

Alessandro Falaschi

Elementi di Trasmissione dei segnali e Sistemi di telecomunicazione

II edizione



Copyright © MMIX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 a/b
00173 Roma
(06) 93781065
fax (06) 72678427

ISBN 978-88-548-2798-1

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: aprile 2003
I ristampa: aprile 2006
II edizione: ottobre 2009

Indice

1	Generalità	2
1.1	Trasmissione dell'informazione	2
1.2	Trasmissioni numeriche	3
1.3	Segnali analogici, certi ed aleatori	6
1.3.1	Rappresentazione di segnali analogici	6
1.3.2	Rappresentazione di processi aleatori	7
1.3.3	Transito dei segnali attraverso sistemi fisici	7
1.4	Segnali numerici	8
1.5	Teoria delle probabilità	9
1.6	Sistemi di Telecomunicazione	9
1.7	Segnali e sistemi	12
1.7.1	Caratteristiche dei sistemi	12
1.7.2	Caratteristiche dei segnali	13
	Segnale di potenza	13
	Segnale periodico	13
	Segnale di energia	13
	Segnale impulsivo	13
	Riassumendo	13
	Esempi di segnali di energia	14
	Esempi di segnale a durata limitata	14
1.7.3	Aspetti fisici delle grandezze energetiche	14
	Potenza istantanea	14
	Energia	14
	Potenza dissipata	15
	Valore efficace	15
2	Serie di Fourier	16
2.1	Prerequisiti trigonometrici	16
2.1.1	Numeri complessi	16
2.1.2	Formule di Eulero	16
2.1.3	Fasori	17
2.2	Serie di Fourier	17
2.2.1	Segnali reali	19
2.2.1.1	Simmetria Coniugata	19
2.2.1.2	Interpretazione degli X_n come fasori	20
2.2.1.3	Serie Trigonometrica	20
2.2.1.4	Serie di Fourier di un'onda rettangolare	21
	Esercizio	21

	Definizione della funzione sinc	21
	Relazione tra i coefficienti della serie ed i parametri dell'onda quadra	22
2.2.2	Serie di Fourier a banda limitata	23
2.3	Teorema di Parseval	24
	Ortogonalità degli esponenziali complessi	24
	Spettro di Potenza per segnali periodici	24
2.4	Appendici	25
2.4.1	Algebra Vettoriale	25
	Spazio normato	25
	Spazio dei segnali periodici	26
	Ri-definizione dei coefficienti di Fourier	26
	Disuguaglianza di Schwartz	27
2.4.2	Esempi di Sviluppo in serie	28
	Onda quadra simmetrica	28
	Treno di impulsi rettangolari	28
	Onda triangolare simmetrica	28
	Dente di sega simmetrico	29
	Rettificata a singola semionda	29
	Rettificata a onda intera	29
3	Trasformata di Fourier	30
3.1	Definizione	30
3.2	Energia incrociata e densità di energia	31
3.3	Prime proprietà della trasformata di Fourier	32
	Simmetria coniugata	32
	Dualità	32
	Linearità	33
	Valore medio e valore iniziale	33
	Traslazione nel tempo	33
	Conseguenze della linearità di fase	34
	Traslazione in frequenza (<i>Modulazione</i>)	35
	Coniugato	35
	Cambiamento di scala	35
3.4	Impulso matematico	36
3.4.1	Trasformata di una costante	36
3.4.2	Trasformata per segnali periodici	37
	Potenza di un coseno	37
3.4.3	Proprietà di <i>setacciamento</i>	37
3.5	Risposta impulsiva e convoluzione	38
3.5.1	Risposta impulsiva	38
3.5.2	Integrale di convoluzione	38
	Proprietà commutativa	39
3.5.3	$h(t)$ come funzione memoria	39
	Estensione temporale della convoluzione	40
3.5.4	Convoluzione con l'impulso traslato	40

3.6	Moltiplicazione in frequenza e nel tempo	40
3.6.1	Moltiplicazione in frequenza	41
3.6.2	Moltiplicazione nel tempo (<i>Modulazione</i>)	42
3.7	Derivazione ed integrazione nel tempo	43
	Derivazione nel tempo	43
	Integrazione nel tempo	44
	Densità di energia di $\text{rect}_T(t)$	45
3.8	Trasformata di segnali periodici	45
3.8.1	Treno di impulsi	45
3.8.2	Segnale periodico	46
3.8.3	Trasformata del treno di impulsi	46
3.8.4	Trasformata di segnale periodico	46
3.9	Appendici	47
3.9.1	Esercizio	47
3.9.2	Sulla trasformata di una costante	47
3.9.3	Finestratura e stima spettrale	48
3.9.4	Trasformata di un gradino	49
3.9.5	Sintesi delle proprietà della trasformata di Fourier	51
3.9.6	Trasformate di segnali	51
4	Campionamento ed elaborazione numerica	52
4.1	Teorema del Campionamento	52
4.1.1	Aliasing	54
4.1.2	Energia di un segnale campionato	54
4.1.3	Uso pratico	55
4.2	Trasformata discreta di Fourier	56
4.2.1	Relazione tra DFT e trasformata z	58
4.2.2	Filtraggio numerico via DFT	59
	Convoluzione discreta	59
	Convoluzione circolare	60
	Convoluzione tra sequenze limitate	60
	Convoluzione di segnali via DFT	60
4.2.3	Riassumendo	61
	4.2.3.1 Le frequenze della DFT	62
	4.2.3.2 Le ampiezze della DFT	62
5	Elementi di trasmissione dati	63
5.1	Trasmissione su canale numerico	63
5.1.1	Aspetti della trasmissione numerica di banda base	63
5.1.2	Codifica di linea	64
	5.1.2.1 Segnale binario e onda rettangolare	64
	5.1.2.2 Effetto della limitazione in banda e ISI	65
	5.1.2.3 Diagramma ad occhio	65
	5.1.2.4 Trasmissione multilivello	66
	5.1.2.5 Codice di Gray	67
5.1.3	Sincronizzazione	67

5.1.3.1	Trasmissione Asincrona	68
	Sincronizzazione di bit e di parola	69
	Sincronizzazione di trama	69
5.1.3.2	Trasmissione sincrona	70
	Sincronizzazione di simbolo	70
	Trasmissione orientata al carattere	71
	Trasmissione orientata al bit	72
5.2	Generazione del segnale dati	72
5.2.1	Codici di linea a banda infinita	72
	Codici unipolari	73
	Codici bipolari	73
	Codici differenziali	74
5.2.2	Segnale limitato in banda	75
	5.2.2.1 Requisiti per l'impulso di trasmissione	75
	Limitazione di banda	75
	Limitazione nel tempo	75
	Limitazione di precisione	76
	5.2.2.2 Condizioni di Nyquist	76
	5.2.2.3 Caratteristica a Coseno Rialzato	77
	Riassumendo	79
5.3	Controllo di errore	79
	FEC e ARQ	79
	Errori su parole	80
5.3.1	Detezione di errore	80
	5.3.1.1 Parità	80
	5.3.1.2 Somma di controllo	81
	5.3.1.3 Codici polinomiali e CRC	81
5.3.2	Codifica di Canale	83
	5.3.2.1 Codici a blocchi	83
	Efficienza	84
	Ridondanza	84
	Distanza di Hamming	84
	Codice a ripetizione	85
	Errori a burst ed interleaving	85
	5.3.2.2 Codici convoluzionali	85
	Diagramma di transizione	86
	Esempio: CC(2,1,3)	86
	Diagramma a traliccio	87
	Decodifica di Viterbi	87
	Riflessioni	89
5.4	Protocolli ARQ	89
5.4.1	Send and wait	89
	Utilizzo del collegamento	90
5.4.2	Continuous RQ	91
	5.4.2.1 Go back N	91
	5.4.2.2 Selective repeat	91

5.4.2.3	Efficienza	92
5.4.3	Controllo di flusso	92
5.4.3.1	Round trip time	93
5.4.3.2	Finestra scorrevole	93
5.4.3.3	Numero di sequenza	94
5.5	Appendici	94
5.5.1	Codifica di carattere	94
5.5.2	Codifica UNICODE	95
6	Reti di trasmissione a circuito	97
6.1	Introduzione	97
6.1.1	Elementi della rete telefonica	97
6.1.2	La rete di accesso	98
6.2	Multiploazione	99
6.2.1	Multiploazione a divisione di tempo	99
	Multiploazione statistica e commutazione di pacchetto	99
	Multiploazione deterministica e commutazione di circuito	100
6.3	Rete Plesiocrona	100
6.3.1	Trama PCM	101
6.3.2	Messaggi di segnalazione	102
	Segnalazione associata al canale	102
	Segnalazione a canale comune	103
6.3.3	Sincronizzazione di centrale	103
6.3.4	Multiploazione Asincrona e PDH	104
6.3.4.1	Bit Stuffing	105
6.3.4.2	Add and Drop Multiplexer	105
6.3.5	Sincronizzazione di Rete	106
6.3.5.1	Elastic Store	106
6.4	Gerarchia digitale sincrona	107
	Definizione dei livelli della gerarchia	107
	Multiplexer Add and Drop	107
	Eterogeneità del trasporto	108
	Struttura di trama	108
	Synchronous Transport Module STM-1	108
	Le componenti dell'Overhead	108
	Il puntatore all'unità amministrativa	109
	Virtual Container e Tributary Unit	110
6.5	Topologia di rete	111
6.6	Rete in fibra ottica	112
6.6.1	Dispositivi SDH	112
	Rigeneratori	112
	Multiplatori	112
	Multiplatori Add and Drop	112
	Digital Cross Connect	112
6.6.2	Topologia ad anello	113
6.6.2.1	Rete di trasporto	113

