

Indice

Prefazione

1 Gli scenari dell'Audio Digitale

1.1 Introduzione	1
1.1.1 L'Audio Digitale nella riproduzione acustica	3
1.1.2 L'Audio Digitale nella realtà virtuale	5
1.2 Il mixer digitale e lo studio di registrazione	7
1.2.1 Percorso del segnale nel mixer digitale	10
1.3 Sistemi di trasmissione digitali	13
1.3.1 I formati compressi	13
1.3.2 <i>Digital Audio Broadcasting</i> terrestre e satellitare	14
1.4 Componenti digitali per la riproduzione domestica	17
1.5 Qualità del segnale audio e realismo spaziale	20
Bibliografia	22

2 Fondamenti di acustica

2.1 Introduzione	25
2.2 Sistema vibrante in una dimensione	25
2.2.1 Moto armonico semplice	26

2.2.2 Moto armonico smorzato	28
2.2.3 Energia potenziale e cinetica	30
2.2.4 Fasori legati alle grandezze x , v , a	31
2.3 Sistemi oscillanti di altra natura	32
2.3.1 Risonatore di Helmholtz	32
2.3.2 Analogia con i circuiti elettrici	33
2.3.3 Combinazioni masse molle: oscillazioni trasversali e longitudinali	37
2.4 Oscillazioni forzate	38
2.4.1 Funzione di trasferimento e risposta in frequenza	39
2.4.2 Risposta transitoria e permanente	41
2.4.3 Risposta a regime sinusoidale e impedenza	41
2.4.4 Calcolo della risposta completa	43
2.4.5 Modi normali di oscillatori a due masse	44
2.5 Semplice sistema oscillante non lineare	45
2.6 Sistemi continui vibranti	47
2.6.1 Equazione d'onda di una corda	48
2.6.2 Soluzione dell'equazione d'onda di una corda	49
2.6.3 Tempo e spazio	51
2.6.4 Impedenza d'ingresso della corda	52
2.6.5 Corda vincolata agli estremi	54
2.6.6 Onde stazionarie e modi di vibrazione	55
2.6.7 Vibrazione di corde e scale musicali	59
2.6.8 La vibrazione di membrane	63
2.7 Onde sonore in aria	65
2.7.1 Equazione dell'onda piana	65
2.7.2 Onde sferiche	68
2.7.3 Impedenza acustica caratteristica e impedenza acustica	68
2.7.4 Impedenze acustiche a costanti concentrate	71
2.7.5 Grandezze acustiche	72
2.8 Effetti legati alla propagazione: rifrazione, diffrazione ed effetto Doppler	74
2.8.1 Rifrazione	74
2.8.2 Diffrazione	75
2.8.3 Effetto Doppler	77

Bibliografia	78
3 Il modello dell'ascoltatore	
3.1 Introduzione	79
3.2 L'organo dell'udito	79
3.2.1 Orecchio esterno	79
3.2.2 Orecchio medio	80
3.2.3 Orecchio interno	81
3.3 Principi di psicoacustica	82
3.3.1 La percezione dei suoni puri	84
3.3.2 Modello approssimato della soglia assoluta di udibilità	84
3.3.3 La percezione dei suoni complessi	85
3.3.4 Le bande critiche	86
3.3.5 Mascheramento	91
3.3.6 Modello percettivo e fisico del sistema uditivo	94
3.3.7 Aspetti temporali del mascheramento	96
3.4 Modelli posizionali 2D	100
3.4.1 La teoria Duplex	100
3.4.2 Il cono di confusione	103
3.5 Modelli posizionali 3D	105
3.5.1 Le <i>Head Related Transfer Functions</i> (HRTF)	105
3.5.2 Rappresentazioni delle HRIR e delle HRTF	107
3.5.3 Misura delle HRTF	111
3.5.4 Stima della risposta impulsiva	114
3.5.5 Modelli posizionali approssimati	116
Bibliografia	118
4 Il modello dell'ambiente di ascolto	
4.1 Introduzione	123
4.2 I modi naturali di una sala	123
4.3 Il riverbero	124
4.3.1 Il tempo di riverberazione T_{60}	127

