





Massimiliano Laddomada
Marina Mondin

Elaborazione numerica dei segnali

LEGENDA

-  Argomento trattato a lezione
-  Argomento trattato a lezione in modo parziale o
differente (riferirsi agli appunti)
-  Argomento accennato a lezione (riferirsi agli appunti)
-  Argomento non trattato a lezione



Copyright © 2007 Paravia Bruno Mondadori Editori
Via Archimede, 23 — 20129 Milano
Tel.: 02 74823.1
E-mail: hpeitalia@pearson.com
Web: <http://hpe.pearsoned.it>

Le informazioni contenute in questo libro sono state verificate e documentate con la massima cura possibile. Nessuna responsabilità derivante dal loro utilizzo potrà venire imputata agli Autori, a Paravia Bruno Mondadori Editori o a ogni persona e società coinvolta nella creazione, produzione e distribuzione di questo libro.

I diritti di riproduzione e di memorizzazione elettronica totale e parziale con qualsiasi mezzo, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, sono riservati per tutti i paesi. LA FOTOCOPIATURA DEI LIBRI È UN REATO Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, corso di Porta Romana n. 108, 20122 Milano, e-mail segreteria@aidro.org e sito web www.aidro.org <<file://www.aidro.org>>.

Copy-editing: Bruno Lanata
Grafica di copertina: Gianni Gilardoni
Stampa: Tip.Le.Co. — S. Bonico (PC)

Tutti i marchi citati nel testo sono di proprietà dei loro detentori.

978-88-7192-438-0

Printed in Italy

1^a edizione: ottobre 2007

Sommario

Prefazione	XIII
1 Concetti basilari sui segnali a tempo continuo e a tempo discreto	1
1.1 Segnali a tempo continuo	3
1.1.1 Esempio di segnale analogico: il segnale vocale	4
1.1.2 Classificazione dei segnali a tempo continuo	6
1.1.3 Valor medio di un segnale a tempo continuo	6
1.1.4 Energia e potenza media di un segnale a tempo continuo	7
1.1.5 Operazioni elementari sui segnali a tempo continuo	8
1.1.6 Segnali armonici e sinusoidali	10
1.1.7 Segnali analogici elementari	11
1.1.8 Sviluppo in serie di Fourier	13
1.1.9 Trasformata di Fourier	16
1.2 Segnali a tempo discreto: le sequenze numeriche	17
1.2.1 Classificazione dei segnali a tempo discreto	17
1.2.2 Sequenze elementari	20
1.2.3 Segnali armonici e sinusoidi a tempo discreto	22
1.2.4 Operazioni elementari tra segnali a tempo discreto	24
1.2.5 Energia e potenza media di segnali a tempo discreto	28
1.2.6 Energia e potenza media di segnali analogici campionati	30
1.3 Funzioni di correlazione di segnali a tempo discreto	31
1.3.1 Un'applicazione della funzione di correlazione	33
2 Campionamento e quantizzazione	35
2.1 Campionamento ideale	36
2.1.1 Fenomeno dell'aliasing	40
2.2 Campionamento reale	41
2.3 Campionamento con Sample and Hold	43
2.4 Campionamento di segnali analogici a banda illimitata	45
2.5 Ricostruzione del segnale: l'interpolazione	47
2.6 Quantizzazione uniforme	48
2.6.1 Errore di quantizzazione	52