6.6.2.2	Rete di accesso in fibra	113
6.6.3	Sistemi di protezione automatica	114
	Protezione 1+1	114
	Collegamento ad anello	115
6.7	Instradamento	115
6.8	Commutazione	116
6.8.1	Reti a divisione di spazio	116
6.8.2	Reti multistadio	116
6.8.3	Commutazione numerica a divisione di tempo	117
	6.8.3.1 Time Slot Interchanger	117
	6.8.3.2 Commutazione bidimensionale	118
6.9	Appendici	118
6.9.1	POTS	118
6.9.2	ISDN	120
6.9.3	Sistema di segnalazione n 7	121
6.9.4	TDM mediante modulazione di ampiezza degli impulsi	123
6.10	Riferimenti	123
7	Probabilità, Processi ed Errori	125
7.1	Teoria delle probabilità	125
7.1.1	Assiomi delle probabilità	125
7.1.2	Teoremi di base	126
7.1.3	Probabilità condizionali	126
7.1.4	Teorema di Bayes	127
7.1.5	Indipendenza statistica	127
	Esempi	128
7.2	Variabili aleatorie	128
7.2.1	Funzioni di densità e di distribuzione di probabilità	129
	Istogramma	130
7.2.2	Medie, momenti e momenti centrati	130
7.2.3	Variabile aleatoria a distribuzione uniforme	131
7.3	Processi Stazionari ed Ergodici	132
7.3.1	Media di insieme	132
7.3.2	Medie temporali	133
7.3.3	Medie temporali calcolate come medie di insieme	133
7.3.4	Processi stazionari	133
7.3.5	Processi stazionari ed ergodici	134
	Esempio: la potenza di segnale	134
7.3.6	Riassumendo	135
7.3.7	Processo ad aleatorietà parametrica	135
	Processo armonico	136
7.4	SNR di Quantizzazione	136
7.5	Probabilità di Errore nelle Trasmissioni Numeriche di Banda base	138
7.5.1	Variabile aleatoria gaussiana e funzione $erfc\{\cdot\}$	138
7.5.2	Calcolo della probabilità di errore per simbolo	139

7.5.3	Dipendenza di P_e da E_b/N_0	141
7.5.3.1	Contributo di E_b/N_0 all'SNR	142
7.5.3.2	La componente di segnale	142
7.5.3.3	Espressione della P_e per simbolo	143
	Compromesso banda - potenza	144
	Compromesso velocità - distorsione	144
7.5.4	Diagramma ad occhio	144
7.5.5	Uso del codice di Gray e P_e per bit	145
7.6	Appendici	148
7.6.1	Quantizzazione logaritmica	148
7.6.2	Ricevitore ottimo	150
	Conseguenze	151
7.6.3	Funzione caratteristica	152
7.6.4	Trasformazioni di v.a. e cambio di variabili	152
	7.6.4.1 Caso unidimensionale	152
	Esempio	153
	7.6.4.2 Caso multidimensionale	153
	v.a. di Rayleigh	154
	v.a. di Rice	156
7.6.5	Detezione di sinusoidi nel rumore	156
8	Traffico, Code e Reti a Pacchetto	159
8.1	Distribuzione binomiale per popolazione finita	159
8.2	Distribuzione di Poisson	161
	8.2.1 Variabile aleatoria esponenziale negativa	162
8.3	Sistema di servizio orientato alla perdita	163
	8.3.1 Frequenza di arrivo e di servizio	163
	8.3.2 Intensità media di traffico	164
	8.3.3 Probabilità di rifiuto	164
	8.3.4 Efficienza di giunzione	166
	8.3.5 Validità del modello	167
8.4	Sistemi di servizio orientati al ritardo	168
	8.4.1 Risultato di Little	169
	8.4.2 Sistemi a coda infinita ed a servente unico	169
	8.4.3 Sistemi a coda finita e con più serventi	171
8.5	Reti per trasmissione dati	173
	8.5.1 Il pacchetto dati	173
	8.5.2 Modo di trasferimento delle informazioni	174
	8.5.2.1 Schema di moltiplicazione	174
	8.5.2.2 Principio di commutazione	175
	Commutazione di circuito:	175
	Commutazione di pacchetto a Circuito Virtuale:	176
	Commutazione di pacchetto a Datagramma	177
	8.5.2.3 Architettura protocollare	178
	Stratificazione ISO-OSI	179
	Incapsulamento	180

	Indipendenza dei servizi tra pari dal servizio di collegamento	180
8.6	Appendici	181
8.6.1	La rete Internet	181
8.6.1.1	Storia	181
8.6.1.2	Le caratteristiche	182
8.6.1.3	Gli indirizzi	182
	IP ed Ethernet	183
	Sottoreti	183
	Intranet	183
	Domain Name Server (DNS)	183
	Indirizzi TCP	184
8.6.1.4	TCP	185
	Il pacchetto TCP	185
	Apertura e chiusura della connessione	186
	Protocollo a finestra	187
	UDP	188
8.6.1.5	IP	188
	L'intestazione IP	188
	Indirizzamento e Routing	189
	Subnetting e Supernetting	190
	Classless Interdomain Routing - CIDR	190
	Longest Match	190
	Sistemi Autonomi e Border Gateway	190
	Multicast	191
8.6.1.6	Ethernet	191
	Address Resolution Protocol - ARP	192
	Formato di pacchetto	192
	Collisione	193
	Trasmissione	194
8.6.1.7	Fast e Gigabit Ethernet	194
	Fast Ethernet	194
	LAN Switch	194
	Dominio di broadcast e VLAN	195
	Gigabit Ethernet	195
	Packet bursting	195
	Architettura	195
	Ripetitore full-duplex e controllo di flusso	196
	10 Gigabit Ethernet	196
8.6.2	Rete ATM	196
	Architettura	197
	Strato fisico	197
	Strato ATM	198
	Classi di traffico e Qualità del Servizio (QOS)	199
	Indirizzamento	200
	Strato di adattamento	201
	Ip su ATM classico	202

	LANE, NHRP e MPOA	203
	MPLS	204
9	Densità Spettrale e Filtraggio	206
9.1	Correlazione e Covarianza	206
9.1.1	Correlazione	207
9.1.2	Covarianza e Indipendenza Statistica	208
9.1.3	Statistiche dei Processi	209
9.1.4	Autocorrelazione	209
9.1.4.1	Proprietà dell'autocorrelazione	210
	Traslazioni temporali.	210
	Durata Limitata.	210
	Segnali Periodici.	210
	Massimo nell'origine.	210
	Simmetria coniugata:	211
9.2	Densità Spettrale	211
9.2.1	Teorema di Wiener	211
9.2.2	Esempi	211
	Processo armonico.	211
	Processo gaussiano bianco limitato in banda	212
	Segnale dati	213
9.3	Stima spettrale	213
9.3.1	Periodogramma	213
9.4	Filtraggio di segnali e processi	214
9.4.1	Segnali di energia	215
9.4.2	Segnali periodici	215
9.4.3	Processi ergodici	216
	Esercizio	217
	Risposte	217
9.4.4	Filtro Adattato	217
	Segnalazione antipodale	219
	Segnalazione ortogonale	219
9.5	Caratteristiche dei sistemi fisici	219
9.6	Unità di elaborazione	221
9.6.1	Prodotto	221
9.6.2	Somma	222
9.7	Filtri Digitali	223
9.7.1	Filtro trasversale del 1° ordine	224
9.7.2	Stima della autocorrelazione di un processo ergodico	225
9.7.3	Filtro digitale a risposta impulsiva <i>infinita</i> del 1° ordine	225
9.8	Filtri Analogici	226
9.8.1	Filtro analogico ad un polo	226
9.8.2	Frequenza di taglio	227
9.8.3	Assenza di distorsioni lineari	227
9.9	Appendici	227