4.3.2 Il tempo di riverberazione ottimale	128
4.3.3 La distanza di riverberazione	130
4.3.4 La correzione acustica dell'ambiente di ascolto	130
4.4 Calcolo e misura della risposta impulsiva della sala	134
4.4.1 Metodo delle immagini	134
4.4.2 Metodo <i>ray tracing</i>	138
4.4.3 Sorgenti sonore in movimento	140
4.4.4 Misura della risposta impulsiva della sala	141
Bibliografia	143
5 Quantizzazione del segnale audio	
5.1 Introduzione	145
5.2 Teoremi di quantizzazione di Widrow	146
5.2.1 Quantizzazione come campionamento della funzione di densità di probabilità (pdf)	147
5.2.2 La pdf dell'uscita quantizzata	152
5.2.3 La statistica del rumore di quantizzazione	153
5.2.4 Pseudorumore di quantizzazione	155
5.2.5 Calcolo del rapporto segnale rumore di quantizzazione	155
5.3 Trattamento del rumore di quantizzazione: <i>dither</i> e <i>noise spectrum shaping</i>	156
5.3.1 Il <i>dither</i>	157
5.3.2 Il <i>noise spectrum shaping</i>	159
5.3.3 <i>Noise spectrum shaping</i> e <i>dither</i>	162
5.4 Rappresentazione numerica	162
5.4.1 Rappresentazione numerica <i>fixed-point</i> (FX)	162
5.4.2 Rappresentazione numerica <i>floating-point</i> (FL)	164
5.4.3 Rumore di quantizzazione nella rappresentazione <i>floating-point</i>	166
5.4.4 SNR e range dinamico	169
5.5 Effetti della quantizzazione in circuiti TD	170
5.5.1 Effetti della quantizzazione nelle operazioni di somma e moltiplicazione	171
5.5.2 Effetto del rumore di quantizzazione sui filtri FIR	173
5.5.3 <i>Roundoff noise</i> su filtri IIR	175

5.5.4 RN <i>floating-point</i> su filtri IIR	177
5.5.5 I cicli limite	178
5.5.6 Oscillazioni da <i>overflow</i>	179
5.5.7 Distorsioni di linearità dovute alla quantizzazione	180
5.5.8 Approccio spazio di stato per la implementazione di filtri a basso rumore	182
5.5.9 Considerazioni implementative	183
Bibliografia	184
6 Filtri numerici per l'audio	
6.1 Introduzione	187
6.1.1 Filtri FIR	187
6.1.2 Filtri IIR	189
6.2 Filtri per l'audio	189
6.2.1 Classificazione di filtri per l'audio	190
6.2.2 Funzione di trasferimento di filtri passa/arresta-banda	191
6.2.3 Funzione di trasferimento di filtri shelving	192
6.2.4 Definizione di larghezza di banda	196
6.2.5 Banci filtri a Q costante	200
6.2.6 Filtraggio ed equalizzazione digitale del segnale audio	203
6.3 Equalizzatori numerici IIR	207
6.3.1 Progetto del filtro IIR del II ordine da un prototipo analogico	207
6.3.2 Equalizzatore del II ordine di Bristow-Johnson	209
6.3.3 Equalizzatore di Orfanidis	214
6.3.4 Equalizzatore di Clark- Ifeachor-Rogers-Van Eetvelt	216
6.4 Strutture robuste per la realizzazione di filtri audio IIR	219
6.4.1 Limiti delle Forme Dirette	219
6.4.2 Decomposizione all-pass	220
6.4.3 Strutture a scala e a traliccio	221
6.4.4 Proprietà delle strutture <i>lattice</i> o <i>ladder</i> normalizzate	222
6.4.5 Filtri a controllo ortogonale: equalizzatore di Regalia-Mitra	224
6.4.6 Risposta boost e cut simmetrica	229
6.4.7 Forma spazio di stato a controllo ortogonale	232
6.4.8 Mapping di FdT su strutture robuste	234

