2	Selective repeat	789	23.2.5	Indirizzamento	817
22.6.2.3	Efficienza dei protocolli a richiesta automatica	790	23.2.6	Strato di adattamento	817
22.6.3	Controllo di flusso	791	23.2.7	IP su ATM classico	819
22.6.3.1	Round trip time	791	23.2.8	LANE, NHRP e MPOA	820
22.6.3.2	Finestra scorrevole	792	23.2.9	MPLS	821
22.6.3.3	Numero di sequenza	793			
23	Reti a pacchetto	795	24	Reti a commutazione di circuito	823
23.1	La rete Internet	795	24.1	Introduzione	823
23.1.1	Gli indirizzi	797	24.1.1	Elementi della rete telefonica	824
23.1.1.1	IP ed Ethernet	797	24.1.2	La rete di accesso	824
23.1.1.2	Sottoreti	797	24.2	Multiplazione	825
23.1.1.3	Intranet	798	24.2.1	Multiplazione a divisione di tempo	826
23.1.1.4	Domain Name Service (DNS)	798	24.3	Rete plesiocrona	827
23.1.1.5	Indirizzi TCP	799	24.3.1	Trama PCM	827
23.1.2	TCP	799	24.3.2	Messaggi di segnalazione	829
23.1.2.1	Il pacchetto TCP	800	24.3.3	Sincronizzazione di centrale	830
23.1.2.2	Apertura e chiusura della connessione	801	24.3.4	Multiplazione asincrona e PDH	831
23.1.2.3	Protocollo a finestra	801	24.3.4.1	Bit stuffing	832
23.1.2.4	UDP	803	24.3.4.2	Add and Drop Multiplexer - ADM	832
23.1.3	IP	803	24.3.5	Sincronizzazione di rete	833
23.1.3.1	Intestazione IP	803	24.3.5.1	Elastic store	833
23.1.3.2	Indirizzamento e Routing	804	24.4	Gerarchia digitale sincrona	834
23.1.3.3	Subnetting e Supernetting	805	24.5	Topologia di rete	838
23.1.3.4	Classless Interdomain Routing - CIDR	805	24.6	Rete in fibra ottica	839
23.1.3.5	Longest Match	805	24.6.1	Dispositivi SDH	839
23.1.3.6	Sistemi Autonomi e Border Gateway	806	24.6.2	Topologia ad anello	840
23.1.3.7	Multicast	806	24.6.2.1	Rete di trasporto	840
23.1.4	Ethernet	807	24.6.2.2	Rete di accesso in fibra	840
23.1.4.1	Address Resolution Protocol - ARP	807	24.6.3	Sistemi di protezione automatica	841
23.1.4.2	Formato di pacchetto	808	24.7	Instradamento	842
23.1.4.3	Collisione	809	24.8	Commutazione	843
23.1.4.4	Trasmissione	810	24.8.1	Reti a divisione di spazio	843
23.1.5	Fast e Gigabit Ethernet	810	24.8.2	Reti multistadio	843
23.1.5.1	Fast Ethernet	810	24.8.3	Commutazione numerica a divisione di tempo	844
23.1.5.2	LAN Switch	810	24.8.3.1	Time Slot Interchanger	844
23.1.5.3	Dominio di broadcast e VLAN	811	24.8.3.2	Commutazione bidimensionale	845
23.1.5.4	Gigabit Ethernet	811	24.9	Appendici	846
23.1.5.5	Packet bursting	811	24.9.1	Plain old telephony services (POTS)	846
23.1.5.6	Architettura di Gigabit Ethernet	812	24.9.2	ISDN	847
23.1.5.7	Ripetitore full-duplex e controllo di flusso	812	24.9.3	Sistema di segnalazione numero 7	848
23.1.5.8	10 Gigabit Ethernet	812	24.9.4	ADSL	850
			24.9.5	TDM mediante modulazione di ampiezza degli impulsi	852
			24.10	Riferimenti	853
			25	Broadcast	855

25.1	Trasmissione televisiva analogica . . .	855	25.3.1	Studio di produzione	861
25.1.1	Codifica di immagine	855	25.3.2	Uplink	861
25.1.2	Segnale televisivo in bianco e nero .	856	25.3.3	Transponder	862
25.1.3	Formato dell'immagine	857	25.3.4	Footprint e Downlink	863
25.1.4	Occupazione spettrale	857	25.3.5	Temperatura di antenna	864
25.1.5	Segnale di cromaticità	857	25.3.6	Ricevitore a terra	864
25.1.6	Sincronizzazione	858	25.3.7	Polarizzazione	864
25.1.7	Interferenza	858	26	Telefonia mobile	867
25.1.8	Video composito o separato	859	26.1	La trama del GSM	867
25.2	FM broadcast	859	Bibliografia		869
25.3	Collegamenti satellitari	860			

