

# PREFAZIONE

L'obiettivo di questo libro è di presentare gli aspetti fondamentali della teoria delle comunicazioni, fornendo al contempo gli strumenti idonei all'analisi ed al progetto dei sistemi di comunicazione, con l'approfondimento e il rigore adeguati alla formazione di un ingegnere delle Telecomunicazioni. Il linguaggio utilizzato e gli argomenti trattati richiedono da parte del lettore buone conoscenze di teoria dei segnali, sia analogici che numerici, e di teoria dei fenomeni aleatori.

Il libro è diviso in tre parti. La prima parte riguarda la teoria della informazione, l'analisi spettrale e la caratterizzazione dei sistemi rumorosi (Capitoli 1-2 e 8), la seconda si occupa dei sistemi di comunicazione in banda base (Capitoli 3-4), mentre la terza è dedicata ai sistemi di comunicazione in banda passante, sia analogici che numerici (Capitoli 5-7).

In particolare, nel Capitolo 1, viene analizzata la struttura di un sistema di comunicazione e vengono messe in evidenza le differenze peculiari tra i sistemi di comunicazione analogici e quelli numerici. Seguono alcuni elementi di teoria della informazione. Il Capitolo 2 è dedicato al calcolo della densità spettrale di potenza di segnali e processi, analogici e numerici. Il Capitolo 3 riguarda i più diffusi metodi di numerizzazione dei segnali di sorgente, quali il PCM, il PCM differenziale e la modulazione delta. Nel Capitolo 4 vengono studiati i sistemi di comunicazione in banda base, con particolare riferimento al sistema PAM numerico. La valutazione delle prestazioni è svolta sia per sistemi reali che ideali. Vengono anche discusse alcune tecniche di equalizzazione di canale. Il Capitolo 5 è dedicato allo studio ed al dimensionamento dei sistemi di comunicazione passa banda (analogici o numerici) e dei principali sottosistemi che li compongono. L'analisi viene svolta facendo ricorso alla rappresentazione complessa in banda base. Il Capitolo 6 analizza le modulazioni passa banda analogiche e numeriche, le tecniche di demodulazione e le relative prestazioni. Nel Capitolo 7 viene studiato il PLL (*Phase-Locked Loop*), uno stimatore di fase largamente impiegato nei sistemi di comunicazione. La se-

conda parte del capitolo è dedicata all'analisi ed alla valutazione delle prestazioni di un PLL impiegato come sincronizzatore di fase e frequenza. Il Capitolo 8 è dedicato allo studio del rumore nei sistemi di comunicazione. Dopo aver analizzato e caratterizzato dal punto di vista del rumore i bipoli e i quadripoli, vengono studiati alcuni importanti sistemi di comunicazione, sia su mezzo guidato che su mezzo non guidato.

Il testo è arricchito da numerosi esercizi svolti che chiariscono i concetti più importanti e descrivono alcune delle più significative applicazioni pratiche. Particolare attenzione è stata rivolta anche alla veste tipografica ed alla impaginazione.

Desidero infine ringraziare gli studenti e i colleghi per i commenti e i suggerimenti che si sono rivelati insostituibili nel migliorare la presentazione dei diversi argomenti.

*Aldo D'Andrea*

# INDICE

## CAPITOLO 1

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Storia delle comunicazioni</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Sistemi di comunicazione</b>	<b>4</b>
1.2.1. Struttura di un sistema di comunicazioni	5
Sorgente	5
Trasduttore di ingresso	6
Codificatore	6
Trasmittitore	8
Canale	8
Ricevitore	10
Decodificatore	10
Trasduttore di uscita	10
1.2.2. Un semplice sistema numerico di comunicazione	10
1.2.3. Confronto tra sistemi numerici e sistemi analogici	14
<b>1.3. Bande di frequenza impiegate nelle comunicazioni</b>	<b>15</b>
1.3.1. Mezzi guidati	15
1.3.2. Mezzi non guidati	15
<b>1.4. Informazione e limite di Shannon</b>	<b>17</b>
1.4.1. Entropia e velocità di informazione	17
1.4.2. Teorema di Shannon	19
1.4.3. Limite di Shannon	21
1.4.4. Scelta del codice	23
<b>Appendice 1.A</b>	<b>25</b>
1.A.1. La funzione $Q$	25

