

Joseph D'Appolito

**MISURARE
GLI
ALTOPARLANTI**



TITOLO ORIGINALE

Testing Loudspeakers

First Edition 1998 Copyright © 1998 by Joseph D'Appolito

Traduzione:

Mauro Bigi

Massimo Costa

Maurizio Jacchia

Giuseppe Pucacco

Impaginazione: Roberto Bigi, Gionatan Corso

© Copyright 1998 by Audio Amateur, Inc. Peterborough NH 03458 USA. All rights reserved.

Per l'Italia:

Audiomatica SRL

Via Manfredi 12

50136 FIRENZE

ITALY

Tel: +39-0556599036

Fax: +39-0556503772

e-mail: info@audiomatica.com

web: www.audiomatica.com

Prima edizione: febbraio 2008

Seconda edizione: giugno 2009

Terza edizione: settembre 2022

ISBN 978-88-900543-1-0

Finito di stampare nel mese di settembre dell'anno 2022

Stampato in Italia - Printed in Italy

DEDICA

Questo libro è affettuosamente dedicato alle donne della mia vita: mia moglie, Ligia, le mie figlie, Daniela e Tina e le mie nipoti, Emma ed Isabella. Il loro amore e conforto ma specialmente il loro entusiasmo per questo libro mi ha aiutato durante le lunghe ore della stesura e le frequenti pause che sono parte della creazione di un'opera come questa.

RINGRAZIAMENTI

Qualunque sia il successo di cui questo libro godrà, esso sarà dovuto, per una parte non piccola, agli innumerevoli sforzi di Richard (“Dick”) Campbell, professore, socio di Audio Engineering Society, presidente della società di consulenza da lui fondata. Dick ha letto le bozze di tutti i capitoli evidenziando molte imprecisioni e proponendo numerosi suggerimenti atti a migliorarne il contenuto. La sua tempestiva risposta, ad ogni capitolo che gli veniva sottoposto, ha permesso di ridurre sensibilmente i tempi tecnici tra la realizzazione e la pubblicazione del libro.

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE A 'MISURARE GLI ALTOPARLANTI'	1
1.1 PERCHÉ SCRIVERE UN LIBRO SULLA MISURAZIONE DEGLI ALTOPARLANTI?	1
1.2 QUALI ARGOMENTI COPRIRE?	1
1.3 COSA DOVRESTE CONOSCERE PER OTTENERE IL MASSIMO DA QUESTO LIBRO?	1
1.4 IL LIBRO IN BREVE	1
1.4.1 CAPITOLO 2: CONCETTI E MISURE DI BASE SU ALTOPARLANTI	1
1.4.2 CAPITOLO 3: MISURE ELETTRICHE DI IMPEDENZA A BASSA FREQUENZA	2
1.4.3 CAPITOLO 4: TEST ACUSTICI DI SINGOLI ALTOPARLANTI	2
1.4.4 CAPITOLO 5: MISURE ACUSTICHE SU SISTEMI DI ALTOPARLANTI	3
1.4.5 CAPITOLO 6: TEMPO, FREQUENZA E LA TRASFORMATATA DI FOURIER	3
1.4.6 CAPITOLO 7: TEST DI ALTOPARLANTI CON SISTEMI DI MISURA BASATI SU PC	4
BIBLIOGRAFIA	5
2 CONCETTI E MISURE DI BASE SU ALTOPARLANTI	7
2.0 INTRODUZIONE	7
2.1 CENNI STORICI	7
2.2 I PARAMETRI DI THIELE/SMALL	8
2.3 LA CURVA DI IMPEDENZA	9
2.4 UN SEMPLICE MODELLO DELL'ALTOPARLANTE	9
2.4.1 MODELLO DELLA COMPONENTE MECCANICA	9
2.4.2 IL SISTEMA A REGIME	10
2.4.3 COS'È QUESTO OGGETTO CHIAMATO Q?	11
2.4.4 MODELLO DELLA PARTE ELETTRICA	12
2.4.5 LA CURVA DI IMPEDENZA DELL'ALTOPARLANTE	12
2.5 UN PO' DI PIÙ SUI PARAMETRI T/S	14
2.5.1 FORZA CONTRO ELETTROMOTRICE, SMORZAMENTO ELETTRICO E QES	14
2.5.2 EFFETTO MOLLA DELL'ARIA, CEDEVOLEZZA MECCANICA E VAS	14
2.6 COME DETERMINARE I PARAMETRI T/S FONDAMENTALI DALLA CURVA DI IMPEDENZA	15
2.6.1 PRELIMINARI PER IL TEST	15
2.6.2 LA TECNICA DEL PARTITORE DI TENSIONE	16
2.6.2.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL PARTITORE DI TENSIONE	16
2.6.2.2 MISURARE FSA E QTS CON IL METODO DEL PARTITORE	16
2.6.2.3 UN ESEMPIO CON PARTITORE DI TENSIONE	17
2.6.2.4 AMMONIMENTI, TRAPPOLE E RIMEDI	17
2.6.3 LA PROCEDURA A TENSIONE COSTANTE	21
2.6.3.1 UN ESEMPIO CON TENSIONE COSTANTE	22
2.6.3.2 PARAMETRI DELL'ALTOPARLANTE IN FUNZIONE DELLA POTENZA DI INGRESSO	23
2.6.3.3 AMMONIMENTI, TRAPPOLE E RIMEDI	23
2.6.4 LA PROCEDURA A VERA CORRENTE COSTANTE	23
2.6.4.1 LA PROCEDURA "CORRENTE COSTANTE"	24
2.6.4.2 UN ESEMPIO A CORRENTE COSTANTE	24
2.6.5 VANTAGGI RELATIVI DELLE TRE PROCEDURE PER LA MISURA DI FSA E Q	25
2.7 MISURA DEL VAS	25
2.7.1 LA PROCEDURA ARIA LIBERA / BOX CHIUSO	25
2.7.1.1 UN ESEMPIO DI MISURA DEL VAS	26
2.7.1.2 DISCUSSIONE	27
2.7.2 LA TECNICA DELLA MASSA AGGIUNTA	27
2.7.2.1 UN ESEMPIO DI TECNICA CON MASSA AGGIUNTA	28
2.7.2.2 DISCUSSIONE SULLA TECNICA DELLA MASSA AGGIUNTA	28
2.7.3 PARAGONE FRA LE TECNICHE MASSA AGGIUNTA E BOX CHIUSO PER LA DETERMINAZIONE DEL VAS	28
2.8 I RIMANENTI PARAMETRI DI T/S	28
2.8.1 CALCOLO DELLA MASSA DEL CONO	28
2.8.2 CALCOLO DEL PRODOTTO BL	29
2.8.3 EFFICIENZA E SENSIBILITÀ	29
2.8.4 MISURA DELL'INDUTTANZA DELLA BOBINA MOBILE	30
2.9 PARAMETRI T/S DI MIDRANGE E TWEETER	32
2.10 RIASSUNTO	32
BIBLIOGRAFIA	32
APPENDICE A	33
APPENDICE B	34
3 MISURE ELETTRICHE DI IMPEDENZA A BASSA FREQUENZA	35
3.0 INTRODUZIONE	35
3.1 DETERMINAZIONE DI FSB	35