6.5 Filtri non ricorsivi per l'audio	235
6.5.1 Implementazioni veloci di filtri numerici FIR	235
6.6 Metodi <i>multirate</i>: decimazione e interpolazione	237
6.6.1 Decimazione	237
6.6.2 Interpolazione	239
6.6.3 Conversione di frequenza di campionamento frazionaria con rapporto razionale	241
6.6.4 Conversione di frequenza di campionamento con rapporto irrazionale	242
6.7 Banchi filtri	243
6.7.1 Banco filtri uniforme QMF	245
6.7.2 Sintesi in frequenza: fattorizzazione spettrale	248
6.7.3 Sintesi nel dominio del tempo	250
6.7.4 Banchi filtri FIR a coseno modulato	253
6.7.5 Banchi filtri a spaziatura non uniforme	255
Bibliografia	256
7 Filtri “a pettine”, linee di ritardo e oscillatori digitali	
7.1 Introduzione	259
7.2 Filtri comb	259
7.2.1 Filtri comb FIR	259
7.2.2 Filtri comb IIR	261
7.3 Filtri all-pass	263
7.3.1 Filtri all-pass innestati	265
7.4 Linee di ritardo	267
7.4.1 Linee di ritardo con buffer circolare	269
7.4.2 Linee di ritardo e filtri all-pass innestati	272
7.5 Linee con ritardo frazionario	273
7.5.1 Formulazione del problema e soluzione ideale	274
7.5.2 Soluzione approssimata FIR	275
7.5.3 Soluzione approssimata con filtro all-pass	277
7.5.4 Interpolazione polinomiale e spline	279
7.5.5 Linee di ritardo tempo varianti	289

7.6 Filtro comb multidimensionale: <i>Feedback Delay Networks</i>	291
7.6.1 Descrizione spazio di stato e stabilità	292
7.7 Oscillatori numerici	293
7.7.1 Oscillatori sinusoidali	293
7.7.2 Oscillatori <i>wavetable</i>	295
Bibliografia	296
8 Circuiti e algoritmi per la modellazione fisica	
8.1 Introduzione	299
8.1.1 Approccio locale e globale	300
8.1.2 Modelli strutturali, funzionali e interconnessioni	301
8.1.3 Approccio locale con modello circuitale	302
8.1.4 Connessione di elementi lineari e non lineari, concentrati e distribuiti	303
8.2 Filtri d'onda numerici	304
8.2.1 Rappresentazione dei circuiti TC con grandezze d'onda <i>A</i> e <i>B</i>	306
8.2.2 Relazioni costitutive di elementi circuitali TC mappate TD	307
8.2.3 Connessione di elementi circuitali TD	311
8.2.4 Realizzazione di filtri TD	314
8.3 Teoria delle guide d'onda digitali	317
8.3.1 Guide d'onda digitali con perdite	319
8.3.2 Guide d'onda digitali terminate	321
8.3.3 Grandezze d'onda alternative e normalizzate	323
8.3.4 Connessione di guide d'onda numeriche	324
8.4 Modellazione alle differenze finite	331
8.5 Filtri d'onda non lineari e DW su carichi non lineari	334
8.5.1 Mappaggio di elementi non lineari senza memoria: resistori non lineari	335
8.5.2 Mappaggio di elementi non lineari con memoria: condensatori e induttori non lineari	336
8.5.3 Adattamento di impedenza con giunzione di diffusione	338
8.6 Metodi per la modellazione mista	339
Bibliografia	341

9 Effetti audio

9.1 Introduzione	345
9.2 La simulazione dell'ambiente di ascolto	346
9.2.1 Modellazione fisica o approccio percettivo?	347
9.3 Il riverberatore artificiale di Schroeder	349
9.3.1 Il primo modello di Schroeder	349
9.3.2 Il modello di Schroeder-Moorer	351
9.3.3 Il modello di Moorer dipendente dalla frequenza	351
9.3.4 Scelta dei parametri del riverberatore	355
9.4 La qualità del riverbero artificiale	356
9.4.1 Curve di decadimento energetico	357
9.4.2 Caratterizzazione della radiazione diffusa	362
9.4.3 Riverberatore con all-pass innestati	362
9.4.4 Caratterizzazione delle prime riflessioni	362
9.5 Modello di riverbero con <i>Feedback Delay Networks</i>	364
9.5.1 Modello di Stautner e Puckette	365
9.5.2 Modello di Jot e Chainge	367
9.5.3 Scelta della matrice di feedback	369
9.5.4 Altri modelli	372
9.6 Modelli di riverberatori con guide d'onda digitali	373
9.6.1 Modellazione fisica con reti di guide d'onda digitali	374
9.6.2 Topologie DWN	375
9.7 Il trattamento dinamico del segnale audio	377
9.7.1 Curve statiche del DRC	378
9.7.2 Controllo dinamico del guadagno	382
9.7.3 Calcolo del livello del segnale	385
9.7.4 Considerazioni costruttive del DRC	387
9.7.5 DRC con approccio multibanda	392
9.7.6 Principali applicazioni	394
9.8 Effetti basati su linee di ritardo tempo varianti frazionarie	397
9.8.1 La modulazione angolare con TV-FDL e il vibrato	397
9.8.2 Il <i>Flanging</i>	402
9.8.3 Il <i>Chorus</i>	405