## CAPITOLO 2

<b>Elementi di Analisi Spettrale</b>	<b>29</b>
<b>2.1. Introduzione</b>	<b>29</b>
<b>2.2. Densità spettrale di potenza</b>	<b>29</b>
2.2.1. Energia e Potenza	29
2.2.2. Densità spettrale di potenza di un segnale deterministico	31
2.2.3. Densità spettrale di potenza di un processo Teorema di Wiener-Khintchine	33
2.2.4. Densità spettrale di potenza mutua	35
<b>2.3. Applicazioni del Teorema di Wiener-Khintchine</b>	<b>36</b>
2.3.1. Densità spettrale di potenza di processi stazionari	36
2.3.2. Densità spettrale di potenza di processi ciclostazionari	37
2.3.3. Densità spettrale di potenza di segnali deterministici	38
2.3.4. Densità spettrale di potenza di segnali PAM Effetto dei codici di linea sulla dsp di un segnale PAM	42
2.3.5. Densità spettrale di potenza di processi ciclostazionari discreti	46
<b>Appendice 2.A</b>	<b>48</b>
2.A.1. Alcune proprietà delle funzioni di correlazione medie	48

## CAPITOLO 3

<b>Numerizzazione di Segnali Generati da Sorgenti Analogiche</b>	<b>49</b>
<b>3.1. Introduzione</b>	<b>49</b>
<b>3.2. Modulazione PCM</b>	<b>49</b>
3.2.1. Descrizione del sistema PCM	49
3.2.2. Prestazioni di un sistema PCM Rumore di quantizzazione	52
Disturbo dovuto al rumore termico	55
Rapporto segnale-rumore	56
3.2.3. PCM standard Quantizzazione non uniforme	58
3.2.4. Multiplazione a suddivisione di tempo di segnali numerici PCM	60
<b>3.3. Modulazione PCM differenziale</b>	<b>62</b>
3.3.1. Descrizione del sistema PCM differenziale	63
<b>3.4. Modulazione delta</b>	<b>66</b>

3.4.1. Descrizione del sistema DM	66
Sovraccarico di pendenza	68
3.4.2. Prestazioni di un sistema DM	68
3.4.3. Modulazione delta adattativa (ADM)	71

## CAPITOLO 4

### **Sistemi di Comunicazione in Banda Base** **73**

<b>4.1. Introduzione</b>	<b>73</b>
<b>4.2. Sistemi analogici in banda base</b>	<b>75</b>
<b>4.3. Sistemi numerici in banda base</b>	<b>77</b>
4.3.1. Sistema PAM numerico in banda base	79
4.3.2. Strategia di decisione MAP	83
Zone di decisione	84
4.3.3. Interferenza intersimbolica	86
Scelta del ritardo di campionamento	86
Condizione di Nyquist	88
4.3.4. Valutazione delle prestazioni di un sistema PAM	91
Calcolo della probabilità di errore in assenza di interferenza intersimbolica	93
Metodo esaustivo	96
Maggiorazione del caso peggiore	97
4.3.5. Dimensionamento dei filtri di trasmissione e ricezione	100
4.3.6. Probabilità di errore di un sistema PAM ideale	108
Probabilità di errore sul simbolo	109
Probabilità di errore per cifra binaria	110
<b>4.4. Equalizzazione di canale</b>	<b>112</b>
4.4.1. Equalizzazione nel dominio delle frequenze	113
4.4.2. Equalizzazione nel dominio del tempo	114
Equalizzatore fisso zero-forcing	116
Equalizzatore fisso MMSE	118
Equalizzatori adattativi	121