3.1.1 CARICO DEL BAFFLE INFINITO	35
3.1.2 CARICO DELLA CASSA	35
3.2 ALTOPARLANTI IN BOX CHIUSO	37
3.3 MISURA DEGLI EFFETTI DELL'ASSORBENTE ACUSTICO	39
3.4 ALTOPARLANTE IN BOX CON SINGOLA APERTURA (BASS-REFLEX)	42
3.5 UNO SGUARDO EMPIRICO ALL'IMPEDENZA DELLE LINEE DI TRASMISSIONE	45
3.6 ANOMALIE NELLA CURVA DI IMPEDENZA	45
3.6.1 ESEMPIO NO. 1	46
3.6.2 ESEMPIO NO. 2	46
3.6.3 ESEMPIO NO. 3	46
3.6.4 ESEMPIO NO. 4	47
3.6.5 DISCUSSIONE	47
BIBLIOGRAFIA	47
4 TEST ACUSTICI DI SINGOLI ALTOPARLANTI	49
4.0 INTRODUZIONE	49
4.1 IL DIAGRAMMA RISPOSTA IN FREQUENZA	49
4.2 MICROFONI PER LE MISURE DI ALTOPARLANTI	50
4.2.1 CLASSIFICAZIONE DEI MICROFONI	51
4.2.1.1 MICROFONI DINAMICI	51
4.2.1.2 MICROFONI A CONDENSATORE	51
4.2.2 QUALE MICROFONO USARE?	52
4.3 L'AMBIENTE ACUSTICO E I SUOI EFFETTI SULLA RISPOSTA IN FREQUENZA	52
4.3.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI AMBIENTI ACUSTICI	53
4.3.2 MISURE DI SISTEMI DI ALTOPARLANTI IN AMBIENTI SEMI-RIVERBERANTI	53
4.4 TECNICHE DI MISURA DEGLI ALTOPARLANTI E SEGNALI DI PROVA	59
4.4.1 IL CAMPO LONTANO	60
4.4.2 IL CAMPO VICINO	60
4.4.3 COMBINARE LE RISPOSTE IN CAMPO VICINO E CAMPO LONTANO	61
4.4.4 MISURE A TERRA	62
4.5 SMOOTHING ANALOGICO DELLE CURVE DI RISPOSTA IN FREQUENZA	64
4.5.1 FILTRI PASSABANDA, RUMORE ROSA E L'RTA	64
4.5.2 IL VOBULATORE	67
4.6 DUE ESEMPI	68
4.6.1 LA SCELTA DELLE FREQUENZE DI INCROCIO	68
4.6.2 RISPOSTE IN CAMPO VICINO DI UN SISTEMA A CONDOTTO	69
4.7 COMMENTI FINALI	69
BIBLIOGRAFIA	70
APPENDICE A	70
5 MISURE ACUSTICHE SU SISTEMI DI ALTOPARLANTI.....	71
5.0 INTRODUZIONE	71
5.1 INTEGRAZIONE DEGLI ALTOPARLANTI NEL SISTEMA	71
5.2 ANCORA SULLE RIFLESSIONI	72
5.3 ESEMPIO DI SISTEMI A DUE VIE	73
5.3.1 ESEMPIO 5.1: UN SATELLITE A DUE VIE IN SOSPENSIONE PNEUMATICA	73
5.3.2 ESEMPIO 5.2: UN SISTEMA A BASS-REFLEX DUE VIE	76
5.3.2.1 RISPOSTA SULL'ASSE	76
5.3.2.2 RISPOSTA POLARE	78
5.3.3 ESEMPIO 5.3: UN SISTEMA MTM DUE VIE, A TRE ALTOPARLANTI 5,6,7	80
5.3.3.1 RISPOSTA SULL'ASSE	80
5.3.3.2 RISPOSTA POLARE	82
5.3.3.3 RISPOSTA POLARE VERTICALE E RETI DI CROSSOVER A BASSA PENDENZA	82
5.4 ESEMPIO 5.4: UN SISTEMA A TRE VIE, TRE ALTOPARLANTI	83
5.5 ESEMPIO 5.5: UN SISTEMA A DUE VIE CON UN ALTOPARLANTE A NASTRO	84
5.6 ESEMPIO 5.6: UN SUBWOOFER DA 12"	87
5.6.1 RISPOSTA IN POTENZA DEL SUBWOOFER	88
5.7 SOMMARIO	88
BIBLIOGRAFIA:	89
6 TEMPO, FREQUENZA E LA TRASFORMATTA DI FOURIER	91
6.0 INTRODUZIONE	91
6.1 LA RISPOSTA ALL'IMPULSO	92
6.2 SEGNALI PERIODICI E LA SERIE DI FOURIER	93
6.2.1 SEGNALI PERIODICI	93
6.2.2 LA SERIE DI FOURIER	94
6.2.2.1 LA FORMA GENERALE DELLA SERIE DI FOURIER	94
6.2.2.2 LA SERIE DI FOURIER DI UN'ONDA QUADRA	95
6.2.2.3 LA SERIE DI FOURIER ED IL DOMINIO DELLA FREQUENZA	96

