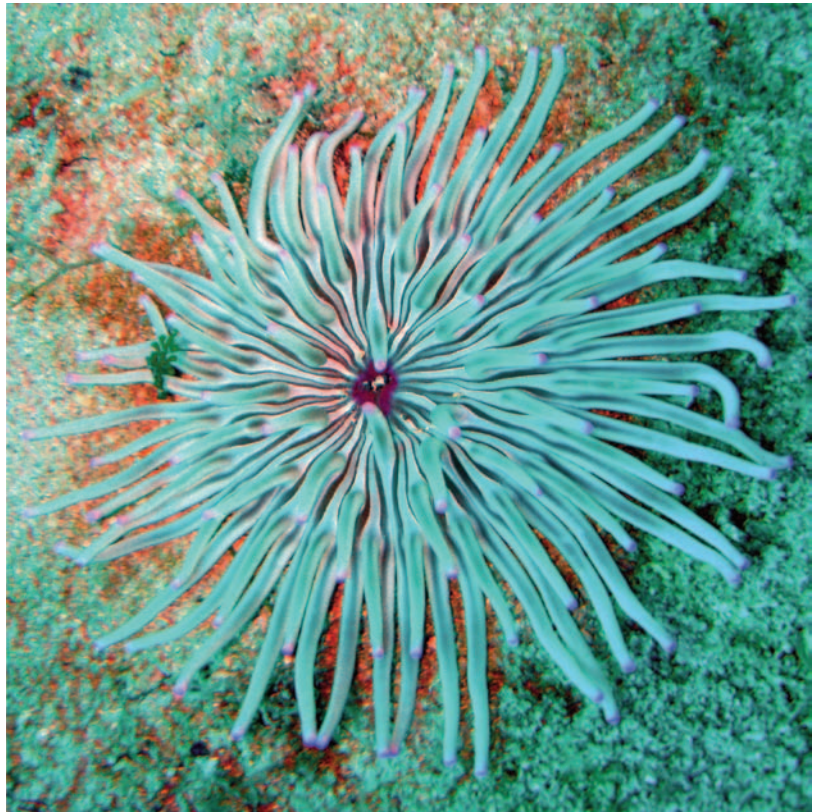




Aurelio Uncini

ELABORAZIONE ADATTATIVA DEI SEGNALI



Copyright © MMX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133/A-B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-xxx-x

*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: marzo 2010

Indice

Prefazione	xxi
1 Richiami di segnali e circuiti a tempo-discreto	1
1.1 Introduzione	1
1.1.1 Sequenze deterministiche di base	3
1.1.1.1 Impulso unitario	3
1.1.1.2 Gradino unitario	4
1.1.1.3 Sequenza esponenziale reale e complessa	4
1.1.2 Circuiti a tempo discreto	6
1.1.2.1 Proprietà generali dei circuiti a tempo discreto	9
1.1.2.2 Proprietà dei circuiti TD LTI	10
1.1.2.3 Definizione dei componenti circuitali a tempo-discreto	11
1.1.2.4 Rappresentazione di circuiti TD nel dominio della frequenza	14
1.1.3 Rappresentazione di segnali e circuiti TD in domini trasformati	15
1.1.3.1 La trasformata-z	16
1.1.3.2 Trasformata di Fourier per segnali discreti (DTFT)	18
1.1.3.3 La trasformata di Fourier discreta (DFT)	21
1.1.3.4 Funzione di trasferimento	24
1.1.3.5 Filtri ideali	24
1.1.4 Equazioni alle differenze finite	26
1.1.4.1 Diagramma poli-zeri e criterio di stabilità	27
1.1.4.2 Circuiti con risposta impulsiva di durata finita e infinita	29
1.1.4.3 Esempi di filtri FIR	31
1.1.4.4 Esempi di filtri IIR	37
1.1.4.5 Circuiti inversi	42
1.2 Introduzione ai processi stocastici nel tempo-discreto	43
1.2.1 Variabili aleatorie	44
1.2.1.1 Distribuzioni e funzioni densità	44

1.2.1.2	Medie statistiche	46
1.2.1.3	Grandezze statistiche associate ai momenti di ordine m	47
1.2.1.4	Distribuzioni di probabilità congiunte	50
1.2.1.5	Distribuzioni tipiche di VA	51
1.2.1.6	Teorema centrale del limite	56
1.2.2	Vettori di variabili aleatorie	56
1.2.2.1	Aspettazione di vettori random	56
1.2.2.2	Matrici di covarianza e di correlazione	56
1.2.3	Processi stocastici	58
1.2.3.1	Funzioni statistiche dei PS	59
1.2.3.2	Medie d'insieme, proprietà e grandezze caratteristiche dei PS	60
1.2.3.3	Momenti di ordine superiore	62
1.2.3.4	Proprietà e caratteristiche dei processi stocastici	62
1.2.3.5	Processi stocastici stazionari	63
1.2.4	Processi ergodici	65
1.2.4.1	Medie statistiche di processi ergodici	65
1.2.5	Matrice di correlazione di sequenze random	66
1.2.5.1	Autovalori e autovettori di R	67
1.2.6	Sequenze random stazionarie e sistemi TD LTI	68
1.2.6.1	Sequenza di crosscorrelazione ingresso-uscita	68
1.2.6.2	Sequenza d'autocorrelazione d'uscita	69
1.2.6.3	Pdf d'uscita	70
1.2.6.4	Rappresentazione spettrale di sequenze random stazionarie	70
1.2.6.5	Densità spettrale di potenza e funzioni di coerenza	70
1.2.6.6	Rappresentazione spettrale di sequenze random stazionarie e sistemi TD LTI	72
1.2.7	Esempi di processi stocastici	75
1.2.7.1	Sequenza rumore uniforme	75
1.2.7.2	Sequenza rumore bianco e rumore bianco Gaussiano	75
1.3	Richiami di Teoria della Stima	76
1.3.1	Definizioni preliminari e notazione	77
1.3.1.1	Distribuzione campionaria	78
1.3.1.2	Aspettazione, polarizzazione o deviazione dello stimatore	79
1.3.1.3	Varianza dello stimatore	79
1.3.1.4	Errore ai minimi quadrati dello stimatore	80
1.3.1.5	Esempio: stima del guadagno in corrente continua di una sequenza bianca Gaussiana	80
1.3.1.6	Stimatore non polarizzato a minima varianza (MVU)	81
1.3.1.7	Stimatore consistente	83
1.3.1.8	Intervallo di confidenza	83
1.3.2	Stima "classica" e "Bayesiana"	84
1.3.2.1	Stima Maximum A Posteriori (MAP)	84
1.3.2.2	Stima a massima verosimiglianza	85
1.3.2.3	Esempio: misura rumorosa di un parametro con una osservazione	86
1.3.2.4	Esempio: misura rumorosa di un parametro con N osservazioni	88
1.3.2.5	Esempio: misura rumorosa di L parametri con N osservazioni	90
1.3.2.6	Limite inferiore di varianza: <i>Cramér–Rao lower bound</i> (CRLB)	91