9.9.1	Coefficiente di Correlazione	227
9.9.2	Onda PAM	228
9.9.3	Potenza di un segnale dati	229
9.9.4	Autocorrelazione dell'uscita di un filtro	230
9.9.5	Grafici di esempio	230
10	Segnali modulati	232
10.1	Generalità	232
10.1.1	Multiplicazione a divisione di frequenza - FDM	232
10.1.1.1	Collegamenti Punto-Multipunto	233
10.1.1.2	Accesso Multiplo	233
10.1.1.3	Collegamenti Punto-Punto	234
10.1.2	Canale telefonico	234
10.1.3	Antenne e lunghezza d'onda	235
10.1.4	Banda di segnale	235
10.1.5	Trasmissione a banda laterale unica	235
10.2	Rappresentazione dei segnali modulati	236
10.2.1	Inviluppo complesso e modulazione di ampiezza e/o angolare	236
10.2.2	Componenti analogiche di bassa frequenza	238
10.2.3	Filtro di Hilbert	238
10.2.4	Segnale Analitico	240
10.2.5	Esempi	241
10.3	Transito dei segnali modulati nei sistemi fisici	242
10.3.1	Filtraggio	242
10.3.1.1	Intermodulazione tra C.A. di B.F.	243
10.3.1.2	Equalizzazione di banda base	243
10.3.2	Condizioni per inviluppo complesso reale	244
10.3.2.1	Filtro passa banda ideale	244
10.3.2.2	Simmetria coniugata attorno ad f_0	244
10.3.3	Estrazione delle componenti analogiche di bassa frequenza	244
10.4	Rappresentazione dei processi in banda traslata	245
10.4.1	Conclusioni	247
10.4.2	Processo gaussiano bianco limitato in banda	248
10.5	Appendici	248
10.5.1	Risposta impulsiva del filtro di Hilbert	248
10.5.2	Autocorrelazione di Processi Passa-Banda	249
11	Modulazione per Segnali Analogici	251
11.1	Modulazione di Ampiezza - AM	251
11.1.1	Banda Laterale Doppia - BLD	252
11.1.1.1	Portante soppressa - PS	252
11.1.1.2	Portante Intera - PI	252
11.1.1.3	Portante parzialmente soppressa - PPS	253
11.1.1.4	Efficienza di PI-PPS	253
11.1.2	Banda Laterale Unica - BLU	253
11.1.2.1	Generazione di segnali BLU	254

11.1.3	Banda laterale ridotta - <i>BLR</i>	255
11.1.4	Potenza di un segnale AM	255
11.2	Demodulazione di ampiezza	255
11.2.1	Demodulazione coerente (omodina)	255
11.2.1.1	Errori di fase e frequenza	256
11.2.1.2	Demodulazione in fase e quadratura	256
11.2.1.3	Phase Locked Loop - <i>PLL</i>	257
11.2.2	Demodulatore di involuppo	258
11.2.2.1	Segnali <i>Banda Laterale Unica e Ridotta</i>	259
11.2.3	Demodulatore eterodina	259
11.2.3.1	Frequenze immagine	260
11.2.3.2	Supereterodina	261
11.3	Modulazione angolare	261
Non linearità		262
Ampiezza costante		262
Generazione di un segnale a modulazione angolare		263
11.3.1	Ricezione di un segnale a modulazione angolare	263
11.3.1.1	Ricevitore a <i>PLL</i>	263
11.3.1.2	Ricevitore a discriminatore	264
11.3.2	Densità spettrale di segnali modulati angolarmente	264
11.3.2.1	Segnale modulante sinusoidale	265
Modulazione a basso indice		267
Modulazione ad alto indice		267
Regola di Carson		267
11.3.3	Densità spettrale FM con processo aleatorio modulante	268
11.3.3.1	Indice di modulazione per processi	269
11.3.3.2	Modulazione a basso indice	269
11.4	Appendici	270
11.4.1	Calcolo della potenza di un segnale AM BLU	270
11.4.1.1	Calcolo della potenza di segnali BLD-PI, PS, PPS	270
11.4.2	Ricostruzione della portante mediante quadratura	271
11.4.3	Il mixer	271
11.4.4	Trasmissione televisiva	272
Codifica dell'immagine		272
Segnale televisivo in bianco e nero		273
Formato dell'immagine		273
Occupazione spettrale		273
Segnale audio		274
Segnale di cromaticità		274
Sincronizzazione		274
Interferenza		275
11.4.5	Modulazione FM a basso indice	275
11.4.6	FM BroadCast	275
12	Prestazioni delle Trasmissioni Modulate	277
12.1	Il rumore nei segnali modulati	277

12.1.1	Rapporto Segnale-Rumore e Banda di Rumore	277
12.1.2	Demodulazione di un processo di rumore	278
12.2	Prestazioni delle trasmissioni AM	278
12.2.1	Potenza di segnale e di rumore dopo demodulazione. SNR	279
12.2.1.1	BLD-PS	279
12.2.1.2	BLU-PS	280
12.2.1.3	BLD-PI	280
12.3	Prestazioni delle trasmissioni FM	281
12.3.1	Rumore dopo demodulazione FM	281
12.3.2	Caso di basso rumore	282
Segnale presente	282	
Discussione dei passaggi	283	
Discussione del risultato	283	
12.3.3	Caso di elevato rumore	285
12.3.4	Enfasi e de-enfasi	285
13	Modulazione numerica	287
13.1	Modulazione di Ampiezza e di Frequenza	287
13.1.1	BPSK	287
13.1.2	L-ASK	288
Efficienza Spettrale ρ	288	
13.1.3	L-FSK	289
FSK ortogonale	289	
13.1.4	Prestazioni di L-ASK	291
Natura di E_b/N_0	292	
13.2	Modulazione di fase	292
13.2.1	QPSK ed L-PSK	292
13.2.2	Prestazioni QPSK	293
13.2.3	Prestazioni L-PSK	294
13.3	QAM	296
13.3.1	Prestazioni di QAM	297
13.4	Altre possibilità	298
13.5	Appendici	300
13.5.1	Schema riassuntivo delle prestazioni	300
13.5.2	FSK Ortogonale	300
Modulazione coerente	301	
Modulazione incoerente	301	
Verifica grafica	302	
Discussione sull'ottimalità per $L \rightarrow \infty$	302	
13.5.3	OFDM	302
13.5.3.1	Rappresentazione nel tempo ed in frequenza	303
13.5.3.2	Architettura di modulazione	305
13.5.3.3	Efficienza dell'OFDM	307
13.5.3.4	Architettura di demodulazione	307
13.5.3.5	Prestazioni	308
Calcolo della P_e per portante	308	

13.5.3.6	Equalizzazione	312
	Modulazione differenziale	312
13.5.3.7	Sensibilità alla temporizzazione	312
13.5.3.8	Ottimalità	312
13.5.3.9	Codifica	313
14	Transito dei segnali nei circuiti	315
	Elaborazione e Distorsione	315
	Canale perfetto	315
14.1	Caratterizzazione dei circuiti	316
14.1.1	Numero di porte	316
14.1.2	Modelli di rappresentazione	316
14.1.3	Proprietà delle reti due porte	316
14.2	Bipoli	316
	Passivi	316
	Attivi	317
	Esempio	317
14.3	Potenza di segnale e grandezze elettriche	317
14.3.1	Potenza assorbita da un bipolo	317
14.3.2	Misure di potenza in deciBel	317
	La misura logaritmica	318
	Misura relativa dei rapporti	318
	Misura assoluta delle grandezze	319
	Misura delle densità	319
	Corrispondenze tra grandezze	319
14.4	Connessione tra generatore e carico	319
14.4.1	Potenza disponibile	320
14.4.2	Assenza di distorsioni lineari	320
14.4.3	$Z_g(f)$ reale	321
14.5	Reti due porte	321
14.5.1	Modello circuitale	321
14.5.2	Schema simbolico	322
14.5.3	Trasferimento energetico	322
	Guadagno di tensione	322
	Guadagno di potenza	322
	Guadagno disponibile	323
	Collegamento generatore-carico mediante rete due porte	323
	Reti passive	324
	Reti in cascata	324
	Collegamento radio	324
14.6	Distorsioni lineari	324
14.6.1	Rappresentazioni di $H(f) = H(f) e^{j\varphi(f)}$	324
	Guadagno in dB	324
	Tempo di ritardo di gruppo	324
325section*.219		
14.6.2	Segnali di banda base	325