6.3 IL CAMPIONAMENTO ED IL TEOREMA DEL CAMPIONAMENTO	97
6.3.1 IL PROCESSO DI CAMPIONAMENTO	97
6.3.2 IL TEOREMA DEL CAMPIONAMENTO E LE IMMAGINI	97
6.3.2.1 IL TEOREMA DEL CAMPIONAMENTO	97
6.3.2.2 LE IMMAGINI ED IL FILTRO ANTI-IMMAGINI "ALIASING"	99
6.4 LA SERIE DI FOURIER DISCRETA	99
6.4.1 LA TRASFORMATATA DI FOURIER DISCRETA	99
6.4.1.1 VALUTAZIONE DEI COEFFICIENTI C_k E g_k	100
6.4.1.2 ESEMPIO 6.1	101
6.4.2 PERDITE E FINESTRE	101
6.4.2.1 ESEMPIO 6.2: PERDITE SPETTRALI	101
6.4.2.2 LA FFT VISTA COME UN BANCO DI FILTRI	102
6.4.2.3 RIDURRE LE PERDITE CON DELLE FINESTRE DATI	103
6.5 LA FFT DELLA RISPOSTA ALL'IMPULSO	104
6.5.1 ESEMPIO 6.3: FFT DELLA RISPOSTA ALL'IMPULSO DEL SISTEMA MOLLA-MASSA	104
6.5.2 ESEMPIO 6.4: FINESTRARE LA RISPOSTA ALL'IMPULSO	105
6.5.3 ESEMPIO 6.5: RIEMPIMENTO DI ZERI	106
6.6 UN MODO PRATICO PER MISURARE LA RISPOSTA ALL'IMPULSO	106
6.6.1 ESEMPIO 6.6: AUTOCORRELAZIONE E CROSS-CORRELAZIONE CON SEGNALI MLS	107
6.7 TEMPO IN CONTRAPPOSIZIONE A FASE	108
6.7.1 LA FASE E LE SINUSOIDI	108
6.7.2 LA RISPOSTA IN FASE E LA MISURA DELLA FASE	109
6.7.3 SISTEMI A FASE MINIMA	110
6.7.4 RITARDO E FASE LINEARE	111
6.7.5 RITARDO DI GRUPPO	111
6.8 DETERMINAZIONE DEL CENTRO ACUSTICO DI UN ALTOPARLANTE	112
6.8.1 ESEMPIO 6.7: DETERMINAZIONE DEL CENTRO DI FASE ACUSTICA DI UN ALTOPARLANTE ...	113
BIBLIOGRAFIA	114
7 TEST DI ALTOPARLANTI CON SISTEMI DI MISURA BASATI SU PC	115
7.0 INTRODUZIONE	115
7.1 I SISTEMI MLSSA E CLIO	115
7.1.1 MLSSA	115
7.1.2 IL SISTEMA CLIO	116
7.1.3 LA CALIBRAZIONE DI MLSSA E CLIO	116
7.2 MISURE DI IMPEDENZA E DI INDUTTANZA/CAPACITÀ	117
7.2.1 CENNI ULTERIORI SULLA TECNICA DEL PARTITORE DI TENSIONE	117
7.2.2 LA MISURA DELL'IMPEDENZA CON CLIO E MLSSA	118
7.2.3 MISURE DI INDUTTANZA E CAPACITÀ	118
7.2.4 LA MISURA DELL'IMPEDENZA CON SEGNALI DI PILOTAGGIO DI ALTO LIVELLO	121
7.3 LA MISURA DEI PARAMETRI DI THIELE/SMALL	121
7.3.1 IL METODO DEI 'TRE PUNTI' ED IL METODO DEL MODELLO ADATTATO	121
7.3.2 LA MISURA DEI PARAMETRI DI T/S CON CLIO	122
7.3.3 LA MISURA DEI PARAMETRI DI T/S CON MLSSA	122
7.4 MISURE PER LA PROGETTAZIONE E L'ANALISI DI SISTEMI DI ALTOPARLANTI	124
7.4.1 RISPOSTA ANECOICA SIMULATA DI SINGOLI ALTOPARLANTI E SISTEMI COMPLETI	124
7.4.2 LA CURVA ENERGIA NEL TEMPO (ETC)	125
7.4.3 LA RISPOSTA AL GRADINO DEL SISTEMA	126
7.4.4 IL DECADIMENTO SPETTRALE (CSD)	126
7.4.5 LA RISPOSTA IN FREQUENZA E FASE	129
7.5 LA MISURA DI SISTEMI DI ALTOPARLANTI	129
7.6 MISURE DI VALUTAZIONE ED ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEI SISTEMI DI ALTOPARLANTI	133
7.6.1 ALCUNE CONSIDERAZIONI SUI FILTRI PASSA TUTTO	137
7.7 ALCUNI ULTERIORI ED INTERESSANTI ESEMPI	137
7.7.1 UN ULTERIORE SGUARDO ALLA LINEA DI TRASMISSIONE	137
7.7.2 ULTERIORI CENNI SULLE PERDITE SPETTRALI E SULL'USO DELLE FINESTRE	138
7.7.3 RISPOSTE CUMULATE SISTEMA DI ALTOPARLANTI/AMBIENTE	139
7.8 CONCLUSIONI	141
BIBLIOGRAFIA	141

INTRODUZIONE A 'MISURARE GLI ALTOPARLANTI'

1.1 PERCHÉ SCRIVERE UN LIBRO SULLA MISURAZIONE DEGLI ALTOPARLANTI?

Non mancano di certo libri ed articoli sul progetto e la costruzione di sistemi di altoparlanti. Si va da articoli di 'fai da te' in riviste per hobbisti, a libri come il Loudspeaker Design Cookbook (LDC)¹, ad articoli scientifici ed ingegneristici su riviste accademiche. Il materiale che riguarda le misure su altoparlanti non è altrettanto corposo né ben organizzato; si trova sparso tra riviste, libri, manuali di prodotto e norme.

Negli articoli sulle riviste i risultati delle misure vengono spesso presentati a supporto dell'argomento principale. In questo caso è raro che le procedure di misura vengano descritte nel dettaglio, ed i limiti di accuratezza della misura non vengono mai discussi. Non esiste attualmente, a mia conoscenza, un testo di base ben organizzato e di riferimento per l'hobbista esperto ed il tecnico. Questo libro cerca di colmare tale lacuna.