1.3.2.7	Stimatore a minimo MSE (MMSE)	93
1.3.2.8	Stimatore MMSE lineare	95
1.3.2.9	Esempio: stima di segnali	95
1.3.3	Modelli Stocastici	97
1.3.3.1	Teorema di Wold	97
1.3.3.2	Modello autoregressivo	97
1.3.3.3	Modello media mobile	99
1.3.3.4	Stima spettrale con modello autoregressivo e media mobile (ARMA)	100
Bibliografia		101
 2 Introduzione alla elaborazione adattativa dei segnali		 103
2.1	Introduzione	103
2.2	Il filtraggio adattativo: generalità e definizioni	105
2.2.1	Classificazione dei filtri adattativi	108
2.2.1.1	Classificazione in base alla caratteristica ingresso-uscita	108
2.2.1.2	Classificazione in base all'algoritmo di apprendimento	109
2.2.1.3	Classificazione in base alla funzione costo da ottimizzare	111
2.3	Principali applicazioni del filtraggio adattativo	114
2.3.1	Processo d'identificazione di un sistema fisico dinamico	114
2.3.1.1	Scelta del modello	114
2.3.1.2	Insieme di misure	115
2.3.2	Predizione	116
2.3.3	Stima adattativa del modello inverso	117
2.3.3.1	Equalizzazione	117
2.3.3.2	Predistorsione e controllo	119
2.3.4	Cancellazione adattativa di interferenza	120
2.3.4.1	Cancellazione adattativa di rumore	120
2.3.4.2	Cancellazione d'eco	121
2.3.4.3	Cancellazione o controllo attivo del rumore	123
2.3.5	Schiere di sensori (<i>array processing</i>)	125
2.3.5.1	Cancellazione del rumore multicanale e stima della direzione di arrivo di un'onda	127
2.3.5.2	Beamforming	128
2.3.5.3	Controllo attivo dell'acustica ambientale	130
2.4	Reti neurali	131
2.4.1	Il neurone formale	133
2.4.2	La topologia	134
2.4.3	Paradigmi e algoritmi di apprendimento	135
2.4.4	Elaborazione "alla cieca" dei segnali e separazione di sorgenti	136
2.4.4.1	Separazione di sorgenti indipendenti	137
2.4.4.2	Deconvoluzione di sorgenti	138
Bibliografia		139

3	Filtraggio lineare ottimo	141
3.1	Introduzione	141
3.2	Generalità e notazione	141
3.2.1	Il filtro trasversale a singolo ingresso-uscita	142
3.2.2	Notazione multi ingresso-uscita	144
3.2.2.1	Filtro MIMO in notazione composita 1	146
3.2.2.2	Filtro MIMO in notazione composita 2	146
3.2.2.3	Sistema MIMO (P, Q) come parallelo di Q banchi filtri a P canali	147
3.2.2.4	Filtro MIMO in notazione <i>snap-shot</i> o composita 3	148
3.2.3	Scelta della funzione costo	149
3.2.4	Ottimizzazione stocastica e stocastica approssimata	149
3.3	Adattamento con ottimizzazione stocastica	151
3.3.1	Equazioni normali in notazione stocastica di Wiener	152
3.3.2	Sulla stima della matrice di correlazione e sulla soluzione delle equazioni normali	154
3.3.2.1	Stime della acf e ccf	155
3.3.3	Interpretazione nel dominio della frequenza e funzione coerenza	157
3.3.4	Misura delle prestazioni del filtro adattativo	159
3.3.4.1	Superficie di errore (<i>performance surface</i>)	159
3.3.4.2	Energia minima di errore	161
3.3.4.3	Forma canonica della superficie di errore	161
3.3.4.4	Eccesso di errore	161
3.3.5	Interpretazione geometrica e principio di ortogonalità	162
3.3.6	Analisi delle componenti principali del filtro ottimo	163
3.3.6.1	Numero di condizionamento della matrice di correlazione	166
3.3.7	Estensione nel dominio complesso del filtro di Wiener	166
3.3.8	Equazioni normali di Wiener multicanale	168
3.4	Esempi applicativi	169
3.4.1	Modellazione di un sistema dinamico 1	170
3.4.1.1	Determinazione della <i>performance surface</i> e minima energia d'errore	171
3.4.2	Modellazione di un sistema dinamico 2	172
3.4.3	<i>Time delay estimation</i>	174
3.4.3.1	Determinazione della <i>performance surface</i> e minima energia d'errore	176
3.4.4	Equalizzazione di un canale di comunicazione	177
3.4.5	Cancellatore adattativo di rumore	181
3.4.5.1	Effetto della componente del segnale all'ingresso di riferimento secondario	184
3.4.5.2	Prestazione del cancellatore di rumore	186
3.4.6	Cancellatore adattativo di rumore: prospezione acustica sottomarina	188
3.4.7	Cancellatore adattativo di rumore in assenza di segnale di riferimento secondario	189
3.4.7.1	Caso 1 - segnale utile a banda larga e rumore a banda stretta	189
3.4.7.2	Caso 2 - segnale utile a banda stretta e rumore a banda larga: <i>Adaptive Line Enhancement (ALE)</i>	190

Bibliografia	191
4 Metodo dei minimi quadrati	193
4.1 Introduzione	193
4.2 Introduzione al <i>Least Squares</i>: ottimizzazione stocastica approssimata	194
4.2.1 Generalità sulla metodologia Least Squares	195
4.2.2 Formulazione del filtraggio adattativo con metodo LS	196
4.2.2.1 Definizioni e notazione	198
4.2.2.2 Equazioni normali nella formulazione di Yule-Walker	199
4.2.2.3 Energia minima di errore	201
4.2.3 Note implementative e indici temporali	201
4.2.3.1 Matrice dei dati \mathbf{X} da singolo sensore	203
4.2.3.2 Matrice dei dati \mathbf{X} da schiera di sensori	205
4.2.4 Interpretazione geometrica e principio di ortogonalità	206
4.2.4.1 Principio di ortogonalità	207
4.2.4.2 Operatore proiezione e spazio colonna di \mathbf{X}	207
4.2.4.3 Proprietà della soluzione LS	208
4.2.5 Varianti metodo LS	209
4.2.5.1 LS pesato: <i>Weighted Least-Squares</i> (WLS)	209
4.2.5.2 LS regolarizzato	211
4.2.5.3 Regolarizzazione e mal-condizionamento della matrice \mathbf{R}_{xx}	212
4.2.5.4 LS pesato e regolarizzato	214
4.3 Sulla soluzione di sistemi lineari con metodo LS	214
4.3.1 Generalità sui sistemi di equazioni lineari sovra e sotto dimensionati	214
4.3.1.1 Sistema consistente con matrice quadrata	214
4.3.1.2 Sistema sovradimensionato	215
4.3.1.3 Sistema sottodimensionato	215
4.3.1.4 Algoritmo δ -solution (variante di Levenberg-Marquardt)	216
4.3.2 Soluzione iterativa del sistema LS con attrattore di Lyapunov	217
4.3.2.1 LS iterativo	219
4.3.2.2 LS iterativo-pesato	220
4.4 Metodi LS con fattorizzazione matriciale	221
4.4.1 Soluzione LS con decomposizione di Cholesky	222
4.4.2 Soluzione LS con metodi di ortogonalizzazione	223
4.4.2.1 Soluzione LS con fattorizzazione QR della matrice \mathbf{X}	224
4.4.3 Soluzione LS con metodo di decomposizione in valori singolari	227
4.4.3.1 Teorema di scomposizione in valori singolari	227
4.4.3.2 SVD e LS	228
4.4.3.3 Algoritmo SVD-LS	229
4.4.3.4 SVD e regolarizzazione di Tikhonov	229
4.5 Total Least Squares	230
4.5.1 Soluzione TLS	232
4.5.2 TLS Generalizzato	234