14.6.3	Segnali modulati	325
14.6.3.1	Segnali a banda stretta	326
14.6.3.2	Modulazione di ampiezza	326
	BLD-PS	326
	BLD-PI	326
	BLU	326
14.6.3.3	Modulazione angolare	326
14.6.4	Calcolo dell'SNR	327
14.6.5	Equalizzazione	327
14.7	Distorsioni di non linearità	327
14.7.1	Ingresso sinusoidale	328
	Fattori di intermodulazione	328
14.7.2	Ingresso aleatorio	329
14.7.3	Effetto sulla modulazione FM	330
14.8	Appendici	330
14.8.1	Potenza assorbita da un bipolo	330
14.8.2	Potenza ceduta ad un carico $Z_c(f) \neq Z_g^*(f)$	331
15	Collegamenti e Mezzi Trasmissivi	333
15.1	Dimensionamento di un collegamento	333
	Determinazione di $W_{R_{Min}}$	333
	Guadagno di Sistema	334
	Margine di sistema	334
	Attenuazione supplementare	334
	Grado di servizio	334
15.1.1	Casi particolari	335
	Segnale a banda stretta	335
	Equalizzazione	335
15.2	Collegamenti in cavo	335
15.2.1	Costanti distribuite, grandezze derivate, e condizioni generali	336
	Impedenza caratteristica	336
	Costante di propagazione	336
	Condizioni di chiusura	336
	Quadripolo equivalente	336
	Condizioni di adattamento	337
	Condizione di Heaviside	337
15.2.2	Trasmissione in cavo	337
	Effetto pelle	338
	Equalizzazione	338
	Diafonia	339
15.2.2.1	Casi limite	339
	Cavo a basse perdite	339
	Cavo corto	340
15.2.3	Tipologie di cavi per le telecomunicazioni	340
15.2.3.1	Coppie simmetriche	341
	Linee aeree	341

Coppie ritorte	341
15.2.3.2 Cavo coassiale	342
15.3 Collegamenti radio	343
15.3.1 Trasduzione Elettromagnetica	344
Antenna Isotropa	344
Antenna direttiva	344
Antenna ricevente	345
15.3.2 Bilancio energetico	345
Potenza ricevuta	345
Attenuazione di spazio libero	345
Attenuazione disponibile	345
15.3.3 Condizioni di propagazione e attenuazioni supplementari	346
Perdite di accoppiamento	346
Assorbimento terrestre	346
15.3.3.1 Condizioni di visibilità	346
Orizzonte Radio	346
Ellissoidi di Fresnel	347
15.3.3.2 Cammini Multipli	347
Esempio	348
15.3.3.3 Diffusione	348
15.3.3.4 Collegamenti radiomobili	349
Determinazione del margine	349
Path loss	350
Slow fading	350
Fast fading	351
Dimensione di cella e velocità di trasmissione	352
15.3.3.5 Assorbimento Atmosferico	352
15.3.3.6 Dimensionamento di un collegamento soggetto a pioggia	352
15.3.3.7 Collegamenti in diversità	354
Diversità di frequenza	354
Diversità di spazio	354
15.4 Collegamenti in fibra ottica	354
15.4.1 Generalità	354
Natura fisica della fibra	354
Il segnale luminoso	355
Trasmissione ottica	355
Propagazione luminosa e indice di rifrazione	355
15.4.2 Propagazione luminosa	356
Dispersione modale	356
Attenuazione	357
Dispersione cromatica e trasduttori elettro-ottici	358
Prodotto Banda-Lunghezza e Codici di linea	359
Trasduttori ottico-elettrici	360
Dipendenza della sensibilità dalla durata del simbolo	360
15.4.3 Moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda - WDM	361
15.4.4 Ridondanza e pericoli naturali	361

15.4.5	Sonet e SDH	362
15.4.6	Dalle fibre ottiche alle reti ottiche	362
15.5	Appendici	362
15.5.1	Collegamenti satellitari	362
	Studio di produzione	363
	Uplink	363
	Transponder	364
	Footprint e Downlink	365
	Temperatura di antenna	366
	Ricevitore a terra	366
	Polarizzazione	367
15.5.2	Allocazione di frequenze radio	367
	Bande di frequenza Radar	367
	Canali televisivi	368
	Banda ISM	368
	Telefonia mobile	368
16	Rumore Termico	369
16.1	Rumore nei bipoli passivi	369
16.2	Rapporto segnale rumore dei generatori	370
16.3	Rumore nelle reti due porte	370
16.3.1	Reti passive	371
	16.3.1.1 Rapporto SNR in uscita	371
	16.3.1.2 Fattore di rumore per reti passive	371
16.3.2	Reti attive	372
	Riassunto	372
	Esempio	373
16.3.3	Fattore di rumore per reti in cascata	373
16.3.4	Rumore nei ripetitori	376
	16.3.4.1 Rumore termico accumulato	377
	16.3.4.2 Compromesso tra rumore termico e di intermodulazione	378
	Esempio	378
17	Teoria dell'Informazione e Codifica	379
17.1	Codifica di sorgente	379
17.1.1	Codifica di sorgente discreta	380
	Sorgente senza memoria	380
	Misura dell'informazione	380
	17.1.1.1 Entropia	380
	Entropia di sorgente binaria	381
	Entropia di sorgente L-aria	382
	Entropia di sorgente con memoria	382
	Sorgente Markoviana	382
	17.1.1.2 Codifica entropica, a lunghezza di parola variabile	383
	Regola del prefisso	384
	Codifica a blocchi	384

Codice di Huffman	385
Dynamic Huffman coding	385
17.1.1.3 Codifica per sorgenti con memoria	385
Codifica run-length	386
Codifica predittiva	386
17.1.1.4 Compressione basata su dizionario	387
Metodo di Lempel-Ziv-Welsh	387
Algoritmo Deflate	388
17.1.2 Codifica con perdite di sorgente continua	388
17.1.2.1 Curva velocità-distorsione	389
Valori limite	389
17.1.2.2 Entropia di sorgente continua	390
17.1.2.3 Sorgenti con memoria	391
17.1.3 Codifica di Immagine	391
17.1.3.1 Dimensioni	392
17.1.3.2 Spazio dei colori	394
Segnale video composito	394
Profondità di colore	395
Sottocampionamento del colore	395
17.1.3.3 Formato GIF	396
PNG	397
17.1.3.4 Codifica JPEG	397
Preparazione dell'immagine e dei blocchi	397
DCT diretta	398
Quantizzazione	400
Codifica entropica	400
Formattazione	403
17.1.4 Codifica audio	403
17.1.5 Codifica video	403
17.1.5.1 Standard video	403
17.2 Codifica di canale	403
17.2.1 Canale simmetrico binario e decisore Bayesiano	404
Rapporto di verosimiglianza	404
Verifica di Ipotesi di ML e Bayesiana	405
Riflessioni	405
Applicazione	405
17.2.2 Informazione mutua media per sorgenti discrete	405
17.2.3 Capacità di canale discreto	407
17.2.4 Capacità per canali continui	408
Sistema di comunicazione ideale	409
Minima energia per bit	410
Compromesso banda-potenza	410
Prestazioni di sistemi di comunicazione reali	411

1 Generalità

Effettuiamo subito una velocissima panoramica dei molteplici aspetti che intervengono nei sistemi di telecomunicazione, che oltre al semplice inoltro per via *elettrica* di un *messaggio informativo* da un luogo ad un altro, coinvolgono un discreto numero di apparati differenti e cooperanti, nel contesto di una organizzazione *in rete* dei dispositivi.

La trasmissione può riguardare un messaggio generato al tempo stesso della sua trasmissione, oppure esistente a priori. Il supporto fisico del messaggio, chiamato *segnale*, identifica due categorie molto generali: quella dei segnali *analogici*, e quella dei segnali *numerici*. Nel primo caso rientra ad esempio la voce umana, mentre esempi di segnali numerici sono i documenti conservati su di un computer.

1.1 Trasmissione dell'informazione

Sorgente, destinatario e canale L'origine del segnale da trasmettere è indicata (vedi Fig. 1.1) come *sorgente*, di tipo analogico o numerico per i due tipi di segnale. Ciò che giace tra sorgente e *destinatario* viene descritto da una entità astratta denominata *canale* di comunicazione, le cui caratteristiche condizionano i messaggi trasmessi.

Distorsioni e disturbi Il canale può ad esempio imporre una limitazione alla *banda di frequenze* del segnale in transito¹; cause fisiche ineliminabili producono inoltre, al lato ricevente, l'insorgere di un segnale di disturbo additivo, comunemente indicato con il termine di *rumore*, che causa la ricezione di un segnale diverso da quello stesso presente all'uscita del canale. Pertanto, ci si preoccupa di caratterizzare il canale in modo da scegliere i metodi di trasmissione più idonei a rendere minima l'alterazione sul messaggio trasmesso.

Rapporto segnale-rumore L'entità delle alterazioni subite dal messaggio viene spesso quantificata in termini di *rapporto segnale rumore* (SNR o SIGNAL-TO-NOISE RATIO), che rappresenta un indice di qualità del collegamento stesso, e che per ora definiamo genericamente come il rapporto tra l'entità del segnale utile ricevuto e quello del rumore ad esso sovrapposto, indicato con n nella figura 1.1.