1.2 QUALI ARGOMENTI COPRIRE?

Un altoparlante è un complesso trasduttore elettromeccano-acustico. Prende energia elettrica al suo ingresso convertendola in movimento meccanico e generando un'uscita acustica. Capire le misure sugli altoparlanti è quindi un'avventura multidisciplinare che richiede la comprensione di principi di ingegneria elettrica, acustica e meccanica. È necessario avere una notevole cognizione di questi principi al fine di scegliere le misure più appropriate e di interpretarne i risultati in presenza di effetti disturbanti dovuti all'ambiente circostante.

Credo che un libro sulla misurazione degli altoparlanti debba essere più di un semplice approccio sul 'come si fa'. Deve presentare, in modo intuitivo ed interessante, una sufficiente quantità di teoria (supportata con specifici esempi) di ingegneria elettrica, acustica e meccanica. Tutto ciò per permettervi di scegliere i test più appropriati e portarli avanti in maniera da minimizzare gli errori ed ottenere il massimo di informazioni utili.

Per centrare questo obiettivo il libro deve essere didattico. Ho impiegato molto tempo per spiegare la teoria di supporto alla misurazione degli altoparlanti. Vengono presentati molti esempi per chiarire i concetti. Tutti gli esempi derivano da misure vere. Non ci sono esempi meramente accademici. I capitoli contengono moltissime figure e tavole che descrivono esperimenti reali. In molti casi è possibile seguire tutti i risultati intermedi che conducono al risultato finale.

1.3 COSA DOVRESTE CONOSCERE PER OTTENERE IL MASSIMO DA QUESTO LIBRO?

Mi aspetto che siate familiari con i principi base di progettazione dei sistemi di altoparlanti (come spie-

gato in LDC). Ciò include familiarità con i parametri di Thiele/Small per caratterizzare i singoli altoparlanti ed il loro uso nel progetto, a bassa frequenza, di configurazioni in cassa chiusa, reflex, passabanda e linee di trasmissione. Dovreste avere una visione generale dei vari tipi di reti di crossover e del loro uso nei sistemi multivia. Come livello fondamentale dovreste avere chiari i termini tensione, corrente, impedenza, capacità, induttanza, resistenza, frequenza, spostamento, velocità, accelerazione, smorzamento, massa e pressione.

La matematica è inevitabile quando si misurano altoparlanti. Molti test sono quantitativi. Ho cercato di mantenere le equazioni al minimo, ma in molti casi sono il modo migliore per descrivere un principio od un concetto. Non avrete bisogno di nozioni di Calcolo ma di un certo background di Algebra. Dovreste conoscere logaritmi ed esponenziali e saperli usare nelle equazioni. Dovreste infine saper usare un calcolatore per eseguire un logaritmo od una elevazione a potenza.

Oltre questi concetti di base il libro è del tutto autosufficiente. Tutti in concetti ed i principi di ingegneria necessari per capire le misure sugli altoparlanti vengono descritti ed illustrati con esempi.

1.4 IL LIBRO IN BREVE

I Capitoli 2-5 coprono le classiche tecniche analogiche per misurare l'impedenza, i parametri di Thiele/Small, l'allineamento a bassa frequenza e la risposta in frequenza utilizzando strumenti di misura analogici di larga diffusione. I Capitoli 6 e 7 riguardano l'uso, nella misura degli altoparlanti, di sistemi di acquisizione ed analisi di dati basati su PC. Segue un breve sommario di ciascun capitolo.

1.4.1 CAPITOLO 2: CONCETTI E MISURE DI BASE SU ALTOPARLANTI

Il Capitolo 2 inizia con una succinta storia dell'evoluzione del progetto di sistemi di altoparlanti a bassa frequenza con l'invenzione, da parte di Kellogg e Rice, dell'altoparlante a radiazione diretta; continua attraverso le tecniche di sintesi teorizzate negli articoli fondamentali di Thiele, Benson e Small. Si definiscono i parametri di Thiele/Small, che caratterizzano il comportamento a bassa frequenza di un altoparlante, ed il loro significato fisico. Sebbene questi parametri rappresentino completamente il comportamento elettrico, meccanico ed acustico di un altoparlante essi possono essere determinati tramite la misura dell'impedenza del componente. Per fare ciò è sufficiente lavorare dall'ingresso elettrico del trasduttore.

Siccome le curve di impedenza giocano un ruolo così importante nella determinazione dei parametri di T/S, viene sviluppato un modello che serve per spiegare l'andamento della curva di impedenza stessa. Questo sviluppo serve ad introdurre termini come massa del cono, compliance e smorzamento delle sospensioni, induttanza e resistenza della bobina, densità di flusso magnetico e frequenza di risonanza. Ciò conduce ad una definizione precisa di Q. Un paragrafo intero è dedicato alla spiegazione del V_{AS} , la molla di aria equivalente alla compliance dell'altoparlante.

Vengono spiegate tre differenti tecniche di misura

dell'impedenza che consentono la determinazione dei parametri in aria libera. Sono il metodo del partitore di tensione, della corrente costante e della tensione costante. Tutte queste misure possono essere effettuate con apparecchi analogici relativamente semplici, tra cui un oscillatore audio, un millivoltmetro AC a larga banda ed un frequenzimetro. Vengono fornite procedure passo-passo per ciascun metodo; queste sono complete di esempi che illustrano i risultati ottenuti ad ogni passo.

Dei tre approcci, il metodo del partitore è il più semplice, ma anche il meno accurato, nella sua forma non compensata. Viene mostrata una semplice procedura per compensarne gli errori. I molti esempi mostrano che i tre metodi forniscono risultati paragonabili, se propriamente implementati. Vengono dati molti suggerimenti, per ciascun metodo, volti ad evitare errori e massimizzare l'accuratezza delle misure.