4.6	Sistemi lineari sottodimensionati a soluzione sparsa e algoritmi <i>matching pursuit</i>	236
4.6.1	Formulazione del problema della selezione della base	238
4.6.2	Soluzione LS iterativa approssimata a norma L_p minima	239
4.6.2.1	Soluzione sparsa a minima norma quadratica	239
4.6.2.2	Unicità della soluzione	241
4.6.2.3	Soluzione sparsa a minima norma quadratica pesata	241
4.6.2.4	Algoritmo FOCal <i>Underdetermined System Solver</i> (FOCUSS)	242
4.6.2.5	Algoritmo FOCUSS generale	244
4.6.2.6	Riformulazione algoritmo FOCUSS con <i>Affine Scaling Transformation</i> (AST)	245
	Bibliografia	249
5	Algoritmi adattativi del primo ordine	251
5.1	Introduzione	251
5.1.1	Sulla formulazione ricorsiva degli algoritmi di adattamento	253
5.1.1.1	Algoritmi SDA e SGA del primo ordine	254
5.1.1.2	Errore a priori ed errore a posteriori	255
5.1.1.3	Algoritmi SDA e SGA del secondo ordine	256
5.1.1.4	Varianti dei metodi del secondo ordine	257
5.1.1.5	Sommario dei metodi del secondo ordine SGA e SDA	259
5.1.2	Prestazioni degli algoritmi adattativi	260
5.1.2.1	Algoritmo di adattamento come sistema dinamico non lineare	261
5.1.2.2	Analisi di stabilità: convergenza media e quadratica-media	261
5.1.2.3	Vettore errore dei pesi e deviazione quadratica media	262
5.1.2.4	Prestazioni a regime: eccesso di errore	263
5.1.2.5	Velocità di convergenza e curva di apprendimento	263
5.1.2.6	Proprietà di inseguimento	264
5.1.3	Proprietà generali e degli algoritmi di adattamento	266
5.1.3.1	Analisi SGA mediante equazione alle differenze stocastica	266
5.1.3.2	Proprietà di minima perturbazione	267
5.1.3.3	Approccio energetico allo studio: principio di conservazione dell'energia	269
5.1.3.4	Principio di conservazione dell'energia	269
5.1.3.5	Teorema di conservazione dell'energia	270
5.2	Metodo di discesa lungo il gradiente: <i>Steepest-Descent Algorithm</i> (SDA)	271
5.2.1	Estensione multicanale dell'SDA	272
5.2.2	Dimostrazione di convergenza e stabilità dell'SDA	272
5.2.2.1	Condizione di stabilità dell'SDA	274
5.2.3	Velocità di convergenza: disparità degli autovalori e convergenza non uniforme	274
5.2.3.1	Disparità degli autovalori e spettro	276
5.2.3.2	Costante di tempo di convergenza e curva di apprendimento	277

5.3	Algoritmo del gradiente stocastico del primo ordine: <i>Least Mean Squares (LMS)</i>	278
5.3.1	Formulazione dell'algoritmo LMS	279
5.3.1.1	LMS: formulazione con approssimazione istantanea	280
5.3.1.2	Sommario algoritmo LMS	281
5.3.1.3	Confronto LMS e SDA	281
5.3.1.3	Costo computazionale algoritmo LMS	281
5.3.2	Proprietà di minima perturbazione e derivazione alternativa dell'algoritmo LMS	282
5.3.3	Estensione LMS nel dominio complesso	283
5.3.3.1	Costo computazionale	285
5.3.4	LMS con vincolo lineare	285
5.3.4.1	Determinazione della soluzione LS	285
5.3.4.2	Soluzione ricorsiva	287
5.3.4.3	Sommario algoritmo LMS vincolato	287
5.3.5	Algoritmi LMS multicanale	287
5.3.5.1	Adattamento globale	289
5.3.5.2	Adattamento a banchi	290
5.3.5.3	Adattamento dei singoli filtri	290
5.3.5.4	LMS MIMO come approssimazione SDA MIMO	291
5.4	Analisi statistica e prestazionale dell'algoritmo LMS	291
5.4.1	Modello di analisi prestazionale	292
5.4.1.1	Energia minima di errore nel modello di analisi prestazionale	293
5.4.2	Caratterizzazione e convergenza LMS con equazione alle differenze stocastica	293
5.4.2.1	Studio della convergenza debole	294
5.4.2.2	Convergenza quadratica media: studio della deviazione quadratica media del vettore errore	296
5.4.3	Eccesso di errore e curva di apprendimento	299
5.4.3.1	Eccesso di errore a regime	299
5.4.3.2	Curva di apprendimento	302
5.4.4	Velocità di convergenza: disparità degli autovalori e convergenza non uniforme	304
5.4.5	Analisi dell'errore a regime via FdT per ingresso deterministico	305
5.5	Varianti algoritmo LMS	306
5.5.1	Algoritmo <i>Normalized LMS</i> (NLMS)	307
5.5.1.1	Costo computazionale algoritmo NLMS	307
5.5.1.2	Proprietà di minima perturbazione dell'algoritmo NLMS	308
5.5.1.3	Algoritmi NLMS proporzionali	309
5.5.2	Altre varianti dell'algoritmo LMS	311
5.5.2.1	Algoritmo <i>Sign-Error</i> LMS	311
5.5.2.2	Algoritmo <i>Signed-Regressor</i> LMS	312
5.5.2.3	Algoritmo <i>Sign-Sign</i> LMS	312
5.5.2.4	Algoritmo <i>Least Mean Fourth</i> (LMF)	312
5.5.2.5	Algoritmo <i>Least Mean Mixed Norm</i> (LMMN)	313
5.5.2.6	LMS con filtro di stima del gradiente	314

5.5.2.7 Momentum LMS	314
5.5.3 Algoritmi LMS con apprendimento ritardato	315
5.5.3.1 Operatore di filtraggio nel dominio del tempo discreto	316
5.5.3.2 Algoritmo LMS ritardato (<i>delayed LMS</i>)	318
5.5.3.3 <i>Filtered-X</i> LMS	318
5.5.3.4 LMS con rete aggiunta	319
5.5.3.5 FX-LMS multicanale	320
5.5.3.6 AD-LMS multicanale	326
Bibliografia	327
6 Algoritmi a regressione sequenziale	331
6.1 Introduzione	331
6.2 Metodo di Newton e algoritmi a regressione sequenziale	332
6.2.1 Algoritmo di Newton	332
6.2.1.1 Studio della convergenza	333
6.2.2 La classe di algoritmi a regressione sequenziale	334
6.2.2.1 Definizioni e notazione	334
6.2.2.2 Derivazione algoritmi ESR	335
6.2.2.3 Studio della convergenza media	336
6.2.2.3 Algoritmo LMS/Newton	336
6.2.3 Stima ricorsiva dell'autocorrelazione <i>time-average</i>	337
6.2.3.1 Lemma di inversione matriciale	337
6.2.3.2 Stima ricorsiva di $\mathbf{R}_{xx,n}^{-1}$ con LIM	338
6.2.3.3 Algoritmo a regressione sequenziale con LIM	338
6.3 Algoritmo della proiezione affine	339
6.3.1 Derivazione APA con proprietà di minima perturbazione	340
6.3.1.1 Derivazione APA come metodo di Newton approssimato	341
6.3.2 Complessità algoritmi APA	341
6.3.3 La classe di algoritmi APA	342
6.3.3.1 Algoritmo della proiezione affine veloce	343
6.4 Algoritmo a regressione sequenziale con fattore di oblio: Recursive Least Squares (RLS)	344
6.4.1 Derivazione metodo RLS	344
6.4.1.1 Calcolo ricorsivo della matrice di correlazione con fattore di oblio e guadagno di Kalman	345
6.4.1.2 RLS: aggiornamento con errore a priori e a posteriori	346
6.4.1.3 Algoritmo LS ricorsivo convenzionale (CRLS)	349
6.4.1.4 Complessità computazionale RLS	351
6.4.2 Analisi prestazionale e convergenza dell'RLS	351
6.4.2.1 Studio delle convergenza media	352
6.4.2.2 Studio delle convergenza quadratica-media	354
6.4.2.3 Robustezza CRLS	354