TeoriadeiSegnali.it

Elenco dei simboli

AAL	ATM Adaptation Layer
ACK	acknowledgment
ADM	Add and Drop Multiplexer
ADPCM	Adaptive Differential Pulse Coded Modulation
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AM	Amplitude Modulation
AMI	Alternate Mark Inversion
ARP	Address Resolution Protocol
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AS	Autonomous System
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCH code	codice Bose Chaudhuri Hocquenghem
BGP	Border Gateway Protocol
BLR	Banda Laterale Ridotta
BLU	Banda Laterale Unica
BPSK	Bi-Phase Shift Keying
BRAS	Broadband Remote Access Server
BRI	Basic Rate Interface
BS	Base Station
BSC	Binary Symmetric Channel
CAS	Channel Associated Signaling
CB	Coherence Block
CC	codice convoluzionale
CCS	Common Channel Signaling
CDM	Code Division Multiplex
CDMA	Code Division Multiple Access
CDN	Circuito Diretto Numerico
CELP	Code Excited Linear Prediction
CIC	Cascaded Integrator-Comb (filtro)
CIDR	Classless Interdomain Routing

COFDM	Coded OFDM
CPK	Continous Phase Keying
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access - Collision Detect
DAC	Digital to Analog Converter
DBPSK	Differential Bi Phase Shift Keying
DCT	Discrete Cosine Transform
DFE	Decision Feedback Equalizer
DFT	Discrete Fourier Transform
DL	DownLink
DLL	Delay Locked Loop
DMT	Discrete Multi Tone
DNS	Domain Name Service
DPC	Dirty Paper Coding
DPCM	Differential Pulse Coded Modulation
DPLL	Digital Phase Locked Loop
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DTFT	Discete Time Fourier Transform
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
f.d.t.	funzione di trasferimento
FDM	Frequency Division Multiplex
FEC	Forward Error Correction
FEXT	Far End Crosstalk
FFT	Fast Fourier Transform
FIFO	First In First Out
FIR	Finite Impulse Response
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
FTTH	Fiber To The Home
GIF	Graphics Interchange Format
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GOB	Group Of (macro)Blocks
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGP	Interior Gateway Protocols
IIR	Infinite Impulse Response
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Service Data Network
ISI	Inter Symbol Interference
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LAN	Local Area Network

LDPC	Low Density Parity Check
LLC	Logical Link Control
LMS	Least Mean Square
LOS	Line Of Sight
LPC	Linear Predictive Coding
MAC	Media Access Control
MFN	Multiple Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIP	Megaframe Initialization Packet
MISO	Multiple Input Single Output
ML	Maximum Likelihood
MLSD	Maximum Likelihood Sequence Detection
MMSE	Minimum Mean Square Error
MPEG	Moving Pictures Expert Group
MRC	Maximal Ratio Combining
MSK	Minimum Shift Keying
MU-MIMO	Multiple User MIMO
NEXT	Near End Crosstalk
OFDM	Ortogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Ortogonal Frequency Division Multiple Access
PCM	Pulse Coded Modulation
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PLL	Phase Locked Loop
PON	Passive Optical Network
POTS	Plain Old Telephony Services
PPS	Pulse Per Second
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QV	Quantizzazione Vettoriale
REL	Residual Excited Linear Prediction
SAP	Service Access Point
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDMA	Space Division Multiple Access
SFBC	Space Frequency Block Code
SFN	Single Frequency Network
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal / Interferent and Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SISO	Soft Input, Soft Output
SNAP	Subnetwork Access Protocol
SOVA	Soft Output Viterbi Algorithm
STBC	Space Time Block Code
STC	Space Time Code

STFBC	Space Time Frequency Block Code
STM	Synchronous Transport Module
STS	Synchronization Time Stamp
STTC	Space Time Trellis Code
SVD	Singular Value Decomposition
TCP	Transport Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UL	UpLink
VBLAST	Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VLAN	Virtual LAN
ZF	Zero Forcing

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*¹ 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^AT_EX - <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/>