1.4.2 CAPITOLO 3: MISURE ELETTRICHE DI IMPEDENZA A BASSA FREQUENZA

In questo capitolo prendo in esame l'impedenza di altoparlanti montati in cassa. Le curve di impedenza di altoparlanti in cassa chiusa e reflex sono usate per determinare parametri come la frequenza/e di risonanza del sistema, lo smorzamento ed il Q del mobile, efficienza del sistema, e gli effetti del materiale assorbente posto all'interno del mobile.

Il capitolo inizia con una discussione teorica del carico di massa sul cono che interviene se l'altoparlante viene montato su un pannello di grandi dimensioni oppure in cassa. Questo carico causa uno spostamento in basso della frequenza di risonanza dell'altoparlante. Viene presentata quindi la curva di impedenza di un altoparlante montato in cassa chiusa insieme alle procedure per misurare il carico di massa, l'abbassamento della frequenza di risonanza, la frequenza di risonanza del sistema altoparlante/cassa ed il rapporto di compliance, α , ed il Qs di sistema meccanico ed elettrico. Le procedure sono illustrate da un esempio reale ed i risultati vengono paragonati con le precedenti previsioni teoriche.

Vengono successivamente spiegati gli effetti del materiale assorbente in termini di dinamica dei gas. Si mostra come materiali assorbenti tipo la lana di vetro o il Dacron aumentino il volume effettivo del mobile, aumentino il carico di massa sul cono, aumentino le perdite e diminuiscano il Q e l'efficienza del sistema. Si dà una procedura per misurare questi effetti e la si illustra con un esempio.

Si passa quindi alla curva di impedenza di sistemi a singolo accordo, vengono date procedure per la misurare la frequenza di risonanza ed il carico di massa dell'altoparlante in cassa reflex, la frequenza di accordo, il rapporto di compliance altoparlante/cassa, ed il Qs. Vengono mostrati due esempi. Un interessante esempio con due woofer illustra l'incremento di carico di massa causato dall'accoppiamento mutuo tra altoparlanti.

Il capitolo continua esaminando la curva di impedenza di una linea di trasmissione con e senza materiale assorbente. La curva con materiale assorbente mostra chiaramente l'aumento di smorzamento e di carico di massa del cono.

Il Capitolo 3 termina con la discussione dei compor-

tamenti anomali dell'impedenza e con gli insegnamenti che se ne possono trarre. Inaspettati rapidi cambiamenti, salti e perturbazioni della curva di impedenza riflettono gli effetti delle vibrazioni del mobile, onde stazionarie interne e, nel caso di sistemi accordati, la presenza di risonanze 'a canna d'organo' del condotto. Sono quattro gli esempi di comportamenti anomali. In ciascuno di essi viene spiegato il lavoro di ricerca delle cause di anomalia dell'impedenza.

1.4.3 CAPITOLO 4: TEST ACUSTICI DI SINGOLI ALTOPARLANTI

Il Capitolo 4 prende in esame i fattori che influenzano l'accuratezza delle misure di risposta in frequenza di singoli altoparlanti montati in cassa. Dopo aver discusso la curva di risposta in frequenza, il capitolo tratta gli svariati tipi di microfoni e mostra quali sono i migliori per le misure sui sistemi di altoparlanti.

I microfoni vengono classificati secondo il loro principio di trasduzione, la grandezza acustica cui rispondono, e la loro risposta polare. Si conclude che i microfoni omnidirezionali, del tipo a pressione, calibrati in campo libero sono i migliori per le misure sui sistemi di altoparlanti.

Idealmente, la risposta in frequenza misurata dovrebbe riguardare solo il campo diretto radiato dal singolo altoparlante o sistema di altoparlanti comprendendo gli effetti della geometria del pannello. Sfortunatamente, le misure acustiche sono fortemente condizionate dall'ambiente circostante. Onde stazionarie, arrivi di energia da superfici riflettenti, e rumore ambiente possono disturbare la misura.

L'arte di eseguire una misura su di un sistema di altoparlanti consiste nel riconoscere questi errori e minimizzarli od eliminarli dai dati della risposta in frequenza.

Il resto del capitolo esamina gli effetti dell'ambiente e della geometria del pannello sulle misure di risposta in frequenza ed elenca diverse tecniche di misura e segnali di test che possono essere usati per mitigarne gli effetti. Vengono forniti molti esempi ad illustrazione del materiale del capitolo.

Siccome la maggior parte dei lettori non avrà accesso ad una camera anecoica, l'enfasi viene posta nell'ottenere misure accurate in tipici ambienti di ascolto con superfici riflettenti. La trattazione mostra l'esistenza di due distinti fenomeni ambientali fonte di errori che operano su gamme di frequenza diverse: onde stazionarie e riflessioni. In ambienti comuni le onde stazionarie sotto i 200-400Hz producono ampi (ed assai spaziati in frequenza) picchi ed avvallamenti nella risposta in frequenza che non possono venire mediati ed attutiti. Sopra queste frequenze le stazionarie e le riflessioni tendono ad essere più uniformi in ampiezza e ben spaziate in frequenza.

Si fornisce un'equazione per prevedere i modi stazionari in una stanza rettangolare e se ne fornisce un esempio di calcolo. Nel dettaglio si considerano la riflessione principale sul pavimento e la risposta 'a pettine' che produce, vengono fornite le equazioni per predire le frequenze di picco e di avvallamento causate da questa riflessione. Si presentano infine dati di risposta in frequenza che illustrano l'effetto pettine e ne verificano le equazioni predittive.

Nel Capitolo 4 sono descritte tre tecniche di misura

e due segnali di test che riducono grandemente l'impatto delle stazionarie e delle riflessioni sull'accuratezza di misura. Queste tecniche sono il campo lontano, il campo vicino e le misure a terra. Il rumore rosa ed i toni vobulati sono i segnali di prova.

Si descrivono le misure in campo vicino che eliminano l'effetto delle onde stazionarie di bassa frequenza. Le misure a terra riducono gli errori causati da superfici riflettenti. Si mostra come l'uso del rumore rosa o dei toni vobulati come test per misure a terra o in campo lontano riduca, mediandoli, gli effetti delle riflessioni ad alta frequenza.

Si presentano molti esempi per illustrare ogni approccio. Si danno anche le procedure per combinare correttamente misure in campo vicino e lontano onde ottenere una risposta in frequenza su tutta la gamma audio.