6.4.3	RLS in ambiente non stazionario	355
6.5	Filtro di Kalman	356
6.5.1	Formulazione del filtro di Kalman a tempo discreto	358
6.5.2	Algoritmo del FdK	361
6.5.3	Filtraggio di Kalman come estensione del criterio RLS	363
6.5.4	Robustezza del FdK	364
6.5.5	Algoritmo del FdK in presenza di segnale esterno	365
6.6	Prestazioni di inseguimento degli algoritmi adattativi	366
6.6.1	Modello di analisi	366
6.6.1.1	Generazione del processo non stazionario con modello passeggiata aleatoria	367
6.6.1.2	Energia minima di errore	369
6.6.1.3	Grandezze di analisi e relazioni fondamentali	369
6.6.2	Prestazioni inseguimento algoritmo LMS	372
6.6.2.1	Convergenza quadratica media LMS nel caso non stazionario: studio della MSD	372
6.6.3	Prestazioni inseguimento algoritmo RLS	374
6.6.3.1	Convergenza quadratica media RLS nel caso non stazionario: studio della MSD	375
6.7	Algoritmi a regressione sequenziale di errore MIMO	376
6.7.1	RLS multicanale	377
6.7.2	Filtraggio adattativo MIMO con ingressi a bassa diversità	377
6.7.2.1	RLS fattorizzato multicanale	378
6.7.2.2	LMS multicanale con dipendenza tra i canali	379
6.7.3	APA multicanale	380
6.8	Legge generale di adattamento	381
6.8.1	Forma adattativa regolarizzata con vincolo di sparsità	382
6.8.1.1	Adattamento lineare: classe APA e RLS	384
6.8.1.2	Adattamento non lineare con discesa lungo il gradiente naturale: classe PNLMS e IPNLMS	384
6.8.2	<i>Exponentiated Gradient Algorithms</i>	385
6.8.2.1	Algoritmo EG per pesi positivi	386
6.8.2.2	Algoritmo EG per pesi positivi e negativi	387
6.8.2.3	Algoritmo <i>Exponentiated</i> RLS	388
	Bibliografia	389
7	Algoritmi a blocchi e in dominio trasformato	391
7.1	Introduzione	391
7.1.1	Classificazione degli algoritmi <i>on-line</i> e a blocchi in dominio trasformato	394
7.2	Filtraggio adattativo a blocchi	395
7.2.1	Algoritmo LMS a blocchi	397
7.2.1.1	Sommario algoritmo BLMS	398

7.2.2	Proprietà di convergenza del BLMS	398
7.3	Filtraggio adattativo a blocchi nel dominio della frequenza	399
7.3.1	Convoluzione e filtraggio nel dominio della frequenza	400
7.3.1.1	DFT e IDFT in notazione vettoriale	401
7.3.1.2	Convoluzione lineare nel dominio della frequenza con metodo <i>overlap-save</i>	402
7.3.2	Generalità sugli algoritmi FDAF	405
7.3.2.1	La classe degli algoritmi FDAF	405
7.3.2.2	Normalizzazione del passo di adattamento: <i>step size normalization</i>	406
7.3.3	Algoritmo <i>overlap-save</i> FDAF	407
7.3.3.1	Aggiornamento dei pesi e vincolo di gradiente	407
7.3.3.2	Sommario algoritmo OS-FDAF	410
7.3.4	Algoritmo <i>overlap-save</i> FDAF non vincolato	411
7.3.5	Algoritmo <i>overlap-add</i> FDAF	412
7.3.6	Algoritmo <i>overlap-save</i> FDAF con errore in frequenza	414
7.3.7	FDAF non vincolato con $N = M$: metodo a convoluzione circolare	415
7.3.7.1	Matrice Toeplitz circolante	415
7.3.7.2	FDAF a convoluzione circolare	416
7.3.8	Analisi prestazionale degli algoritmi FDAF	418
7.3.8.1	Analisi computazionale	418
7.3.8.2	Analisi della convergenza UFDAF	419
7.3.8.3	Matrice di correlazione normalizzata	421
7.4	Algoritmi FDAF in frequenza con risposta impulsiva partizionata	421
7.4.1	Algoritmo PBFDAF	422
7.4.1.1	Sviluppo algoritmo PBFDAF	424
7.4.1.2	Sommario algoritmo PBFDAF	426
7.4.2	Costo computazionale PBFDAF	427
7.4.3	Prestazioni Algoritmo PBFDAF	428
7.4.3.1	Prestazioni PBFDAF per $L = M$	428
7.4.3.2	Prestazioni PBFDAF per $L < M$	429
7.5	Filtri adattativi nel dominio trasformato	430
7.5.1	Algoritmi TDFA	431
7.5.1.1	DTAF: trasformazioni ottime e sub-ottime	432
7.5.1.2	LMS nel dominio trasformato	434
7.5.1.3	Sommario algoritmo LMS con <i>sliding transformation</i>	434
7.5.2	LMS a finestra scorrevole: interpretazione campionamento in frequenza con banco filtri passa-banda	435
7.5.2.1	Note implementative	438
7.5.3	Prestazioni TDFA	442
7.6	Metodi multirate e banchi filtri	444
7.6.1	Decimazione, interpolazione e rappresentazioni multirate	444
7.6.1.1	Decimazione	445
7.6.1.2	Interpolazione	447
7.6.1.3	Rappresentazione polifase e a componenti modulate	450
7.6.2	DFT e banco filtri di analisi e di sintesi	456