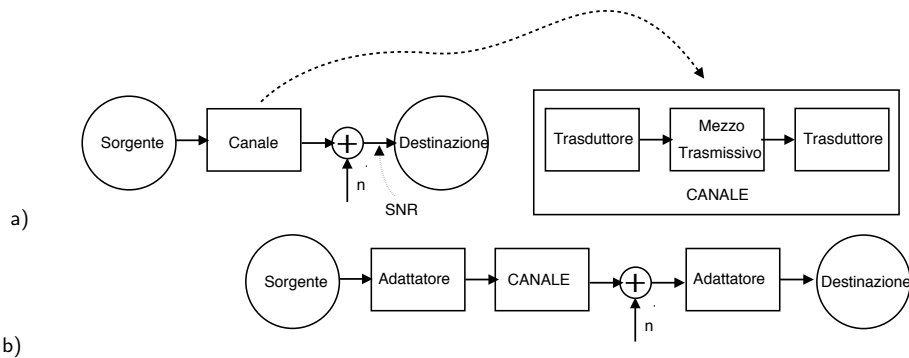
Trasmissione La Fig. 1.1a) evidenzia come il canale, nella realtà fisica, è costituito da un *mezzo trasmissivo* su cui si propaga un segnale di natura elettrica, che viene convertito in tale forma da appositi *trasduttori* di trasmissione e ricezione². Considerando per il momento i trasduttori come facenti parte del canale stesso, proseguiamo l'analisi concentrandoci sugli ulteriori aspetti del processo di comunicazione.

¹Approfondiremo nel seguito il senso di questa locuzione; per ora è sufficiente interpretarla in termini generici, ovvero di fedeltà della riproduzione al segnale originario.

²Un classico esempio di trasduttore è quello dell'antenna, nel caso di trasmissione radio.

1 Generalità

Figura 1.1: Elementi funzionali per la trasmissione dell'informazione



Adattatori La figura 1.1b) evidenzia l'esistenza (in trasmissione, in ricezione od a entrambe le estremità) di dispositivi *adattatori*, che hanno lo scopo di ridurre od eliminare le cause di deterioramento del messaggio introdotte dalla trasmissione: si può ad esempio ricorrere ad *equalizzatori* per correggere la risposta in frequenza di un canale, ad *amplificatori* per contrastare l'attenuazione subita dal segnale, ovvero a *codificatori di linea* per rendere le caratteristiche del segnale idonee ad essere trasmesse sul canale a disposizione.

Rete La trasmissione lungo un canale in uso esclusivo alla coppia sorgente-destinazione è piuttosto raro; di solito i collegamenti sono condivisi tra più comunicazioni, ognuna con differente origine e destinatario. Il problema della condivisione delle risorse trasmissive, ed il coordinamento di queste attività, produce la necessità di analizzare in modo esplicito le *reti di telecomunicazione*, che entrano a far parte integrante dei sistemi di trasmissione dell'informazione.

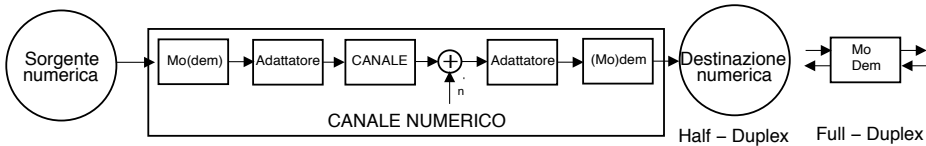
Gli aspetti delle telecomunicazioni brevemente accennati, sono immediatamente applicabili a segnali di natura *analogica*, in cui il segnale è definito per tutti gli istanti di tempo, ed assume valori qualsiasi. Nel caso invece in cui il segnale è definito solo per istanti di tempo discreti e valori discreti, si entra nell'ambito delle *trasmissioni numeriche*.

1.2 Trasmissioni numeriche

Modem Qualora si desideri trasmettere un segnale *numerico*, questo deve in generale essere convertito in un segnale analogico mediante l'utilizzo di dispositivi chiamati *Modem*³, come rappresentato dalla figura seguente, in cui è evidenziato come per una trasmissione unidirezionale⁴ occorra solo *metà* delle funzioni del modem per entrambi i lati del collegamento, mentre nel caso di collegamento *full duplex* (in cui entrambi gli estremi possono essere contemporaneamente sorgente e destinazione) il modem opera allo stesso tempo nelle due direzioni.

³La parola *Modem* è una contrazione delle due parole *modulatore-demodulatore*.

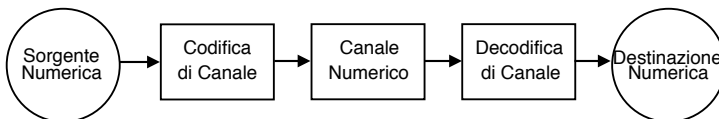
⁴Nelle trasmissioni unidirezionali, sorgente e destinazione non si scambiano i ruoli. La trasmissione stessa viene anche indicata con il termine di *half-duplex*.



Canale Numerico La figura precedente suggerisce come sia possibile racchiudere tutto ciò che è compreso tra i due modem in un *unico* blocco, denominato *canale numerico*. Quest'ultimo è concettualizzato come una entità autonoma, e nel progetto di una sistema di comunicazione numerica è caratterizzato da un *fattore di qualità* individuato dalla ...

Probabilità di errore che è definita come la frequenza con cui *i simboli ricevuti differiscono* da quelli trasmessi, a causa di un errore verificatosi nel modem ricevente, e causato a sua volta dal rumore additivo presente in uscita dal canale analogico, e/o dalle alterazioni introdotte dal canale. Evidentemente, le *prestazioni* individuate dalla probabilità di errore sono strettamente legate a quelle individuate dal rapporto segnale-rumore per il canale analogico sottostante.

Codifica di Canale Nelle trasmissioni numeriche, si può introdurre una *ridondanza* nella sequenza trasmessa, inviando più simboli di quanti non ne produca la sorgente, e quindi di fatto *aumentando* il numero di simboli da trasmettere per unità di tempo; i simboli in più sono scelti in modo da essere in qualche modo *dipendenti* tra loro, e questa loro caratteristica rende possibile la riduzione della probabilità di errore di cui soffre il canale numerico. Infatti, grazie alla dipendenza (nota) tra i simboli trasmessi, il ricevitore è ora in grado di "accorgersi" che si è verificato un errore, in quanto la dipendenza prevista non è più rispettata; pertanto, il ricevitore può attuare delle contromisure. La ridondanza introdotta può essere così elevata da permettere la correzione di errori isolati⁵, oppure il ricevitore può semplicemente richiedere la *ritrasmissione* del simbolo errato. Le trasformazioni del segnale ora descritte prendono il nome di *codifica di canale*, e devono essere "rimosse" all'uscita dello stesso da un processo inverso di *decodifica*.



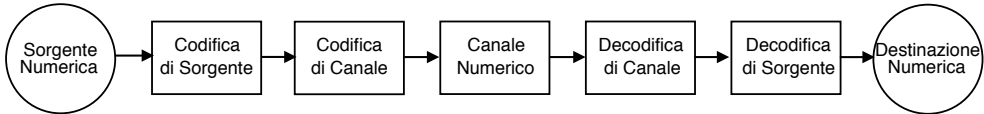
Codifica di Sorgente Possono essere introdotti due ulteriori blocchi, che operano una *codifica* (e relativa de-codifica) *di sorgente* sulla sequenza trasmessa, con uno scopo è per così dire "inverso" a quello della codifica di canale: infatti, la codifica di sorgente *rimuove le dipendenze* tra i simboli presenti nelle sequenze generate dalla sorgente, ottenendo di fatto un riduzione del numero di simboli da trasmettere per unità di tempo⁶. Un tipico esempio di codifica di sorgente è rappresentato dagli

⁵Si parla in questo caso di codifica FEC, ovvero di *Forward Error Correction*.

⁶Pensiamo per similitudine ad un imballaggio, il cui contenuto è prima disposto in modo da occupare il minimo volume (codifica di sorgente), ed a cui viene poi aggiunto del materiale antiurto (codifica di canale).

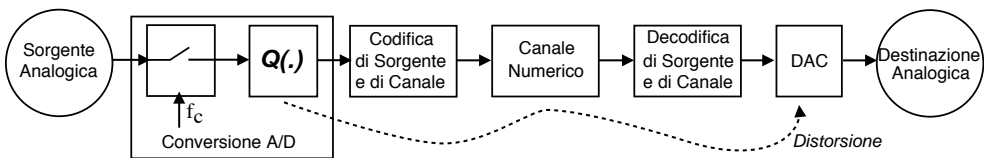
1 Generalità

algoritmi di compressione esistenti per i file di computer (come i file *zippati*); in tal caso, il fattore di compressione ottenibile dipende dalla natura del file trattato, ed è tanto maggiore quanto più quest'ultimo presenta caratteristiche di ripetitività e quindi di predicibilità del suo contenuto. In altre parole, l'uscita di un codificatore di sorgente è una sequenza di simboli tendenzialmente *indipendenti* tra loro, nel senso che ogni forma di predicibilità di un simbolo a partire dai circostanti è stata rimossa.