## CAPITOLO 5

### **Sistemi di Comunicazione in Banda Passante** **123**

<b>5.1. Introduzione</b>	<b>123</b>
--------------------------	------------

<b>5.2. Rappresentazione in banda base di un segnale deterministico</b>	<b>124</b>
5.2.1. Introduzione	124
5.2.2. Segnale analitico	124
5.2.3. Inviluppo complesso di un segnale	124
Componenti in fase e quadratura di un segnale	127
Inviluppo complesso di un segnale passa banda	129
5.2.4. Fasore associato ad un segnale	131
Segnali modulati solo in ampiezza	131
Segnali modulati solo in angolo	132
Segnali modulati sia in ampiezza che in angolo	133
5.2.5. Equivalente in banda base di un sistema passa banda	133
Equivalente in banda base di un filtro	135
Equivalente in banda base di un filtro passa banda simmetrico	136
<b>5.3. Rappresentazione in banda base di un processo aleatorio</b>	<b>138</b>
5.3.1. Introduzione	138
5.3.2. Funzioni di correlazione e dsp di un processo e del suo inviluppo complesso	139
Funzioni di correlazione e dsp delle componenti in fase e quadratura di un processo	141
Potenze normalizzate di un processo e del suo inviluppo complesso	142
5.3.3. Processi stazionari in senso lato	145
Stazionarietà di un processo e del suo inviluppo complesso	145
Funzioni di correlazione e dsp di un processo SSL e del suo inviluppo complesso	147
<b>5.4. Studio e analisi di sistemi di comunicazione in banda passante</b>	<b>149</b>
5.4.1. Trasmettitori per segnali passa banda	149
5.4.2. Ricevitori per segnali passa banda	152
Ricevitore ad amplificazione diretta	153
Ricevitore a conversione di frequenza	153
Equivalente funzionale di un ricevitore per segnali passa banda	158
5.4.3. Demodulatore moltiplicativo	160
5.4.4. Equivalente in banda base di un sistema di comunicazione passa banda	162
Equivalente in banda base di un sistema di comunicazione con demodulatore sincrono in frequenza	164
5.4.5. Dimensionamento di un sistema di comunicazione passa banda	165
Segnale modulante reale	166
Segnale modulante complesso	166
<b>Appendice 5.A</b>	<b>167</b>
5.A.1. Rappresentazione in banda base di segnali deterministici	167
Segnali IQ	167
Segnali passa banda	167
5.A.2. Rappresentazione in banda base di processi aleatori	168

Processi IQ	168
Processi SSL	168
<b>Appendice 5.B</b>	<b>169</b>
5.B.1. Modulazioni analogiche passa banda	169
5.B.2. Modulazioni numeriche passa banda	170
<b>CAPITOLO 6</b>	
<b>Modulazioni Passa Banda Analogiche e Numeriche</b>	<b>173</b>
<b>6.1. Introduzione</b>	<b>173</b>
<b>6.2. Modulazioni analogiche di ampiezza</b>	<b>174</b>
6.2.1. Modulazione AM	174
TF di un segnale AM	176
Dsp di un segnale AM	176
6.2.2. Modulazione DSB	178
TF di un segnale DSB	179
Dsp di un segnale DSB	179
6.2.3. Modulazione SSB	180
TF di un segnale SSB	183
Dsp di un segnale SSB	183
6.2.4. Modulazione VSB	184
TF di un segnale VSB	185
Dsp di un segnale VSB	186
6.2.5. Modulazione QM	187
TF di un segnale QM	187
Dsp di un segnale QM	188
6.2.6. Multiplazione a suddivisione di frequenza	188
<b>6.3. Valutazione delle prestazioni di segnali analogici modulati in ampiezza</b>	<b>191</b>
6.3.1. Demodulazione di involuppo di segnali AM	191
Demodulazione coerente di segnali AM	196
6.3.2. Demodulazione moltiplicativa di segnali DSB, SSB e VSB	196
Modulazione DSB	199
Modulazione SSB	200
Modulazione VSB	202
6.3.3. Demodulazione di segnali DSB, SSB, VSB, mediante reinserzione della portante	204
6.3.4. Demodulazione coerente di segnali QM	205
<b>6.4. Modulazioni analogiche di angolo</b>	<b>207</b>
6.4.1. Fase e frequenza istantanee di un segnale	207