7.6.2.1	Forme duali del banco filtri di analisi	456
7.6.2.2	Forme duali del banco filtri di sintesi	457
7.6.3	Progetto dei banchi filtri	458
7.6.3.1	Banco filtri a due canali QMF	459
7.6.3.2	Rappresentazione del banco QMF nel dominio delle componenti modulate	461
7.6.3.3	Progetto del banco QMF a ricostruzione perfetta	464
7.6.3.4	Sintesi in frequenza: fattorizzazione spettrale	467
7.6.3.5	Progetto del prototipo passa-basso con il metodo di Johnston	469
7.6.3.6	Sintesi nel dominio del tempo	470
7.6.3.7	Banchi filtri FIR a coseno modulato: banchi pseudo-QMF	473
7.6.3.8	Compensazione dell' <i>aliasing</i>	474
7.6.3.9	Banchi filtri a spaziatura non uniforme	476
7.7	Filtraggio adattativo a sottobande	478
7.7.1	SAF a ciclo-aperto e ciclo-chiuso	478
7.7.1.1	Condizione di esistenza della soluzione ottima	480
7.7.2	Strutture SAF	482
7.7.2.1	Struttura SAF tridiagonale di Gilloire-Vetterli	483
7.7.2.2	Adattamento LMS	485
7.7.2.3	Struttura SAF polifase di Pradhan-Reddy	485
7.7.2.4	Caratteristiche dei banchi di analisi-sintesi nelle strutture SAF	488
	Bibliografia	489
8	Predizione lineare e algoritmi a ordine ricorsivo	493
8.1	Introduzione	493
8.2	Stima lineare, predizione in avanti e all'indietro	494
8.2.1	Stima lineare, predizione in avanti e predizione all'indietro: approccio ottimo	494
8.2.1.1	Equazioni normali aumentate nella forma di Wiener	497
8.2.1.2	Stimatore lineare simmetrico	498
8.2.1.3	<i>Forward linear prediction</i>	499
8.2.1.4	<i>Backward linear prediction</i>	501
8.2.1.5	Relazione tra i coefficienti di predizione nel caso di processi stazionari	504
8.2.1.6	Predizione lineare in avanti e all'indietro combinata: <i>forward-backward linear prediction</i>	505
8.2.2	Stima lineare, predizione in avanti e predizione all'indietro: approccio LS	505
8.2.2.1	Predizione LS <i>forward</i> e <i>backward</i> combinata	506
8.2.3	Equazioni normali aumentate nella forma di Yule-Walker	507
8.2.4	Stima spettrale di una sequenza aleatoria lineare	508
8.2.5	Codifica a predizione lineare (LPC) del segnale vocale	511
8.3	Algoritmi a ordine ricorsivo	513
8.3.1	Lemma di inversione di matrici partizionate	514

8.3.2	Filtri a ordine ricorsivo	516
8.3.3	Algoritmo di Levinson-Durbin	518
8.3.3.1	Determinazione dei coefficienti di riflessione	519
8.3.3.2	Inizializzazione parametri k e β	521
8.3.3.3	Sommario algoritmo Levinson-Durbin	522
8.3.3.4	Filtro a predizione di errore in forma diretta II	523
8.3.4	Filtri di predizione a traliccio	524
8.3.5	Algoritmo di Schür	526
8.3.5.1	Proprietà della struttura a traliccio	529
8.3.5.2	Filtro a traliccio inverso a soli poli	529
8.4	Algoritmi RLS a ordine ricorsivo	530
8.4.1	Formulazione <i>Fast Fixed-Order</i> RLS in notazione ordine ricorsivo	530
8.4.1.1	Filtro trasversale RLS	531
8.4.1.2	Filtro predittore <i>forward</i> RLS	532
8.4.1.3	Filtro predittore <i>backward</i>	534
8.4.2	Algoritmi FKA, FAEST e FTF	535
8.4.2.1	Algoritmo veloce di Kalman (<i>Fast Kalman Algorithm</i>)	535
8.4.2.2	Algoritmo sequenziale veloce con errore a posteriori <i>Fast a posteriori error sequential technique</i> (FAEST)	537
8.4.2.3	Algoritmo sequenziale veloce con errore priori <i>Fast Transversal Filter</i> (FTF)	539
8.4.3	RLS su reti a scala-traliccio	540
8.4.3.1	RLS scala-traliccio con errore a posteriori	541
8.4.3.2	RLS scala-traliccio con errore a priori	543
8.4.3.3	RLS scala-traliccio con aggiornamento errore a retroazione	545
	Bibliografia	547
9	Filtraggio spazio-temporale discreto	549
9.1	Introduzione	549
9.1.1	Applicazioni dell'array processing	550
9.1.2	Tipologie di sensore	550
9.1.3	Distribuzione spaziale dei sensori	552
9.1.4	Algoritmi AP	552
9.2	Array processing: modello e notazione	553
9.2.1	Modello di propagazione	554
9.2.1.1	Vettore di direzione	556
9.2.1.2	Funzione di direttività del sensore	557
9.2.2	Modello del segnale	559
9.2.2.1	Modello di propagazione anecoico	559
9.2.2.2	Modello di propagazione in ambiente confinato	560
9.2.3	Vettori di direzione per geometrie di array tipiche	561
9.2.3.1	Array lineare a distribuzione uniforme (ULA)	561
9.2.3.2	Array circolare a distribuzione uniforme (UCA)	563

9.2.3.3	Array lineare a distribuzione armonica	564
9.2.4	Modello circuitale per array processing e campionamento spazio temporale	565
9.2.4.1	Modello multi ingresso-uscita composito per array processing	565
9.2.4.2	Apertura spazio temporale dell'array: campionamento spazio-temporale	567
9.2.4.3	Vettore direzione per <i>filter & sum beamformer</i>	569
9.3	Caratteristiche del campo di rumore e indici di qualità	570
9.3.1	Matrice di covarianza spaziale e operatori di proiezione	570
9.3.1.1	Rumore spazialmente bianco	571
9.3.1.2	Fattorizzazione spettrale della matrice di covarianza spaziale	571
9.3.1.3	Operatori di proiezione	572
9.3.1.4	Rumore isotropico a simmetria sferica e cilindrica	572
9.3.2	Caratteristiche del campo di rumore	573
9.3.2.1	Campo coerente	574
9.3.2.2	Campo incoerente	574
9.3.2.3	Campo diffuso	574
9.3.2.4	Campo di rumore combinato	576
9.3.3	Parametri di qualità e sensibilità dell'array	576
9.3.3.1	Rapporto segnale rumore ingresso e in uscita del BF	577
9.3.3.2	Funzioni di radiazione	578
9.3.3.3	Guadagno dell'array	579
9.3.3.4	Sensibilità	582
9.4	Beamforming convenzionale	582
9.4.1	Beamforming convenzionale: DSBF-ULA	583
9.4.1.1	Diagramma di radiazione	583
9.4.1.2	Guadagni del DSBF	585
9.4.1.3	Orientazione del diagramma di radiazione: <i>steering delay</i>	587
9.4.2	Microfoni differenziali	588
9.4.3	Beamformer a banda larga con decomposizione spettrale	591
9.4.4	Sintesi diretta delle risposta spaziale con metodi approssimati	593
9.4.4.1	Metodo della finestatura	593
9.4.4.2	Sintesi della risposta spaziale con campionamento delle risposta in frequenza e angolare	595
9.5	Beamforming statici statisticamente ottimi: <i>data dependent beamforming</i>	597
9.5.1	Beamformer a massimo SNR e superdirettivi	597
9.5.1.1	Beamformer standard di Capon	598
9.5.1.2	Soluzioni generali regolarizzate di Cox con vincoli di robustezza	599
9.5.1.3	Beamformer superdirettivo: <i>line-array</i>	602
9.5.2	<i>Post-filtering beamformer</i>	605
9.5.3	Beamformer a larga banda a minima varianza: algoritmo di Frost	608
9.5.3.1	Formulazione LS vincolata linearmente	610
9.5.3.2	Determinazione della matrice di vincolo	611
9.5.3.3	LS vincolato: soluzione con metodo dei moltiplicatori di Lagrange	612
9.5.3.4	Soluzione ricorsiva LMS: gradiente stocastico vincolato	612
9.5.3.5	Sommario algoritmo ricorsivo di Frost	613
9.5.3.6	Interpretazione geometrica	614