Vengono descritti poi gli effetti sulla risposta in frequenza dovuti alla geometria del pannello. I due più importanti sono le perdite per diffrazione ai bordi e per diffusione a bassa frequenza. Le variazioni della risposta in frequenza indotte dalle diffrazioni devono essere riconosciute e separate dagli effetti dell'ambiente. Vengono fornite delle semplici formule per ottenere le frequenze o le gamme di frequenza interessate dai fenomeni di diffrazione. Si presentano degli esempi per suffragare tali formule.

Il Capitolo 4 termina con due esempi interessanti.

Il primo illustra come le curve di risposta in frequenza di molteplici altoparlanti possono essere usate per selezionare una frequenza di incrocio. Il secondo descrive un approccio alternativo e normalmente più accurato per determinare la frequenza di accordo di una cassa reflex utilizzando la misura acustica del condotto eseguita in campo vicino.

1.4.4 CAPITOLO 5: MISURE ACUSTICHE SU SISTEMI DI ALTOPARLANTI

La più importante misura singola della qualità di un sistema di altoparlanti è la sua risposta in frequenza, sia sull'asse che fuori asse.

La trattazione, iniziata nel Capitolo 4, circa le misure acustiche viene qui estesa sino ad abbracciare la misura della risposta in frequenza di sistemi multivia. Tutte le considerazioni circa l'ambiente di misura si applicano anche al caso della misura di sistemi di altoparlanti. Ci sono però due argomenti peculiari a questo caso ovvero l'integrazione degli altoparlanti nel sistema e le riflessioni multiple sulle pareti.

Siccome i centri acustici dei singoli altoparlanti non coincidono, la distanza di ciascuno dalla posizione di ascolto ovvero di misura non è la stessa. Si pone il problema del corretto posizionamento del microfono per un'accurata misura della risposta in frequenza di un sistema di altoparlanti.

Al variare della posizione del microfono di misura, i segnali provenienti dai singoli altoparlanti arriveranno con fase diversa che, corrispondentemente, influenzerà il modo con cui essi si sommeranno.

Inoltre, se il microfono viene posto troppo vicino al sistema, gli altoparlanti potrebbero non integrarsi correttamente. Se il microfono viene posto troppo lontano la misura sarà perturbata dal rumore ambiente e dalle riflessioni. Per stabilire l'entità del problema presento un esempio che mostra come varia la rispo-

sta di un tipico tre vie al variare della posizione del microfono.

Questo esempio mostra che le differenze riscontrate non sono solo funzione della posizione del microfono ma sono anche grandemente influenzate dall'ordine della rete di crossover usata. Si vede come le reti di incrocio di ordine dispari producano variazioni assai maggiori se paragonate a reti di ordine pari. I risultati raggiunti accentuano la necessità di scegliere attentamente l'asse di progetto del sistema e la posizione del microfono.

Il modello semplice della riflessione sul pavimento sviluppato nel Capitolo 4 viene esteso per considerare anche il caso con più altoparlanti. Qui troviamo altoparlanti a differenti altezze e non alla stessa altezza del microfono. Vengono sviluppate delle equazioni più generali per prevedere, per ciascun altoparlante, le frequenze di riflessione. In un esempio, le frequenze di riflessione del woofer e del midrange vengono scaglionate in modo che gli avvallamenti di uno possano essere compensati da picchi dell'altro. L'esempio mostra anche come eliminare la prima riflessione di ciascun altoparlante con una selezione appropriata della frequenza di crossover.

Il Capitolo 5 continua con molti esempi di misure di risposta in frequenza ed impedenza su sistemi a due e tre vie utilizzando altoparlanti dinamici più un interessante sistema a due vie con un altoparlante a nastro a larga banda. Ogni esempio pone in luce gli aspetti importanti del processo di misura e dà suggerimenti pratici su come interpretare i risultati. Vengono presentate diverse tecniche per combinare la risposta alle basse frequenze in campo vicino con la risposta in campo libero o a terra. In taluni casi vengono mostrate sia la risposta complessiva del sistema che le risposte dei singoli altoparlanti onde illustrare gli effetti del crossover. Due esempi riportano alcune misure necessarie per realizzare il progetto del crossover e scendono nel dettaglio del progetto stesso.

Oltre alle misure in asse, viene presentata la risposta polare di molti degli esempi. La risposta polare ha un forte impatto sull'immagine sonora e sul bilanciamento timbrico percepiti all'interno di normali stanze di ascolto. Viene misurata la risposta polare di un altoparlante a nastro lungo 1.5m e mostrata la sua natura cilindrica. Ciò in contrasto con la caratteristica sferica della risposta polare di un altoparlante dinamico. Queste differenze strutturali di risposta complicano l'integrazione di altoparlanti dinamici con altoparlanti lineari di grandi dimensioni. Il capitolo termina con una breve discussione della risposta in potenza di un subwoofer.

La sorgente per tutte le misure realizzate nel capitolo è un oscillatore sinusoidale vobulato in frequenza ad 1/3 di ottava. È stato inoltre utilizzato un microfono calibrato ed un preamplificatore a larga banda. La quantità di informazioni sui sistemi ottenuta con questi semplici strumenti è sorprendente.

1.4.5 CAPITOLO 6: TEMPO, FREQUENZA E LA TRASFORMATTA DI FOURIER

Con l'avvento di sistemi di acquisizione dati ed analisi basati su PC, siamo oggi in grado di misurare velocemente ed accuratamente una gran quantità di parametri di singoli altoparlanti e sistemi di altopar-

lanti. Tra questi includiamo la risposta ai transienti nel dominio del tempo, il ritardo temporale tra altoparlanti diversi, la risposta in fase ed il centro acustico, solo per accennare ad alcuni.

Nei capitoli precedenti tutte le tecniche di misura descritte e tutti gli esempi presentati riguardavano misure nel dominio della frequenza. I sistemi di acquisizione dati su PC lavorano nel dominio del tempo. Sono la controparte digitale di un oscilloscopio, acquisiscono e mostrano le forme d'onda in funzione del tempo. Fortunatamente, per i sistemi lineari, vi è una relazione diretta tra dati nel dominio del tempo e della frequenza. Per un altoparlante l'equivalente della risposta in frequenza nel dominio del tempo è la risposta all'impulso.