9.8.4 Il <i>Phasing</i>	407
9.8.5 Sistemi di amplificazione con altoparlanti rotanti (Leslie)	408
9.9 Effetti basati sulle trasformazioni tempo-frequenza	415
9.9.1 La traslazione in frequenza e compressione/espansione della scala dei tempi: caso lineare e stazionario	416
9.9.2 Classificazione degli algoritmi TTF	418
9.9.3 Algoritmi TTF operanti nel dominio del tempo	420
9.9.4 Algoritmi operanti nel dominio tempo-frequenza	430
Bibliografia	433
10 Audio 3D	
10.1 Introduzione	439
10.2 Audio 3D con schiere di altoparlanti	441
10.2.1 Formalizzazione del problema	441
10.2.2 <i>Panning</i> di ampiezza 2D	444
10.2.3 <i>Panning</i> vettoriale di ampiezza 3D	446
10.2.4 Effetto di precedenza	449
10.2.5 La percezione della distanza	451
10.2.6 Sistemi per l'allargamento del fronte stereofonico	452
10.3 Ricostruzione del campo acustico con schiere di altoparlanti	456
10.3.1 Sistema olofonico	457
10.3.2 Il metodo <i>Ambisonic</i>	462
10.3.3 Errore di ricostruzione del campo	471
10.4 Ripresa microfonica per i sistemi audio 2D e 3D	472
10.4.1 Caratteristiche direzionali dei microfoni	473
10.4.2 Metodi classici di ripresa microfonica	474
10.4.3 Array microfonici	477
10.4.4 Tecnica di ripresa e microfoni per <i>Ambisonic</i> : array "quasi" coincidente	479
10.4.5 Array coincidente del secondo ordine	483
10.4.6 Array sferico: <i>High Order Ambisonic</i>	484
10.4.7 Tecnica di ripresa e restituzione per il sistema olofonico	485
10.5 Sintesi del fronte d'onda	486
10.5.1 Sviluppo teorico della WFS	488

10.5.2 Auralizzazione con WFS	490
10.6 Audio 3D binaurale	490
10.6.1 Audio 3D in cuffia	491
10.6.2 Audio 3D con coppia di altoparlanti e HRTF: cancellazione della distorsione di <i>crosstalk</i>	492
10.6.3 Interpolazione delle HRTF approssimate a fase minima	495
10.6.4 Cancellazione della distorsione di <i>crosstalk</i> con tecniche adattative	497
10.6.5 Limite delle tecniche adattative in campo audio: funzione di coerenza	500
Bibliografia	504
11 La sintesi del suono	
11.1 Introduzione	509
11.2 Sintesi da suono registrato	511
11.2.1 Strumenti a campionamento	512
11.2.2 Sintetizzatore <i>wavetable</i>	519
11.2.3 Sintesi granulare	530
11.2.4 Modelli WS ibridi	530
11.3 Rappresentazione spettrale del segnale	531
11.3.1 Sintesi additiva	531
11.3.2 La sintesi sottrattiva	534
11.4 Algoritmi astratti	536
11.4.1 La sintesi a Modulazione di Frequenza	536
11.4.2 La sintesi per distorsione non lineare	541
11.4.3 Algoritmo di Karplus-Strong	546
11.5 Modellazione fisica	548
11.5.1 Introduzione	548
11.5.2 Modelli fisici, matematici e computazionali	548
11.5.3 Modello della corda vibrante	550
11.5.4 Corda vibrante eccitata	552
11.5.5 La modellazione degli strumenti a fiato	556
11.5.6 Modellazione fisica dei legni	574
11.5.7 La modellazione fisica degli ottoni	578

11.5.8	La sintesi commutata	585
11.5.9	Strumenti ad arco	588
11.5.10	Chitarra	598
11.5.11	Pianoforte	600
	Bibliografia	605
	Indice analitico	611