2.6.2	Digitalizzazione di segnali musicali	55
2.7	Quantizzazione e sovracampionamento	55
3	Analisi in frequenza di segnali a tempo discreto	57
3.1	Trasformata di Fourier a tempo discreto (DTFT)	58
3.1.1	Condizioni di esistenza della DTFT	61
3.1.2	Proprietà della DTFT	63
3.1.3	Proprietà della DTFT di sequenze reali e complesse	65
3.1.4	Relazioni di Parseval	69
3.1.5	DTFT notevoli	70
3.1.6	Concetto di banda di un segnale a tempo discreto	73
3.2	Serie di Fourier a tempo discreto (DTFS)	74
3.3	Trasformata di Fourier discreta (DFT)	77
3.3.1	Relazione tra DTFT e DFT	79
3.3.2	Valutazione della DTFT su frequenze discrete tramite la DFT	80
3.3.3	Proprietà della DFT	82
3.3.4	Applicazione della DFT all'analisi dei segnali	90
3.4	Algoritmi di trasformata di Fourier veloce (FFT)	91
3.4.1	Algoritmi di riduzione della complessità della DFT	93
3.4.2	Algoritmo FFT con decimazione nel tempo	97
3.4.3	Algoritmo FFT con decimazione in frequenza	101
3.4.4	Cenni sulla trasformata discreta coseno	103
3.4.5	Cenni su altri algoritmi efficienti per il calcolo della DFT	104
4	Analisi in frequenza di segnali a tempo continuo campionati	107
4.1	Considerazioni introduttive	107
4.2	DTFT di un segnale analogico aperiodico campionato	109
4.2.1	Energia di segnali analogici campionati	110
4.3	DFT di segnali analogici aperiodici campionati	111
4.4	DFT di segnali analogici periodici	122
5	Sistemi lineari e tempo invarianti a tempo discreto	129
5.1	Classificazione dei sistemi a tempo discreto	130
5.2	Soluzioni di equazioni alle differenze	134
5.2.1	Soluzione formale dell'equazione alle differenze a coefficienti costanti	134
5.2.2	Risposte allo stato e all'ingresso nulli	139
5.3	Analisi tempo-frequenza dei sistemi LTI	143
5.3.1	Analisi nel dominio del tempo: la risposta all'impulso	143
5.3.2	Analisi nel dominio della frequenza: la risposta in frequenza	149
5.3.3	Risposta di un sistema LTI a esponenziali complessi	154
5.3.4	Risposta di un sistema LTI a sequenze sinusoidali	154
5.3.5	Risposta di un sistema LTI a sequenze periodiche	156
5.3.6	Risposta in frequenza di sistemi LTI a tempo discreto descritti da equazioni alle differenze	157
5.3.7	Concetto di filtraggio	159

5.4	Stabilità di sistemi LTI a tempo discreto	162
5.5	Condizioni di realizzabilità fisica	164
5.6	Distorsione introdotta da un sistema LTI	165
5.7	Interconnessioni di sistemi LTI	168
5.7.1	Interconnessione serie di sistemi LTI	169
5.7.2	Interconnessione in parallelo di sistemi LTI	169
5.7.3	Interconnessione con reazione di sistemi LTI	170
5.8	Analisi di sistemi LTI mediante DFT	171
5.8.1	Tecnica di sovrapposizione e somma	174
5.8.2	Tecnica della sovrapposizione ed estrazione	176
6	Trasformata zeta	181
6.1	Definizione	182
6.2	Relazione tra DTFT e trasformata zeta	184
6.3	Relazione tra trasformata zeta e operatori di DFT e DFS	186
6.4	Analisi della regione di convergenza	187
6.4.1	Regione di convergenza di sequenze $x(n)$ a supporto finito	189
6.4.2	Regione di convergenza di sequenze $x(n)$ causali a supporto illimitato	190
6.4.3	Regione di convergenza di sequenze $x(n)$ anticausali a supporto illimitato	192
6.4.4	Regione di convergenza di sequenze $x(n)$ bilatero a supporto illimitato	194
6.5	Proprietà della trasformata zeta	197
6.6	Trasformate zeta razionali	204
6.6.1	Trasformate zeta razionali di sequenze causali	204
6.7	Inversione della trasformata zeta	206
6.7.1	Metodo diretto	207
6.7.2	Metodo delle divisioni successive	208
6.7.3	Inversione per espansione in fratti semplici	210
6.8	Trasformata zeta unilatera	219
6.8.1	Proprietà della trasformata zeta unilatera	220
6.8.2	Teorema del valore iniziale	221
6.8.3	Teorema del valore finale	221
6.9	Analisi dei sistemi LTI mediante trasformata zeta	223
6.9.1	Analisi dei sistemi LTI con condizioni iniziali non nulle	228
6.9.2	Impiego della trasformata zeta nella moltiplicazione tra polinomi	230
6.9.3	Analisi della stabilità di sistemi LTI	231
6.9.4	Realizzabilità fisica di un sistema LTI	234
6.9.5	Progetto di filtri con la tecnica del posizionamento dei poli e degli zeri	236
6.9.6	Sistemi inversi	239
6.9.7	Sistemi LTI a fase minima	241