9.5.3.7 Soluzione ricorsiva: <i>gradient projection algorithm</i>	616
9.5.3.8 Determinazione dei vincoli dell'LCMV	616
9.6 Beamforming adattativo	619
9.6.1 Introduzione al beamforming adattativo: il cancellatore adattativo di rumore multiplo	620
9.6.1.1 Beamformer di Widrow	621
9.6.2 Cancellatore di interferenze multiple: <i>Generalized Sidelobe Canceller (GSC)</i>	622
9.6.2.1 Determinazione della matrice di blocco	624
9.6.2.2 Adattamento del GSC	625
9.6.2.3 GSC notazione composita con J vincoli	629
9.6.2.4 GSC nel dominio della frequenza	630
9.6.3 Beamforming GSC robusti	633
9.6.4 Beamforming in ambiente riverberante	633
9.6.4.1 Beamformer linearmente vincolato con vincolo adattativo	634
9.6.4.2 <i>Relative transfer function</i> GSC	635
9.7 Stima della direzione di arrivo e del tempo di ritardo	644
9.7.1 DOA a banda stretta	644
9.7.1.1 DOA con beamformer convenzionale: metodo <i>Steered Response Power (SRP)</i>	644
9.7.1.2 DOA con beamformer di Capon	645
9.7.1.3 DOA con analisi di sottospazio	646
9.7.1.4 DOA con metodi parametrici	648
9.7.2 Metodi DOA a banda larga	651
9.7.3 Metodi di stima del tempo di ritardo	651
9.7.3.1 Metodo della cross-correlazione	651
9.7.3.2 Metodo della cross-correlazione generalizzata di Knapp-Carter	652
9.7.3.3 Metodo SRP-PHAT	656
Bibliografia	658
A Appendice A – Fondamenti di Algebra Lineare	661
A.1 Matrici e vettori	661
A.2 Notazione, definizioni preliminari	661
A.2.1 Matrice trasposta ed Hermitiana	662
A.2.2 Vettori riga e colonna di una matrice	662
A.2.3 Matrice partizionata	663
A.2.4 Matrice diagonale e matrice simmetrica	664
A.2.5 Proprietà fondamentali	664
A.3 Matrice inversa, pseudo inversa e determinante	664
A.3.1 Matrice inversa	664
A.3.2 Matrice pseudo inversa	664
A.3.3 Determinante	665
A.4 Prodotto interno ed esterno di vettori	666

A.5	Vettori linearmente indipendenti	667
A.6	Rango e sottospazi associati a una matrice	667
A.6.1	Spazio colonna di una matrice	667
A.6.2	Spazio nullo o nucleo di una matrice	668
A.6.3	Teorema di rango	668
A.6.4	I quattro sottospazi fondamentali	669
A.7	Ortogonalità e matrici unitarie	669
A.8	Autovalori e autovettori	670
A.9	Traccia di una matrice	671
A.10	Diagonalizzazione di una matrice	671
A.11	Diagonalizzazione di una matrice normale	671
A.12	Norme di vettori e matrici	672
A.12.1	Norme di vettori	672
A.12.2	Norma di matrici	674
A.13	Lemma d'inversione matriciale	675
A.14	Teorema di decomposizione in valori singolari (SVD)	675
A.14.1	SVD e sottospazi della matrice X	677
A.14.2	SVD e matrice pseudoinversa	678
A.15	Numero di condizionamento	679
A.16	Prodotto di Kroneker	679
	Bibliografia	680
B	Appendice B – Fondamenti di programmazione non lineare	681
B.1	La programmazione non lineare	681
B.2	Metodi di ottimizzazione non vincolata	681
B.2.1	Esistenza e caratterizzazione del minimo	682
B.3	Algoritmi di ottimizzazione non vincolata	683
B.3.1	Principi di base	683
B.3.2	Algoritmi del primo e del secondo ordine	684
B.3.3	La tecnica <i>line search</i> e la condizione di Wolfe	685
B.3.4	Il metodo di Newton standard	687
B.3.5	La variante di Levenberg-Marquardt	689
B.3.6	Metodo a metrica variabile o quasi-Newton	689
B.3.7	Metodi del gradiente coniugato	691
B.4	Ottimizzazione vincolata	693
B.4.1	Problemi con un solo vincolo di uguaglianza: esistenza e caratterizzazione del minimo	693

B.4.2	Ottimizzazione vincolata: il metodo dei moltiplicatori di Lagrange	694
B.4.3	Funzione Lagrangiana per singolo vincolo	694
B.4.4	Ottimizzazione vincolata con vincoli di diseuguaglianza multipli: condizioni di Kuhn-Tucker	695
B.4.5	Moltiplicatori di Lagrange con vincoli multipli misti: condizioni di Karus-Kuhn-Tucker	697
B.4.6	Formulazione del problema duale	699
	Bibliografia	701

Prefazione

Fin dai tempi remoti della storia dell'uomo molti sono stati i tentativi di definire l'intelligenza. Aristotele sosteneva che tutte le persone, tranne gli schiavi, esprimessero facoltà intellettive simili e che le differenze fossero dovute all'insegnamento e all'esempio. In tempi più recenti l'intelligenza è stata definita come insieme innato di funzioni conoscitive, adattative, immaginative ecc, generate dall'attività di un cervello biologico umano o animale. Tra queste, la capacità di *adattamento* rappresenta la principale prerogativa presente in tutte le definizioni di comportamento "intelligente". Dal punto di vista biologico, l'adattamento è una proprietà che tutti gli organismi viventi possiedono e che può essere interpretata sia come una propensione al miglioramento della specie, sia come un processo conservativo tendente alla preservazione nel tempo della vita della specie stessa. Dal punto di vista psicologico, l'adattamento è sinonimo di apprendimento. In tal senso, l'apprendimento è una funzione comportamentale, più o meno consapevole, di un soggetto che adatta il suo atteggiamento come risultato di un'esperienza: *apprendere è adattarsi*.

Nei sistemi artificiali "intelligenti", siano essi a ispirazione biologica o interamente artificiali, l'*adattamento* e le metodologie con cui questo può essere messo in atto, rappresentano una prerogativa essenziale. In tale quadro, i *filtri adattativi* sono definiti come sistemi di elaborazione dell'informazione, analogici o numerici, in grado di "aggiustare" autonomamente i loro parametri in risposta a stimoli esterni. In altri termini, il sistema *impara* autonomamente e adatta i suoi parametri per il raggiungimento di un certo obiettivo di elaborazione come, per esempio, l'estrazione dell'informazione utile da un segnale acquisito, la rimozione dei disturbi dovuti al rumore o ad altre sorgenti interferenti o, più in generale, il filtro adattativo provvede all'eliminazione dell'informazione ridondante. Del resto, come asserisce lo psicologo americano Fred Attneave (1954): "La principale funzione di una macchina percettiva consiste nell'eliminazione dell'informazione ridondante, procedendo così a una descrizione o codifica dell'informazione stessa in una forma più economica rispetto a quella presente sui recettori".

L'usabilità delle metodologie di *elaborazione adattativa dei segnali* alla soluzione di problemi reali è molto estesa e rappresenta un paradigma con numerose applicazioni. Metodi di filtraggio adattativo sono usati nelle scienze economico-finanziarie,

ingegneristiche e sociali, in medicina, in biologia, nelle neuroscienze e in molti altri settori di alto interesse strategico. Il filtraggio adattativo rappresenta, inoltre, un settore molto attivo di studio e ricerca e che, per un'approfondita comprensione, richiede avanzate conoscenze interdisciplinari.