6.4.2. Modulazioni di fase e di frequenza	208
Deviazioni di fase e di frequenza	208
Indici di modulazione di fase e frequenza	209
Banda di Carson	211
6.4.3. Generazione di segnali modulati in angolo	215
Modulazione di angolo a banda stretta	215
6.4.4. TF e dsp di segnali modulati di angolo	218
Segnale modulante periodico	219
<b>6.5. Valutazione delle prestazioni di segnali analogici modulati in angolo</b>	<b>222</b>
6.5.1. Demodulatore di frequenza	223
6.5.2. Prestazioni di un ricevitore per segnali modulati in angolo	225
Segnali FM	229
Segnali PM	232
6.5.3. Sistemi a modulazione di angolo con preenfasi e deenfasi	233
<b>6.6. Modulazioni numeriche passa banda</b>	<b>234</b>
6.6.1. Descrizione del sistema di comunicazione	235
6.6.2. Equivalente in banda base di un sistema numerico passa banda	242
6.6.3. Dimensionamento ottimo del sistema di comunicazione	243
6.6.4. Strategia di decisione	246
<b>6.7. Valutazione delle prestazioni di modulazioni numeriche</b>	<b>248</b>
6.7.1. Valutazione della probabilità di errore per segnali MASK	250
Modulazioni 2ASK e BPSK	251
6.7.2. Valutazione della probabilità di errore per segnali MQAM	253
Modulazioni 4QAM e QPSK	255
Modulazione 16QAM	256
Modulazioni 8QAM rettangolare	256
6.7.3. Bound per la valutazione della probabilità di errore	257
Segnali MPSK	260
Bound di unione	264
6.7.4. Valutazione della probabilità di errore per segnali DPSK con demodulazione differenziale	267

## CAPITOLO 7

<b>Anelli ad Aggancio di Fase (PLL)</b>	<b>269</b>
<b>7.1. Introduzione</b>	<b>269</b>
<b>7.2. Principio di funzionamento di un PLL</b>	<b>269</b>
7.2.1. Equazione del PLL	269
7.2.2. Rivelatore di fase	271



Rivelatore di fase moltiplicativo	272	
7.2.3. Analisi in regime lineare		273
Schema equivalente ad anello aperto	274	
Scelta del filtro di anello	275	
Valutazione delle prestazioni	278	
7.2.4. Il PLL come demodulatore di frequenza		280
<b>7.3. Il PLL come sincronizzatore</b>		<b>282</b>
7.3.1. Esistenza e stabilità delle soluzioni in regime stazionario		283
Scelta del filtro di anello	285	
7.3.2. Valutazione delle prestazioni		287
7.3.3. Ricostruzione dei sincronismi in modulazioni analogiche		290
Modulazione AM	291	
Modulazione DSB	293	
7.3.4. Ricostruzione dei sincronismi in modulazioni numeriche		297

## CAPITOLO 8

<b>Il Rumore nei Sistemi di Comunicazione</b>		<b>301</b>
<b>8.1. Introduzione</b>		<b>301</b>
<b>8.2. Bipoli e quadripoli nei sistemi di comunicazione</b>		<b>301</b>
8.2.1. Densità spettrale di potenza dissipata su un carico		302
8.2.2. Densità spettrale di potenza disponibile		303
8.2.3. Guadagno di potenza disponibile		305
<b>8.3. Bipoli rumorosi</b>		<b>307</b>
8.3.1. Sorgenti di rumore termico		307
8.3.2. Teorema di Nyquist		309
8.3.3. Temperatura equivalente di rumore di un bipolo		312
Temperatura di antenna	314	
<b>8.4. Quadripoli rumorosi</b>		<b>317</b>
8.4.1. Temperatura equivalente di rumore di un quadripolo		318
8.4.2. Cifra di rumore di un quadripolo		319
Cifra di rumore di un quadripolo passivo isoterma	320	
8.4.3. Formula di Friis		321
8.4.4. Banda equivalente di rumore, temperatura media di rumore e cifra media di rumore		325
<b>8.5. Caratterizzazione del rumore in un sistema di comunicazione</b>		<b>327</b>
<b>8.6. Studio di alcuni sistemi di comunicazione</b>		<b>329</b>
8.6.1. Sistema di comunicazione su canale radio in visibilità ottica		329

8.6.2. Sistema di comunicazione su cavo	332
8.6.3. Ripetitori per la trasmissione di segnali analogici	334
8.6.4. Ripetitori per la trasmissione di segnali numerici	337
<b>Appendice 8.A</b>	<b>338</b>
8.A.1. Processi gaussiani	339
8.A.2. Processi congiuntamente gaussiani	341
8.A.3. Processi gaussiani attraverso sistemi lineari tempo invarianti	342
8.A.4. Involuppo complesso di un processo gaussiano	342
<b>Indice Analitico</b>	<b>345</b>