La risposta all'impulso e la risposta in frequenza sono relate da una operazione matematica chiamata trasformata di Fourier. Per interpretare ed utilizzare al meglio i dati forniti da questi sistemi è importante avere una chiara comprensione qualitativa della trasformata di Fourier e di alcuni altri concetti di elaborazione digitale dei segnali e di sistemi lineari.

Per fare ciò si introduce la risposta all'impulso e si definisce, tramite un esempio, la risposta all'impulso di un altoparlante. Viene mostrata anche la corrispondente risposta in frequenza. C'è però un problema. La risposta all'impulso di un altoparlante è una funzione continua del tempo e la risposta in frequenza è una funzione continua della frequenza. Ovvero, la risposta all'impulso ha un valore per ogni istante temporale, e la risposta in frequenza ha un valore ad ogni frequenza. Ma i computer lavorano con campioni di ciascun processo, conosciuti solo a istanti discreti nel tempo o per punti discreti di frequenza.

I successivi cinque paragrafi del Capitolo 6 spiegano come ottenere una buona rappresentazione della risposta all'impulso e della risposta in frequenza partendo dai dati campionati. Ciò coinvolge il processo del campionamento di segnali tempo continui e concetti di elaborazione digitale dei segnali fondamentali al funzionamento dei sistemi di misura su PC.

Nel paragrafo 6.3 vengono definiti i segnali periodici tempo continui e ne vengono dati diversi esempi. Viene poi presentata la serie di Fourier di segnali periodici tempo continui. Questa rappresentazione conforta la conclusione che un segnale periodico ha uno spettro in frequenza discreto.

Quindi viene descritto il processo del campionamento che converte un segnale tempo continuo in un segnale tempo discreto il valore del quale è conosciuto solo ad istanti discreti, ugualmente spaziali nel tempo. Viene presentato il teorema del campionamento, che definisce un limite superiore alle frequenze che possono essere ricostruite senza ambiguità dal processo del campionamento. Il problema delle immagini viene poi spiegato con degli esempi.

La trasformata discreta di Fourier (DFT) viene introdotta nel paragrafo 6.4. Essa è fondamentalmente una serie di Fourier per dati campionati. La DFT è periodica. Ciò porta al problema delle perdite in frequenza quando la sequenza dei dati campionati stessa non è periodica sull'intervallo di campionamento. Una soluzione parziale al problema utilizzando delle finestre dati viene discussa ed illustrata con degli esempi.

La trasformata veloce di Fourier (FFT) è un algoritmo

di calcolo efficiente per calcolare una versione limitata della DFT. La FFT è trattata nella sezione 6.5. Sotto opportune condizioni, la FFT della risposta all'impulso campionata nel tempo è una versione campionata della risposta in frequenza. Questo è un risultato assai importante. Si mostrano le condizioni per cui ciò risulta vero.

Abbiamo quindi stabilito la voluta connessione tra la risposta all'impulso campionata e la risposta in frequenza. Il paragrafo continua con una trattazione della risoluzione in frequenza della FFT ed introduce la tecnica del riempimento di zeri per ottenere grafici FFT più smussati.

Il paragrafo 6.6 introduce una tecnica pratica per misurare la risposta all'impulso di un altoparlante utilizzando un rumore pseudo casuale MLS (Maximum Length Sequence ovvero Sequenza di Massima Lunghezza). Viene descritto il segnale MLS ed elencati i vantaggi di questo approccio. Il basso fattore di cresta del segnale MLS garantisce il funzionamento in regime di linearità del DUT oltre ad ottenere un accresciuto rapporto segnale disturbo relativamente alle altre tecniche di misura. Viene mostrato anche un diagramma a blocchi dell'elaborazione di segnale MLS.

A questo punto siete in possesso di tutti i concetti della teoria di Fourier e di elaborazione digitale dei segnali che servono per capire il funzionamento di sistemi di acquisizione dati basati su PC. Il capitolo passa quindi a spiegare i molti nuovi parametri di altoparlanti e sistemi di altoparlanti che potete misurare.

Il paragrafo 6.7 definisce con precisione la fase e la risposta in fase. Tramite degli esempi si dimostra come siano del tutto normali, in sistemi di altoparlanti e reti di crossover reali, angoli di fase in eccesso di alcune centinaia di gradi. Comunque la periodicità delle sinusoidi limita le misure di fase a $\pm 180^\circ$. Il procedimento di rimozione dei salti della fase misurata per ottenere la fase corretta viene mostrato con un esempio. Vengono quindi introdotti i concetti di risposta a fase minima e fase in eccesso. Ciò conduce ad una descrizione dei filtri passa tutto ed alla risposta in fase di un ritardo temporale puro. Viene definito anche il ritardo di gruppo con degli esempi relativi.

Il paragrafo 6.8 inizia con un semplice esempio che ci fa vedere che non esiste un singolo punto nello spazio o nel tempo che caratterizza la posizione spaziale o temporale di un altoparlante. All'interno di regioni dove la risposta in frequenza varia, le localizzazioni della sorgente di segnale, anche per singole frequenze, sono distribuite in un piccolo spazio o, equivalentemente, nel tempo. Fortunatamente non tutto è perduto. La trattazione sulla fase del paragrafo 6.7 viene ora usata per definire il centro acustico di un altoparlante. Questa caratterizzazione del centro acustico di un altoparlante risulta appropriata per il progetto di reti di crossover per assicurare un corretto allineamento di sistemi multivia. Usando la proprietà di fase minima degli altoparlanti viene mostrata una tecnica per ottenere il centro di fase acustica di un altoparlante insieme con un esempio.

1.4.6 CAPITOLO 7: TEST DI ALTOPARLANTI CON SISTEMI DI MISURA BASATI SU PC

Il Capitolo 7 è interamente dedicato ad esempi di

misure realizzate con i sistemi di acquisizione ed analisi dati, basati su PC, MLSSA e CLIO. Si inizia con una breve descrizione delle potenzialità dei due sistemi. Lo stimolo usato da MLSSA è una sequenza MLS. Anche CLIO utilizza il segnale MLS, ma inoltre fornisce la possibilità di generare rumore rosa, sinusoidi, treni d'onda e multitoni.