Obiettivi del testo

L'obiettivo della presente opera è di fornire strumenti teorici e pratici avanzati per lo studio e la determinazione di strutture circuitali e algoritmi robusti per l'elaborazione adattativa di segnali nei vari contesti applicativi, quali: le comunicazioni multimediali e multimodali, i settori biologico, biomedico, economico, ambientale, acustico, le telecomunicazioni, il telerilevamento, il monitoraggio e, in generale, il modellamento e la predizione di fenomeni fisici complessi.

In particolare, oltre a presentare i concetti teorici fondamentali di base, sono introdotti i più importanti algoritmi adattativi fornendo al contempo anche strumenti per valutarne le prestazioni. Il lettore, oltre ad acquisire le teorie di base, sarà in grado di disegnare e realizzare l'algoritmo e di valutarne le prestazioni per l'applicazione considerata.

L'idea del testo nasce dalla pluriennale attività di docenza dell'autore, nel corso *Circuiti e Algoritmi per l'Elaborazione del Segnale* tenuto presso la Facoltà di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Roma "La Sapienza". Il corso da 9 CFU è obbligatorio per tutti gli orientamenti della Laurea Magistrale di Ingegneria delle Comunicazioni, mentre per gli studenti di Ingegneria Elettronica e Ingegneria Informatica e Sistemistica, è erogato come corso a scelta da 6 CFU.

L'esperienza d'insegnamento a studenti con percorsi e obiettivi formativi diversi nella stessa classe, ha portato all'ideazione di un testo che fosse del tutto auto contenuto in modo che il lettore e il docente potessero facilmente modulare i vari argomenti e approfondimenti in funzione di esigenze educative specifiche.

Nella stesura dell'opera, particolare attenzione è stata posta nei primi capitoli e nelle appendici matematiche che rendono adatto il testo proprio a studenti senza particolari prerequisiti se non quelli comuni a tutti i trienni dei corsi della Facoltà di Ingegneria e di altre Facoltà scientifiche.

I filtri adattativi sono sistemi dinamici non stazionari, non lineari e tempo varianti e, a volte, volendo evitare un approccio semplicistico, gli argomenti possono presentare alcune concettosità che potrebbero risultare di difficile comprensione. Per tale motivo, molti degli argomenti sono introdotti considerando differenti punti di vista e con più livelli di approfondimento.

Nella letteratura straniera sono disponibili numerosi e autorevoli testi che trattano l'elaborazione adattativa dei segnali ma, si vuole sottolineare, le motivazioni che hanno condotto alla scrittura di quest'opera, non sono semplicemente legate alla lingua, ma a una visione filosoficamente diversa della elaborazione *intelligente* del segnale. Il filtraggio adattativo può essere introdotto, infatti, partendo da differenti teorie. In quest'opera si è voluto evitare un approccio "ideologico" legato a qualche disciplina specifica ma si è voluto porre l'accento sull'interdisciplinarietà presentando gli argomenti più importanti con paradigmi differenti. Per esempio, un argomento di centrale importanza come l'algoritmo *Least Mean Squares* (LMS) è esposto

considerando tre modi distinti e per certi versi originali. Nel primo, seguendo un criterio sistemistico, l'LMS è presentato considerando un approccio energetico attraverso l'attrattore di Lyapunov; nel secondo, con un approccio statistico classico, è introdotto come approssimazione stocastica del metodo di ottimizzazione della discesa del gradiente; nella terza modalità, seguendo un percorso più "circuitale", è presentato considerando semplici proprietà assiomatiche di minima perturbazione. Si rileva, inoltre, che tale filosofia non rappresenta soltanto un esercizio pedagogico, ma è di fondamentale importanza negli argomenti più avanzati e nelle dimostrazioni teoriche dove, seguendo una filosofia piuttosto che l'altra, capita spesso di percorrere strade tortuose e senza sbocchi.

Organizzazione e struttura del testo

La successione degli argomenti è presentata in modalità classica. Nella prima parte sono introdotti i concetti fondamentali del filtraggio ottimo lineare e in seguito sono presentate le tecniche elaborazione *on-line* e di blocco del primo e del secondo ordine. Un particolare sforzo è stato fatto nel cercare di presentare gli argomenti con un formalismo comune, pur cercando di restare fedeli ai riferimenti bibliografici considerati. Tutta la notazione è definita a tempo-discreto e gli algoritmi sono presentati in modo da facilitare lettore alla scrittura del codice per la realizzazione delle applicazioni descritte nel testo.

Il volume è composto di nove capitoli, ognuno dei quali riporta i riferimenti bibliografici dove il lettore potrà approfondire in maniera autonoma gli argomenti di maggiore interesse, e due appendici matematiche.

Il *I Capitolo* tratta argomenti propedeutici alla teoria del filtraggio adattativo. Nella prima parte sono introdotti i concetti fondamentali relativi ai *circuiti a tempo discreto*; la seconda parte introduce i *processi stocastici nel tempo discreto*; infine, vengono richiamati i fondamenti della *teoria della stima*.

Il *II Capitolo* introduce le definizioni fondamentali della teoria del filtraggio adattativo, vengono discusse le principali tipologie di filtri. È introdotto il concetto di funzione costo da minimizzare e sono introdotte le principali filosofie relative a metodi di adattamento. Sono presentate e discusse le principali applicazioni delle tecniche di elaborazione adattativa dei segnali.

Nel *III Capitolo* è introdotta la teoria del filtraggio ottimo di Wiener. Sono affrontate le problematiche minimizzazione dell'*errore quadratico medio* e della determinazione del suo valore ottimo. È introdotta la formulazione delle *equazioni normali* e il *filtro ottimo di Wiener* a tempo discreto. Sono presentate le notazioni multi-canale di tipo 1, 2 e 3, e la relativa generalizzazione multi ingresso e multi uscita del filtro ottimo. Sono, inoltre, discussi corollari, e presentate alcune applicazioni relative alla predizione e alla stima di sequenze random.

Nel *Capitolo IV* sono affrontate le modalità di adattamento nel caso in cui i segnali d'ingresso non siano statisticamente caratterizzati. È introdotto il *principio dei minimi quadrati* o *Least Squares* (LS) riconducendo il problema della stima a un algoritmo di ottimizzazione. Sono introdotte le *equazioni normali nella formulazione di Yule-Walker* e discusse le analogie e le differenze con la teoria del filtraggio ottimo di Wiener. Sono introdotti gli stimatori ottimi a varianza minima, le tecniche di pesatura

delle equazioni normali, le tecniche di soluzione regolarizzata. Sono, inoltre, introdotti e discussi i metodi algebrici di decomposizione matriciale per la soluzione dei sistemi LS nei casi sopra e sotto dimensionati; è discussa la tecnica di decomposizione in valori singolari nella soluzione dei sistemi LS. È presentato il metodo dell'attrattore di Lyapunov per la soluzione iterativa LS e introdotti gli algoritmi *Least Mean Squares* (LMS) e di Kaczmarz, visti come soluzione iterativa LS. Nel capitolo è inoltre presentata e discussa la metodologia *Total Least Squares* (TLS) generalizzata e gli algoritmi *matching pursuit* nel caso di sistemi sottodimensionati e sparsi.