Campionamento e Quantizzazione Poniamoci ora il problema di utilizzare un *canale numerico* per effettuare una *trasmissione analogica*. Il vantaggio di tale “contorsione” è da ricercarsi nel migliore comportamento delle trasmissioni numeriche rispetto ai disturbi, nonché alla loro *generalità*⁷. Per ottenere il risultato desiderato, occorre applicare alla sorgente analogica un procedimento di *campionamento*, prelevandone i valori ad istanti discreti, e quindi di *quantizzazione*, rappresentando tali valori mediante un insieme finito di simboli. Il risultato è una sequenza numerica che può essere di nuovo convertita nel segnale originario, utilizzando un dispositivo di conversione *digitale-analogica* (DAC) dal lato del ricevitore. Esempi pratici di quest'ultimo processo sono ben noti, come ad esempio nel caso dei CD audio.

Rumore di quantizzazione La riduzione dei valori campionati nell'ambito di un insieme finito produce una *ulteriore distorsione*, che può essere pensata sommarsi in ricezione al segnale originario, producendo una nuova fonte di degrado. L'entità del rumore dovuto alla quantizzazione è inversamente legata alla *risoluzione del quantizzatore*, ovvero alla capacità di differenziare tra valori di ingresso molto vicini tra loro. In definitiva, la distorsione risulta tanto minore, quanto maggiore è il flusso informativo⁸ prodotto dal quantizzatore, espresso in bit/secondo.



Teoria velocità-distorsione Un teorico dell'informazione, CLAUDE SHANNON, enunciò negli anni '50 una serie di teoremi, che sono la base dell'analisi dei sistemi di comunicazione. Non è oggetto del presente testo approfondire tali aspetti; è comunque istruttivo accennare ai principali risultati, che possono essere riassunti nei seguenti tre enunciati:

⁷Nei collegamenti numerici, non occorre specializzare il collegamento allo specifico mezzo trasmissivo a disposizione, anzi quest'ultimo è totalmente “mascherato” dal fornitore del collegamento numerico stesso.

⁸Vedremo infatti nel seguito che un aumento della risoluzione del processo di quantizzazione corrisponde ad un aumento del numero di bit necessari a rappresentare ogni valore (o campione) di segnale.

- Un qualsiasi canale pone un limite al massimo flusso informativo che transita in esso. Il limite deriva dai vincoli che il canale impone sulla massima banda \mathbf{B} del segnale in transito, sulla massima potenza di segnale \mathbf{S} ricevuta, e sulla potenza di rumore \mathbf{N} presente al ricevitore. Il massimo flusso di informazione in transito prende il nome di *capacità di canale* \mathbf{C} , e può essere espresso come $C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)$ bit/sec. In questi termini, la massima velocità di trasmissione in un canale può dipendere da una limitazione sulla banda \mathbf{B} , o sulla potenza, od essere causata da un eccessivo rumore: solo alterando uno di questi fattori (scegliendo un diverso canale), è possibile aumentare la velocità di trasmissione.
- Una qualsiasi sorgente produce un flusso informativo in bit/secondo tanto più elevato quanto minore è la distorsione introdotta dal processo di quantizzazione.
- Considerando una coppia sorgente + canale, dato che il canale limita il massimo flusso informativo prodotto dalla sorgente, quest'ultima verrà necessariamente riprodotta con una distorsione tanto maggiore quanto minore è la capacità di canale. A meno di non impiegare più tempo per la trasmissione... oppure di cambiare canale (ad esempio usandone uno con una banda maggiore).

1.3 Segnali analogici, certi ed aleatori

I segnali analogici, indicati con $s(t)$ (con le parentesi tonde), rappresentano l'*andamento nel tempo* di una grandezza elettrica. Come esempio possiamo citare il *segnale vocale*, in cui un'onda trasversale di pressione-velocità è convertita in una tensione da un microfono. Oppure citare un *segnale di immagine*, che è bidimensionale, e definito su di un piano anziché nel tempo, rappresentato da una grandezza $S(x, y)$ che ne individua la luminanza, e scandito per linee generando un segnale temporale. Un segnale può anche assumere *valori complessi*⁹, in questo caso il segnale assume contemporaneamente due diversi valori (parte reale e parte immaginaria, oppure modulo e fase).

E' importante distinguere tra i segnali cosiddetti *certi* e quelli *aleatori*. Un esempio di *segnale certo* può essere una cosinusoide di cui sia nota sia l'ampiezza che la fase, mentre un *segnale aleatorio* non è noto con esattezza prima che questo venga prodotto (ad esempio il rumore di un ruscello, o le notizie presenti in un telegiornale). L'insieme di tutti i segnali aleatori appartenenti ad una medesima classe viene indicato nel suo complesso come *processo aleatorio*, ed un segnale particolare di questo insieme come una sua *realizzazione*.

1.3.1 Rappresentazione di segnali analogici

Lo studio delle proprietà dei segnali si articola prendendo in considerazione per gli stessi rappresentazioni alternative, scelte in modo da poter valutare più agevolmente le alterazioni subite dai segnali nel passaggio attraverso sistemi fisici. In particolare, sarà definito lo *sviluppo in serie di Fourier* per la rappresentazione dei segnali periodici, e quindi la *trasformata di Fourier* che descrive una classe più ampia di segnali.

⁹Come vedremo, un segnale a valori complessi è il risultato di una particolare rappresentazione, detta *inviluppo complesso*, utile nell'analisi dei segnali modulati.

1 Generalità

L'analisi di Fourier consente di definire il concetto di *banda occupata* da un segnale, nonché di come la sua potenza e/o energia si *distribuisce in frequenza*; quest'ultimo andamento viene indicato con il termine di *Spettro di Densità di Potenza* (o di *Energia*).

1.3.2 Rappresentazione di processi aleatori

Anche nel caso in cui il segnale non è noto a priori, e dunque è impossibile calcolarne la trasformata di Fourier in forma chiusa, si può ugualmente giungere ad una rappresentazione che caratterizzi le realizzazioni del processo nei termini della distribuzione (statistica) in frequenza della potenza di segnale.

Ciò è possibile considerando la *funzione di autocorrelazione*, che esprime il grado di interdipendenza statistica tra i valori assunti in istanti diversi dalle realizzazioni del processo, e che costituisce un elemento unificante ai fini della *stima spettrale* dei segnali.

Osserveremo come processi molto correlati siano caratterizzati da una densità di potenza di tipo *colorato*, mentre processi scarsamente correlati saranno identificati da una densità di potenza di tipo *bianco*¹⁰.

1.3.3 Transito dei segnali attraverso sistemi fisici

Saranno forniti i metodi di valutazione dei *peggioramenti* indotti su di un segnale che transiti in un mezzo trasmissivo, e di come riuscire a *ridurli* od *eliminarli*.

Risposta impulsiva e convoluzione Un concetto di base è l'integrale di *convoluzione*, per mezzo del quale si esprime in forma chiusa l'uscita di un circuito elettrico¹¹ in base alla conoscenza dell'ingresso, e di una particolare caratteristica della rete, la *risposta impulsiva*. Quest'ultima rappresenta l'uscita della rete quando in ingresso è presente una particolare funzione analitica, detta *impulso matematico*.

Risposta in frequenza Operando nel dominio della frequenza, osserveremo come la trasformata di Fourier della risposta impulsiva rappresenti la *risposta in frequenza* della rete, ovvero l'uscita alle diverse frequenze quando l'ingresso ha uno spettro bianco.

Modulazione Nel caso in cui il segnale da trasmettere occupi una banda concentrata attorno ad una frequenza più o meno elevata (detta *portante*), come nel caso dei *segnali modulati*, si ricorre alla rappresentazione mediante le *componenti analogiche di bassa frequenza*. Il caso opposto, caratterizzato da una estensione frequenziale contigua alla frequenza zero, è detto di *banda base*. L'uso dei segnali modulati è obbligatorio, qualora questi debbano essere trasmessi su canali di tipo cosiddetto *passa-banda*.

¹⁰I termini *colorato* e *bianco* hanno origine da una similitudine con l'energia luminosa, per cui se la luce bianca indica l'indiscriminata presenza di tutte le lunghezze d'onda, così uno spettro bianco indica la presenza in egual misura di tutte le frequenze; viceversa, come una luce colorata dipende dal prevalere di determinate frequenze nella radiazione elettromagnetica, così uno spettro colorato indica la prevalenza di alcune frequenze su altre.