Il capitolo continua con esempi di misure di impedenza di capacità ed induttanza fatte con entrambe i sistemi. CLIO e MLSSA usano il metodo del partitore di tensione per le misure di impedenza, ma siccome sono in grado di misurare la fase oltre all'ampiezza, le limitazioni, a questa tecnica, discusse nel Capitolo 2 vengono meno ed è possibile ottenere misure corrette del modulo e della fase dell'impedenza.

A differenza di MLSSA, CLIO usa le sinusoidi come stimolo per le misure di impedenza. A dispetto dei differenti stimoli usati, gli esempi mostrano che i due sistemi producono risultati del tutto comparabili con tipici componenti circuitali. I dati di fase servono a mostrare il comportamento non ideale di induttori e condensatori reali.

Successivamente si tratta della misura dei parametri di Thiele e Small. I parametri sono stimati partendo dalle misure di impedenza. Comunque ambedue i sistemi migliorano il metodo 'dei tre punti' descritto nel Capitolo 2 adattando un modello dell'impedenza della bobina mobile ai dati misurati. I parametri di T/S sono poi calcolati dai parametri del modello.

Questo approccio riduce grandemente gli errori prodotti dalla asimmetria della curva di impedenza e dal rumore ambientale. I parametri dello stesso altoparlante misurati con i due sistemi mostrano piccole, ma significative, differenze da attribuirsi alle differenze effettive del livello di stimolo ed al fatto che i parametri di T/S sono dipendenti dal livello. Un secondo esempio mostra che i parametri ottenuti possono essere fatti approssimativamente coincidere con una appropriata impostazione del livello del segnale MLS relativamente a quello sinusoidale.

Il capitolo continua con una discussione delle misure più comuni fornite dai due sistemi ed utilizzate nel progetto e nella verifica degli altoparlanti e dei sistemi di altoparlanti. Le misure cadono in due categorie: misure nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza. Le misure nel dominio del tempo includono la risposta all'impulso, la risposta al gradino (step), l'energia nel tempo (ETC) e il decadimento spettrale o waterfall.

La risposta al gradino è una utile misura qualitativa della coerenza temporale del sistema. La ETC è molto utile nel valutare i tempi di arrivo in spazi riverberanti. La waterfall misura il decadimento spettrale nel tempo. Essa rivela i modi risonanti che persistono dopo che lo stimolo viene rimosso. Vengono presentati esempi di ciascuna misura.

Le riflessioni da superfici come pareti, pavimento e soffitto appaiono in tempi diversi nella risposta all'impulso. Rimuovendo la porzione della risposta all'impulso che contiene le riflessioni è possibile ottenere la risposta in frequenza dell'altoparlante o del sistema di altoparlanti in condizioni anecoiche. Un esempio mostra gli effetti di includere specifiche riflessioni nel calcolo della risposta.

Le misure nel dominio della frequenza comprendono la risposta in frequenza, la risposta in fase, ed il

calcolo del centro acustico dell'altoparlante. In più MLSSA fornisce la fase in eccesso, il ritardo di gruppo ed il ritardo di gruppo in eccesso. Il ritardo di gruppo in eccesso ci dà un modo molto accurato di misurare il disallineamento temporale tra altoparlanti in sistemi multivia. Con gli stimoli sinusoidali e la FFT, CLIO permette misure di distorsione armonica ed intermodulazione.

Le possibilità di misura descritte vengono poi applicate a due distinte aree: il progetto di un sistema di altoparlanti e la verifica delle prestazioni. Le misure necessarie in ciascun caso sono un po' differenti. Con riguardo al progetto, i software di simulazione di reti di crossover richiedono misure molto accurate dell'impedenza dei altoparlante, delle risposte in frequenza e fase, e del centro acustico prima che il procedimento di ottimizzazione possa aver inizio. I dati di progetto dovranno essere pertinenti all'ambiente acustico dove il sistema andrà ad operare.

I dati seguenti, per ciascun altoparlante, sono necessari per il progetto: impedenza della bobina in modulo e fase, risposta in frequenza e fase sull'asse, posizione relativa dei centri acustici. Un esempio di sistema a due vie mostra il procedimento completo di collezione di tutti i dati necessari e segue il progetto sino a completamento. Vengono mostrati tutti i dati intermedi e le risposte finali.

Le misure necessarie alla verifica delle prestazioni di un sistema di altoparlanti sono diverse, e più esaustive, di quelle richieste per il progetto. Con le loro limitazioni, dovrebbero aiutarvi a comprendere come il sistema suonerà se inserito in un comune ambiente di ascolto.

Le misure che, nella mia esperienza, si collegano di più a questo obiettivo sono: l'impedenza di sistema in modulo e fase, la risposta in frequenza sull'asse, la sensibilità del sistema, il decadimento spettrale, la risposta al gradino, il ritardo di gruppo in eccesso, le risposte polari orizzontale e verticale, la risposta in potenza, e la distorsione armonica e di intermodulazione. Il testo porta i risultati di questa completa sequenza di test eseguita su di un sistema due vie in configurazione MTM.

I risultati di ogni test sono mostrati in forma grafica o tabellare, e le implicazioni sul suono sono attentamente spiegate.

Il capitolo termina con tre ulteriori esempi che illustrano la grande utilità dei sistemi elettroacustici di acquisizione dati basati su PC. Nel primo esempio la fase in eccesso viene usata per calcolare la velocità del suono in una linea di trasmissione riempita. Il secondo esempio esamina, da un punto di vista differente, le finestre dati e le perdite spettrali. Il terzo ed ultimo esempio prende in esame una finestra speciale ed il suo utilizzo nell'analisi ed equalizzazione della risposta in frequenza sistema di altoparlanti/ambiente.

Spero che questa breve introduzione a 'Misurare gli altoparlanti' abbia acceso il vostro interesse nell'argomento. Se è così andate al Capitolo 2.

BIBLIOGRAFIA

1. Dickason, Vance, The Loudspeaker Design Cookbook, Fifth Edition, Audio Amateur Press (PO Box 243, Peterborough, NH 03458).