Il *Capitolo V* introduce gli algoritmi di adattamento del primo ordine per il filtraggio adattativo *on-line*. I metodi sono presentati con un approccio statistico classico e reintrodotta l'algoritmo LMS con il paradigma del gradiente stocastico. Sono presentate le metodologie per la valutazione delle prestazioni degli algoritmi di adattamento con particolare riferimento alla velocità di convergenza e di inseguimento. Sono introdotte e discusse le proprietà generali assiomatiche dei filtri adattativi. È introdotta la metodologia delle equazioni alle differenze stocastiche, come metodo generale per la valutazione delle prestazioni degli algoritmi di adattamento *on-line*. Sono presentate alcune varianti del metodo LMS; sono presentate e discusse alcune applicazioni multicanale e presentati algoritmi ad apprendimento ritardato come la classe *Filtered X-LMS* nelle sue varie forme e il metodo *Filtered Error LMS* o della rete aggiunta.

Nel *Capitolo VI* vengono introdotti algoritmi del secondo ordine per la soluzione delle equazioni LS, con metodi ricorsivi, detti a *regressione sequenziale di errore*. Nella prima parte del capitolo viene brevemente esposto il metodo di Newton e la sua versione con correlazioni stimate su medie temporali, definendo la classe di algoritmi adattativi detti a regressione sequenziale. È presentata, successivamente, una variante dell'algoritmo NLMS, detto *Affine Projection Algorithm* (APA), nel contesto degli algoritmi di secondo ordine. Viene, in seguito, presentata la famiglia di algoritmi detti *Recursive Least Squares* (RLS), e ne vengono studiate le caratteristiche di convergenza. Vengono presentate alcune varianti e generalizzazioni dell'RLS come, per esempio, il filtro di Kalman, con prestazioni ottimali nel caso di ambiente non stazionario. Vengono esposti, infine, alcuni criteri per lo studio delle prestazioni di algoritmi adattativi operanti in ambienti non stazionari.

Nel *Capitolo VII* sono presentate strutture e algoritmi per l'implementazione di filtri adattativi in modalità *a blocchi* e *on-line*, operanti nel dominio del tempo, in dominio trasformato (tipicamente quello della frequenza). Nella prima parte del capitolo è introdotto l'algoritmo LMS di blocco. Sono introdotti successivamente, due paragrafi riguardanti algoritmi nel dominio della frequenza vincolati noti come *Frequency Domain Adaptive Filters* (FDAF), non vincolati o *unconstrained* FDAF e partizionati o *partitioned* FDAF. Nel terzo paragrafo sono presentati gli algoritmi adattativi nel dominio trasformato indicati come *Domain Transform Adaptive Filters* (DTAF). Nel capitolo sono, inoltre, introdotti i metodi *multirate*, le tecniche di progetto di banchi filtri e presentati vari algoritmi di adattamento in sotto-bande o *Subband Adaptive Filters* (SAF).

Nel *Capitolo VIII* viene considerata la tematica specifica della predizione lineare in avanti e all'indietro e introdotta la tematica degli algoritmi a ordine ricorsivo. Entrambi

questi argomenti sono connessi a strutture implementative con particolari proprietà di robustezza ed efficienza. In relazione con tale aspetto, è introdotto il tema della struttura circuitale del filtro, e dell'algoritmo di adattamento, in relazione alle problematiche di controllo del rumore, della scalatura e del calcolo efficiente dei coefficienti e degli effetti dovuti alla loro quantizzazione.

Il *Capitolo XIX* introduce la problematica del filtraggio adattativo nel dominio temporale e spaziale in cui i segnali sono acquisiti da schiere di sensori omogenei disposti in posizioni spaziali differenti. Tale tematica, nota in letteratura come *Array Processing* (AP), è di fondamentale interesse in numerosi campi applicativi. Si pensi, per esempio, all'acquisizione dei segnali biomedici come l'elettroencefalogramma (EEG), l'elettrocardiogramma (ECG), la tomografia, oppure, nel settore delle telecomunicazioni, alle schiere di antenne e ai radar, al rilevamento dei segnali sismici, ai sonar, agli array microfonici per l'acquisizione dei segnali acustici ecc. In particolare sono introdotti i concetti fondamentali del filtraggio *spazio-temporale discreto*. La prima parte del capitolo introduce le nozioni fondamentali relative al modello di propagazione anecoico e riverberante, le funzioni di direttività dei sensori, il modello del segnale, e i vettori di direzione delle geometrie tipiche delle schiere. Vengono discusse le caratteristiche del campo di rumore nei vari contesti applicativi, gli indici di qualità dell'array. Nella seconda parte del capitolo sono introdotti i metodi per il *beamforming convenzionale*, discusse le caratteristiche di radiazione, i principali criteri di progetto relativamente alla minimizzazione degli indici di qualità. Sono introdotti i beamformer a banda larga con decomposizione spettrale e discusse le metodologie di sintesi diretta della risposta spaziale. Nella terza parte del capitolo, sono presentati i beamforming statici statisticamente ottimi; viene estesa la metodologia LS nel caso si vogliano minimizzare i disturbi relativi al campo di rumore. Sono discussi i metodi super direttivi, le relative tecniche di soluzione regolarizzata e presentate le tecniche di post-filtraggio nel caso di adattamento alle caratteristiche del segnale utile. È presentata, inoltre, la tecnica a larga banda e varianza minima (algoritmo di Frost). Nella quarta parte del capitolo sono esposte le modalità adattative per la determinazione on-line del beamforming operante in condizioni tempo-variante. Sono introdotti e discussi algoritmi multi ingresso e multi uscita, implementati nel dominio del tempo o in quello della frequenza, basati sulle statistiche del primo e del secondo ordine. Nella parte finale del capitolo è presentata la tematica della stima della direzione di arrivo sia nel caso di segnali a banda stretta in campo libero sia per segnali a larga banda e in ambiente confinato.

Nelle due appendici finali, infine, sono riportati alcuni concetti matematici fondamentali, utili per una maggiore comprensione e facilità di lettura del testo. In particolare, nella *Appendice A* sono richiamati al lettore alcuni concetti fondamentali e di veloce consultazione di algebra lineare. Nella *Appendice B* vengono brevemente introdotti i concetti fondamentali della *programmazione non lineare*. In particolare sono introdotte le metodologie di ottimizzazione non vincolata e vincolata.

Ringraziamenti

Molti colleghi hanno contribuito alla creazione di questo libro fornendo utili suggerimenti, rileggendo le bozze o sopportando le mie elucubrazioni sull'argomento.

Desidero ringraziare i miei collaboratori Raffaele Parisi e Michele Scarpiniti del Dipartimento di Scienza e Tecnica dell'Informazione e della Comunicazione (INFO-COM) dell'Università di Roma "La Sapienza".

Desidero, inoltre, ringraziare tutti gli studenti e tesisti frequentanti il laboratorio di ricerca, *Intelligent Signal Processing & Multimedia Lab* (ISPAMM LAB) presso il Dip. INFO-COM, dove sono stati messi a punto e confrontati molti degli algoritmi presentati nel testo. Un ringraziamento particolare va ai Dottorandi: Albenzio Cirillo, Danilo Comminiello e Cecilia Zannini che hanno eseguito un'efficace correzione di bozze.

Infine, un particolare ringraziamento va a mia moglie Silvia e a mia figlia Claudia a cui ho sottratto molto del mio tempo e che mi hanno sostenuto durante la scrittura dell'opera: *il libro è dedicato a loro*.

Roma, Marzo 2010

Aurelio Uncini