¹¹Quando un circuito elettrico ha la funzione di trasportare un segnale tra una coppia di morsetti ad un'altra, il circuito prende il nome di *rete due porte* o *quadripolo*.

La trasmissione dei segnali mediante un sistema di comunicazione coinvolge diversi altri aspetti, che sono brevemente introdotti al § 1.6, nel contesto della caratterizzazione dei canali di comunicazione.

1.4 Segnali numerici

Sono indicati con la notazione $s[k]$ (con le parentesi quadre), per evidenziare che il loro dominio è l'insieme dei numeri interi. Sono valide le stesse definizioni fornite al § 1.7.2 a riguardo dei segnali analogici, relativamente ai concetti di potenza, energia e periodicità, utilizzando qui delle sommatorie in luogo degli integrali.

Sequenze Un segnale viene chiamato numerico quando assume valori appartenenti ad un *insieme finito di simboli*; per questo motivo, la sua essenza è indicata anche come *sequenza simbolica*. Ad esempio, un testo scritto assume valori nell'ambito dei caratteri stampabili. Se si rappresenta ogni carattere con il suo numero ordinale, si ha allora una vera sequenza di numeri.

Segnali tempo-discreti Si può alternativamente rappresentare ogni carattere con un diverso valore di tensione, ottenendo un segnale analogico che è una rappresentazione a *più livelli* di tensione della sequenza originaria.

Frequenza di simbolo Il concetto di occupazione di banda, applicabile ai segnali analogici, è qui sostituito da quello di velocità di emissione, espressa in *simboli/secondo*, ed indicata come *frequenza di simbolo*. Una sequenza prodotta da una sorgente numerica si presta facilmente ad essere trasformata in un'altra, con un diverso alfabeto ed una differente frequenza di simbolo¹².

Frequenza binaria Qualora si desideri ottenere una *trasmissione binaria*, ossia rappresentabile come una sequenza di *zeri* ed *uni*, l'alfabeto di rappresentazione ha cardinalità pari a 2. In tal caso, ogni simbolo L -ario di ingresso produrrà gruppi di M caratteri binari (o bit), con M pari all'intero superiore di $\log_2 L$ bit/simbolo. Questa ultima grandezza M , pari al numero di bit/simbolo, moltiplicata per il numero di simboli a secondo f_s , permette di calcolare il flusso informativo in bit/secondo, che prende il nome di *frequenza binaria*: $f_b = M \cdot f_s$.

Campionamento Si è già accennato a come un segnale analogico possa essere rappresentato mediante i suoi valori campionati a frequenza di f_c *campioni/secondo* e quantizzati con un numero M di *bit/campione*, consentendo l'uso di un canale numerico. In tal caso, la sorgente numerica equivalente sarà caratterizzata da una velocità di trasmissione di f_b bit/secondo, pari al prodotto $f_c \cdot M$.

Modulazione numerica Qualora la risposta in frequenza del canale imponga un processo di modulazione, esistono tecniche *specifiche* per i segnali numerici, che traggono vantaggio dalla natura discreta del messaggio da trasmettere.

¹²Per fissare le idee, consideriamo i simboli di una sequenza numerica $s[k]$ ad L valori: questi possono essere presi a gruppi di K , producendo simboli a velocità K volte inferiore, ma con L^K valori distinti. Se si dispone di un alfabeto di uscita ad H valori, i gruppi di K simboli L -ari originari possono essere rappresentati con gruppi di M simboli H -ari purché $L^K \leq H^M$. Es.: per codificare in binario ($H = 2$) simboli con $L = 26$ livelli, occorrono almeno $M = 5$ bit/simbolo, ottenendo così $2^5 = 32 > L = 26$.

Trasmissione a pacchetto Un segnale numerico può avere origini delle più disparate, e non necessariamente essere il risultato di un processo di quantizzazione. Ad esempio, può trattarsi di un file da trasmettere tra due computer; in tal caso, si può frammentare la sequenza numerica in messaggi più piccoli (chiamati *pacchetti di dati*), numerarli consecutivamente, ed inviarli singolarmente attraverso la rete di interconnessione, anche impiegando percorsi differenti per ogni sotto-messaggio: sarà compito del lato ricevente ri-assemblare i singoli pacchetti nell'ordine originario. Il caso descritto è un tipo particolare di *rete a commutazione di pacchetto*, di cui saranno esposti i principi di funzionamento e le metodologie di progetto di massima delle risorse, mirate all'ottenimento di *prestazioni* definite in termini di *ritardo medio* di trasmissione.

1.5 Teoria delle probabilità

Molti dei concetti utilizzati per trattare i processi aleatori, per definire la quantità di informazione di un messaggio, le prestazioni di un canale, il dimensionamento di reti di comunicazione, sono fondati sulla conoscenza della *teoria delle probabilità*, che verrà pertanto illustrata, almeno nei suoi concetti fondamentali, i quali saranno immediatamente applicati ai casi specifici che si verificano nei sistemi di telecomunicazione.

Teoria del traffico In particolare, è accennata l'applicazione della teoria delle probabilità al problema del dimensionamento di collegamenti che debbano trasportare più messaggi contemporaneamente, operando una moltiplicazione degli stessi su di un medesimo mezzo trasmissivo.

1.6 Sistemi di Telecomunicazione

Introduciamo brevemente quattro diversi *punti di vista* in cui è possibile inquadrare le problematiche di comunicazione: gli aspetti *fisici*, di *elaborazione*, di *sistema*, di *rete*, e di *trasporto*.

Aspetti fisici Un canale di comunicazione, *dal punto di vista fisico*, si identifica con il mezzo trasmissivo, per la descrizione del quale si adotta frequentemente un modello circuitale. Elenchiamo i mezzi comunemente adottati:

Collegamenti radio: il segnale si propaga nello spazio libero come onda elettromagnetica sferica, e viene irradiato mediante antenne, che ne focalizzano la potenza lungo direzioni privilegiate. La trasmissione è resa possibile grazie al processo di modulazione;

Collegamenti in cavo: da quelli tra computer e stampante, a quelli su doppino (telefonia), a quelli in cavo coassiale (televisione, ethernet). Possono essere di tipo half o full duplex a seconda che i due estremi della comunicazione siano unidirezionali o bidirezionali;

Collegamenti in fibra ottica: sono realizzati facendo viaggiare energia luminosa attraverso una guida d'onda di materiale dielettrico. La tecnica è idonea alla

trasmissione dei soli segnali numerici, dato che la sorgente luminosa in trasmissione viene accesa e spenta velocissimamente in corrispondenza dei bit (zero od uno) del messaggio.

Modello circuitale Il collegamento ed i trasduttori ad esso relativi, sono spesso realizzati ricorrendo ad un circuito elettrico equivalente, in modo da poterne descrivere il comportamento mediante strumenti analitici noti.

Aspetti sistemistici Da un punto di vista *sistemistico*, il transito dei segnali attraverso sistemi fisici è analizzato in termini del peggioramento introdotto, che può essere catalogato nell'ambito di diverse categorie:

Distorsioni Si distinguono quelle cosiddette *lineari*, causate da una risposta in frequenza non ideale, dalle distorsioni *non lineari*, che causano invece una deformazione istantanea sulla forma d'onda in transito;

Non stazionarietà Questi fenomeni sono caratterizzati da una variazione nel tempo delle caratteristiche del canale, e ricorrono spesso nel caso di comunicazioni con mezzi mobili;

Attenuazione Un segnale in transito lungo un canale presenta in uscita una ampiezza inferiore a quella di ingresso. L'alterazione può aver luogo sia per cause fisiche intrinseche (lunghezza del collegamento, disadattamento di impedenze, tecnologia degli amplificatori), che in dipendenza di fatti contingenti (percorsi multipli, pioggia); in questo secondo caso, il fenomeno è trattato come l'esito di un processo aleatorio;

Portata Affinché possano essere soddisfatti i requisiti di qualità (ad esempio l'SNR) desiderati, risulta che la lunghezza del collegamento deve essere inferiore ad un massimo, in conseguenza dell'attenuazione del collegamento, della potenza trasmessa, e degli altri fatti contingenti;

Qualità del servizio Con questo termine sono indicate diverse grandezze, ognuna applicabile in un particolare contesto, e che rappresentano un indice di "bontà" del processo comunicativo. Tra queste grandezze possiamo citare il *rapporto segnale rumore* SNR e la *probabilità di errore* P_e , relative rispettivamente alle trasmissioni analogiche e numeriche; il *ritardo medio*, rilevante nel caso di trasmissioni a pacchetto; il *tempo di fuori servizio*, qualificante della affidabilità dei sottosistemi di comunicazione.