6.9.8	Sistemi LTI passa-tutto	242
6.9.9	Funzione di trasferimento di Sistemi LTI interconnessi	244
6.10	Applicazioni della trasformata zeta all'elaborazione dei segnali audio	246
6.10.1	Equalizzatori audio	246
6.10.2	Effetti audio digitali	248
6.10.3	Tastiera a toni del telefono numerico	251
7	Progetto di filtri IIR	255
7.1	Considerazioni preliminari	256
7.2	Prototipo di filtro analogico	259
7.2.1	Prototipo di filtro analogico: il filtro di Butterworth	262
7.2.2	Prototipo di filtro analogico: il filtro di Chebyshev	268
7.2.3	Prototipo di filtro analogico: il filtro Ellittico	273
7.2.4	Confronto tra prototipi di filtri analogici	275
7.3	Tecniche di passaggio dal tempo continuo al tempo discreto	275
7.3.1	Tecnica dell'approssimazione delle derivate	275
7.3.2	Tecnica dell'invarianza all'impulso	279
7.3.3	Tecnica della trasformazione bilineare	284
7.4	Trasformazioni spettrali tra diverse tipologie di filtro	289
7.5	Progetto di filtri IIR mediante tecniche assistite dal calcolatore	293
8	Progetto di filtri FIR	297
8.1	Sequenze simmetriche	298
8.1.1	Classificazione delle sequenze a fase lineare	300
8.2	Relazione tra frequenze analogiche e numeriche	306
8.3	Progetto di filtri FIR mediante tecniche a finestra	307
8.3.1	Considerazioni preliminari	308
8.3.2	Scelta della finestra di troncamento	314
8.3.3	Finestra di Kaiser	316
8.3.4	Progetto di filtri FIR con la tecnica a finestre	318
8.4	Tecnica del campionamento della risposta in frequenza	321
8.5	Progetto di filtri FIR ottimi	327
8.5.1	Stima del numero dei coefficienti	332
8.5.2	Algoritmo di Parks e McClellan	333
8.5.3	Cenni ad altre tecniche di progetto	337
8.6	Filtri FIR a mezza-banda	337
8.7	Trasformatore di Hilbert	340
8.8	Filtri FIR derivatori	342
8.9	Confronto tra filtri FIR e IIR	343
8.10	Cenni sulle tecniche di filtraggio adattativo	344
8.10.1	Filtraggio adattativo: l'algoritmo dei minimi quadrati	345
8.10.2	Modellizzazione di un sistema LTI incognito	348
8.10.3	Eliminazione dell'interferenza a banda stretta in un segnale a banda larga	348

9	Realizzazione di sistemi LTI a tempo discreto	351
9.1	Considerazioni preliminari	352
9.2	Realizzazioni circuitali di sistemi LTI di tipo FIR	353
9.2.1	Realizzazioni dirette	353
9.2.2	Realizzazione in cascata	355
9.2.3	Realizzazione lattice	357
9.2.4	Realizzazione di filtri FIR basata sulla tecnica del campionamento in frequenza	361
9.3	Realizzazioni circuitali di sistemi LTI di tipo IIR	363
9.3.1	Realizzazione diretta	363
9.3.2	Realizzazione in cascata	365
9.3.3	Realizzazione parallela	366
9.3.4	Realizzazione lattice	367
9.4	Realizzazione polifase	368
9.5	Effetti della rappresentazione finita dei numeri	371
9.5.1	Considerazioni preliminari	371
9.5.2	Rappresentazione in virgola fissa	373
9.5.3	Rappresentazione in virgola mobile	378
9.6	Tecniche di quantizzazione di dati	379
9.6.1	Effetti della quantizzazione su numeri espressi in virgola fissa	379
9.6.2	Effetti della quantizzazione su numeri espressi in virgola mobile	382
9.7	Effetti della quantizzazione in un sistema LTI su dati espressi in virgola fissa	383
9.7.1	Cicli limite in sistemi LTI ricorsivi	388
9.7.2	Normalizzazione delle ampiezze della sequenza di ingresso	389
9.8	Quantizzazione dei coefficienti di un sistema LTI	392
9.8.1	Sensibilità della risposta in frequenza dei sistemi LTI di tipo IIR	395
9.8.2	Sensibilità della risposta in frequenza di sistemi LTI di tipo FIR	397
10	Elaborazione multirate dei segnali a tempo discreto	401
10.1	Operazioni di decimazione e di interpolazione	402
10.1.1	Incremento del passo temporale: l'interpolazione	402
10.1.2	Riduzione del passo temporale: la decimazione	406
10.2	Cambiamento frazionario del passo temporale	412
10.3	Relazioni di equivalenza	414
10.4	Architetture di sistemi LTI multirate	415
10.5	Banco di filtri QMF	423
A	Sviluppo in serie di Fourier	425
A.1	Concetti basilari	425
B	Trasformate di Fourier	429
B.1	Introduzione	429
B.2	Trasformata di Fourier di segnali periodici	433
B.3	Concetto di banda di segnali analogici	433

C	Inversione della trasformata zeta con espansione in fratti semplici	435
D	Formulario	437
D.1	Espansioni in serie	437
D.2	Proprietà delle funzioni logaritmiche ed esponenziali	438
D.3	Fattorizzazioni principali di polinomi	439
D.4	Relazioni trigonometriche	439
D.5	Principali serie di funzioni e serie numeriche	441
	Acronimi	443
	Bibliografia	445
	Indice Analitico	449