Rete Dal punto di vista della *rete di comunicazione*, la consegna del messaggio informativo alla destinazione deve tener conto di aspetti indicati come:

Commutazione La rete è costituita da un insieme di *nodi di commutazione*, interconnessi da collegamenti che vengono usati in modalità condivisa da molte comunicazioni contemporanee, e che sono *attraversati* dai messaggi in transito, che devono essere *smistati* verso la porta di uscita corretta;

Instradamento La determinazione del percorso dei messaggi nella rete, scelto tra i possibili percorsi che collegano la sorgente con la destinazione, prende il nome di *instradamento*;

Segnalazione Il coordinamento tra i nodi della rete avviene mediante lo scambio tra gli stessi di informazioni aggiuntive dette *di segnalazione*, che costituisco-

1 Generalità

no un vero e proprio processo di comunicazione parallelo a quello prettamente informativo;

Protocollo Lo scambio dei messaggi di segnalazione tra le coppie di nodi della rete, od anche tra i nodi ed un organo di controllo centrale, avviene utilizzando particolari linguaggi, detti *protocolli* di segnalazione;

Mobilità Se i nodi della rete modificano la propria posizione nel tempo, o gli utenti desiderano usufruire degli stessi servizi indipendentemente dal punto di accesso alla rete, occorre individuare soluzioni specifiche, come ad esempio la registrazione ed il mantenimento dei propri dati presso una *unità di controllo*, e l'adozione di procedure di *autenticazione* che permettano di certificare l'identità degli utenti.

Elaborazione terminale Questa categoria comprende tutti gli aspetti legati alle trasformazioni operate sull'informazione ai due estremi del collegamento¹³. Tra questi è possibile riconoscere

Codifica di sorgente Le trasformazioni sul segnale da trasmettere, che permettono di impegnare la minor quantità di risorse trasmissive (ad esempio, banda), possono prevedere operazioni che tengono conto delle specifiche *caratteristiche del segnale* da trattare, come nel caso della codifica vocale, o della codifica video;

Codifica di canale In modo analogo, le trasformazioni necessarie a combattere gli errori nelle trasmissioni numeriche, possono tener conto delle caratteristiche statistiche *dei disturbi*;

Modulazione e formattazione Le operazioni necessarie alla trasmissione di un segnale radio, o di un segnale numerico, possono tener conto delle caratteristiche del *canale trasmissivo*, e adottare soluzioni che possono facilitare la realizzazione delle due funzioni precedenti.

Trasporto Dal punto di vista del *trasporto* dell'informazione, sono rilevanti gli aspetti di:

Multiplicazione Si tratta di raggruppare tra loro le singole comunicazioni in transito per un tratto in comune; con il risultato di migliorare sensibilmente l'efficienza della rete. Infatti, mediante la moltiplicazione si può garantire un elevato tasso di utilizzo delle risorse, che non giacciono mai inutilizzate proprio grazie al riutilizzo continuo e multiplo delle stesse per parecchie comunicazioni in transito. Tecniche di moltiplicazione comunemente adottate sono la *multiplicazione* ...

- di *tempo*, in cui lo stesso collegamento è utilizzato per più comunicazioni contemporanee in base ad un uno schema di alternanza temporale;
- di *frequenza*, in cui le diverse comunicazioni occupano differenti regioni di frequenza, in uno stesso collegamento tra (ad esempio) due antenne;
- di *codice*, in cui diverse comunicazioni avvengono simultaneamente nella medesima banda di frequenza, adottando una particolare codifica che ne permette la separazione dal lato ricevente.

¹³L'importanza e la specificità di tali trasformazioni assume un rilievo sempre maggiore con l'evoluzione (in termini di miniaturizzazione e potenza di calcolo) dei dispositivi di elaborazione, in special modo per ciò che riguarda le trasmissioni numeriche.

Controllo Riguarda la corretta consegna del messaggio al destinatario, e coinvolge la gestione degli errori di trasmissione di cui si è discusso a riguardo della codifica di canale, le problematiche di riassetto delle comunicazioni inoltrate in forma di pacchetti distinti, e la gestione della segnalazione per ciò che riguarda l'adattamento dei protocolli di instradamento alle condizioni di carico della rete, ed il coordinamento delle sorgenti che desiderano trasmettere utilizzando il medesimo mezzo trasmissivo.

1.7 Segnali e sistemi

Vengono qui brevemente riassunte le definizioni ricorrenti nel descrivere gli elementi fondamentali nei cui termini sono descritti i sistemi di telecomunicazione.

In termini generali, un *sistema* è un gruppo di oggetti che interagiscono armoniosamente, e che sono combinati in modo da conseguire un obiettivo desiderato. Un sistema può essere parte (sottosistema) di un sistema più grande, e si può definire una intera gerarchia di sistemi, ognuno con il proprio dominio.

Un *segnale* è un evento che veicola un contenuto informativo. Nel nostro caso, possiamo interessarci alla *risposta* di un sistema ad un dato segnale. A volte, un sistema è descritto unicamente in termini della sua risposta a determinati segnali.

1.7.1 Caratteristiche dei sistemi

Idealizziamo ora un sistema come una trasformazione $\mathcal{T}[\cdot]$, tale che ad ogni segnale di ingresso $x(t)$ corrisponda una uscita $y(t)$: $\mathcal{T}[x(t)] = y(t)$. In base a tale formalismo, riportiamo alcune caratteristiche dei sistemi, che ne descrivono il comportamento in termini più generali.

Linearità Un sistema è *lineare* quando l'uscita associata ad una combinazione lineare di ingressi, è la combinazione lineare delle uscite previste per ogni singolo ingresso:

$$\mathcal{T}\left[\sum_i a_i x_i(t)\right] = \sum_i a_i \mathcal{T}[x_i(t)]$$

Al contrario, un legame ingresso-uscita *senza memoria*¹⁴ del tipo $y(t) = g(x(t))$, in cui $g(\cdot)$ è una generica funzione *non* lineare¹⁵... non è lineare !

Permanenza Un sistema è *permanente* (o stazionario) se l'uscita associata ad un ingresso traslato nel tempo, è la traslazione temporale dell'uscita che si avrebbe per lo stesso ingresso non traslato, ovvero: se $\mathcal{T}[x(t)] = y(t)$, allora $\mathcal{T}[x(t - \tau)] = y(t - \tau)$. Nel caso contrario, il sistema è detto tempo-variante.

Realizzabilità fisica E' detta anche *causalità*, perché determina l'impossibilità di osservare una uscita, prima di aver applicato un qualunque ingresso. Una definizione alternativa asserisce che i valori di uscita $y(t)$ ad un istante $t = t_0$, non possono dipendere da valori di ingresso $x(t)$ per $t > t_0$.

¹⁴Un operatore si dice *senza memoria* quando ogni valore dell'uscita dipende da un unico valore di ingresso.

¹⁵Una funzione y è lineare quando il suo sviluppo in serie di potenze si arresta al primo ordine, ed è quindi esprimibile in forma $y = ax + b$ (equazione di una retta).

1 Generalità

Stabilità è definita come la proprietà di fornire uscite limitate (in ampiezza) per ingressi limitati.

1.7.2 Caratteristiche dei segnali

Da un punto di vista analitico, un segnale è una funzione del tempo, del tipo descritto in 1.3, e per il quale si possono operare le classificazioni:

Segnale di potenza Un segnale analogico può avere una estensione temporale limitata, oppure si può immaginare che si estenda da meno infinito a infinito. Nel secondo caso il segnale si dice di *potenza* se ne esiste (ed è diversa da zero) la media quadratica

$$0 < \mathcal{P}_s = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{-\frac{\Delta t}{2}}^{\frac{\Delta t}{2}} |s(t)|^2 dt < \infty$$

Un segnale di potenza è inoltre detto

Segnale periodico di periodo T , nel caso in cui si verifichi che

$$s(t) = s(t + T)$$

per qualsiasi valore di t , mentre si dice

Segnale di energia un segnale di durata limitata o illimitata, se esiste il valore

$$0 < \mathcal{E}_s = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt < \infty$$

Perché ciò avvenga, occorre che $s(t)$ tenda a zero (per t che tende ad ∞) più velocemente (od in modo uguale) ad $\frac{1}{\sqrt{t}}$ (e quindi $|s(t)|^2$ tenda a zero come $\frac{1}{t}$).

In particolare, se un segnale ha *durata limitata*, ovvero è nullo per t al di fuori di un intervallo $[t_1, t_2]$ (vedi Fig. a pagina seguente), allora è anche di energia. Infine, viene detto

Segnale impulsivo un segnale di energia, che tende a zero come (o più velocemente di) $\frac{1}{t}$:

$$0 < \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)| dt < \infty$$

E' il caso delle funzioni sommabili, per le quali $|s(t)|^2$ tende a zero come (o più di) $\frac{1}{t^2}$, e dunque di energia.

Riassumendo

- Un segnale *impulsivo* è di energia;
- Un segnale a *durata limitata* è impulsivo, e di energia;
- Un segnale *periodico* non è di energia, ma di potenza;