

# Confronto fra algoritmo LMS e Fast Deconvolution per la cancellazione del crosstalk

Matteo Orlandini e Jacopo Pagliuca

Università Politecnica delle Marche

28 settembre 2021



# Contenuti

- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset
- 4 LMS
- 5 Fast Deconvolution
- 6 Implementazione NU-Tech
- 7 Risultati

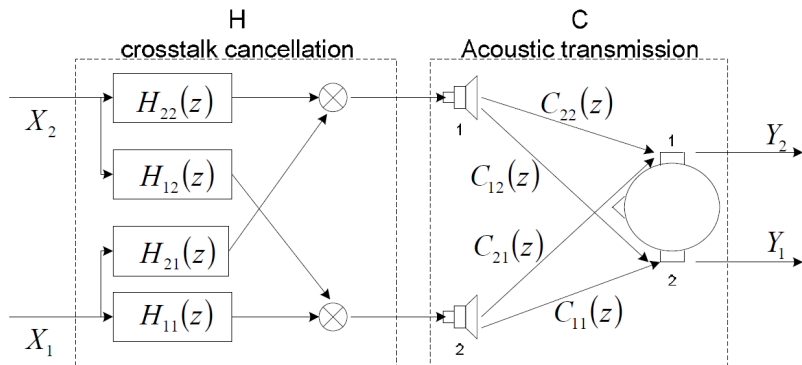
- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset
- 4 LMS
- 5 Fast Deconvolution
- 6 Implementazione NU-Tech
- 7 Risultati

# Cancellazione del crosstalk

## Obiettivo

Confrontare gli algoritmi LMS e Fast Deconvolution per la cancellazione del crosstalk.

- Un sistema audio 3D permette di posizionare i suoni intorno ad un ascoltatore in modo che questi siano percepiti come provenienti da punti arbitrari nello spazio.
- Se vengono utilizzati degli altoparlanti, la riproduzione di segnali binaurali all'orecchio dell'ascoltatore non è semplice. Ogni orecchio riceve una componente di diafonia, inoltre, i segnali diretti sono distorti dal riverbero della stanza.
- Per superare i problemi descritti sopra, è necessario un filtro inverso prima di riprodurre il segnale binaurale attraverso gli altoparlanti.



**Figura:** Diagramma a blocchi del sistema sonoro usato

1 Introduzione

2 Stato dell'arte

3 Dataset

4 LMS

5 Fast Deconvolution

6 Implementazione NU-Tech

7 Risultati

- Supponendo che i percorsi di trasferimento acustico dagli altoparlanti alle orecchie siano noti, il metodo di implementazione **diretto** calcola il filtro di cancellazione della diafonia invertendo le funzioni di trasferimento HRTF.
- Nei metodi di implementazione **adattivi**, il filtro di cancellazione della diafonia è calcolato adattando i relativi coefficienti usando i segnali di feedback ricevuti da microfoni in miniatura collocati nelle orecchie dell'utente.
- I metodi diretti o adattativi possono essere implementati nel dominio del **tempo** o della **frequenza**.
- I primi sono generalmente dispendiosi dal punto di vista computazionale, mentre i secondi hanno una complessità inferiore. Gli algoritmi nel dominio del tempo hanno prestazioni migliori di quelli nel dominio della frequenza, data la stessa lunghezza del filtro di cancellazione.

# Algoritmi nel dominio del tempo

## LMS

Noto per la sua semplicità e robustezza ed è ampiamente utilizzato, anche se la sua velocità di convergenza è lenta.

$$J = E[e[n]^2] = E[(d[n] - y[n])^2]$$

## RLS

Si ottiene pesando in modo esponenziale i dati in modo da rimuovere gradualmente gli effetti dei vecchi dati sui coefficienti del filtro e permettere il tracciamento di segnali che variano lentamente.

$$J(\mathbf{h}_n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e^2[i]$$



# Algoritmi nel dominio della frequenza

## Fast Deconvolution

La Fast Deconvolution è un metodo molto veloce per calcolare una matrice di filtri digitali che può essere utilizzata per controllare le uscite di un impianto multicanale.

$$J = E + \beta V(f)$$

## FLMS

Un algoritmo derivato da LMS è FLMS (Fast Least Mean Square), viene implementato nel dominio della frequenza e richiede uno sforzo computazionale minore rispetto alla sua controparte nel dominio del tempo.

- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset**
- 4 LMS
- 5 Fast Deconvolution
- 6 Implementazione NU-Tech
- 7 Risultati

# Dataset utilizzato

## HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone

- Dataset del MIT.
- Risposte impulsive dell'orecchio sinistro e destro rispetto ad un altoparlante Realistic Optimus Pro 7 montato a 1,4 metri dal KEMAR.
- I dati HRTF vengono archiviati nelle directory per elevazione. Ogni nome di directory ha il formato "elevEE", dove "EE" è l'angolo di elevazione.
- All'interno di ogni directory, il nome di ogni file ha il formato "XEEeAAAa.wav" dove X può essere "L" o "R" rispettivamente per la risposta dell'orecchio sinistro e destro e "AAA" è l'azimut della sorgente in gradi, da  $0^\circ$  a  $355^\circ$ .

- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset
- 4 LMS**
- 5 Fast Deconvolution
- 6 Implementazione NU-Tech
- 7 Risultati

In generale, si può scrivere l'uscita  $y[n]$  del filtraggio nell' $n$ -esimo istante di un segnale  $\mathbf{a}[n]$  definito come:

$$\mathbf{a}[n] = [a[n], a[n-1], \dots, a[n-M+1]]^T$$

con un filtro  $\mathbf{b}[n]$  di lunghezza  $M$  con coefficienti del tipo:

$$\mathbf{b}[n] = [b_0[n], b_1[n], \dots, b_{M-1}[n]]^T$$

come:

$$y[n] = \sum_{j=0}^{M-1} b_j[n] a[n-j] = \mathbf{b}^T[n] \cdot \mathbf{a}[n]. \quad (1)$$

Il filtraggio dei segnali di riferimento  $x_i[n]$  con le hrir  $c_{lm}$  è dato dalla seguente equazione:

$$r_{ilm}[n] = \sum_{j=0}^{M-1} c_{lm}[j] x_i[n-j]. \quad (2)$$

Si può applicare la formula (1) all'equazione (2) per calcolare le  $r_{ilm}[n]$  nel seguente modo:

$$r_{ilm}[n] = \sum_{j=0}^{M-1} c_{lm,j}[n] x_i[n-j] = \mathbf{c}_{lm}^T[n] \cdot \mathbf{x}_i[n]. \quad (3)$$

Il segnale ricevuto ad ogni orecchio è dato da:

$$y_i[n] = r_{i1}[n] \otimes h_{11}[n] + r_{i2}[n] \otimes h_{21}[n] + r_{i3}[n] \otimes h_{12}[n] + r_{i4}[n] \otimes h_{22}[n]. \quad (4)$$

Il criterio dell'algoritmo LMS è la minimizzazione della funzione costo

$$J = E[e[n]^2] = E[(d[n] - y[n])^2] \quad (5)$$

dove  $e[n]$ ,  $d[n]$  e  $y[n]$  sono definiti come:

$$\mathbf{e}[n] = \begin{bmatrix} e_1[n] \\ e_2[n] \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d}[n] = \begin{bmatrix} d_1[n] \\ d_2[n] \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}[n] = \begin{bmatrix} y_1[n] \\ y_2[n] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

La minimizzazione di  $J$  avviene con il metodo steepest descend e l'aggiornamento dei tappi del filtro adattativo segue la formula:

$$h^{(k+1)} = h^{(k)} - \mu e_i^{(k)} \cdot \mathbf{r}_i^T. \quad (7)$$

Esplicitando l'equazione (7) per il primo canale, si ottiene:

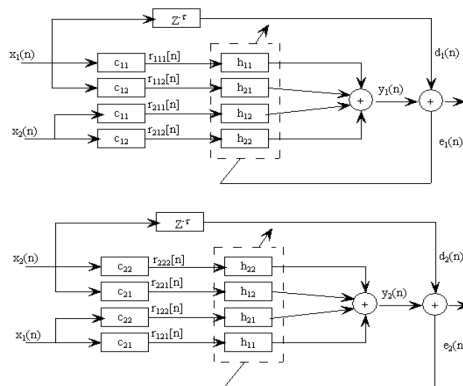
$$h_{11}^{(k+1)}[n] \leftarrow h_{11}^{(k)}[n] - \mu e_1^{(1)} \cdot r_{111}[n]$$

$$h_{21}^{(k+1)}[n] \leftarrow h_{21}^{(k)}[n] - \mu e_1^{(1)} \cdot r_{112}[n]$$

$$h_{12}^{(k+1)}[n] \leftarrow h_{12}^{(k)}[n] - \mu e_1^{(1)} \cdot r_{211}[n]$$

$$h_{22}^{(k+1)}[n] \leftarrow h_{22}^{(k)}[n] - \mu e_1^{(1)} \cdot r_{212}[n]$$

L'aggiornamento usando il secondo canale avviene in modo analogo.



**Figura:** Diagramma a blocchi della cancellazione del crosstalk usando LMS



- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset
- 4 LMS
- 5 Fast Deconvolution**
- 6 Implementazione NU-Tech
- 7 Risultati

## Deconvoluzione

La deconvoluzione, nella sua forma più elementare, può essere descritta come il compito di calcolare l'input di un sistema a tempo discreto conoscendo il suo output.

Consideriamo una funzione costo del tipo:

$$J = E + \beta V(f) \quad (8)$$

dove  $E$  è una misura dell'errore della pressione sonora:

$$E = |Y_1 - X_1|^2 + |Y_2 - X_2|^2 \quad (9)$$

e  $V$  è una funzione della frequenza che indica il costo computazionale. Il numero  $\beta \geq 0$  è un parametro di regolarizzazione che determina quanto peso assegnare alla funzione  $V(f)$ .

Siano  $S$  i segnali trasferiti agli altoparlanti facendo passare il segnale  $X$  attraverso la matrice di cancellazione del crosstalk  $H$ . Otteniamo:

$$V(f) = S_b^+ S_b \quad (10)$$

con

$$S_b = BS = BHX, \quad (11)$$

dove  $B$  è una matrice  $2 \times 2$  e il simbolo  $^+$  indica l'inversa generalizzata della matrice  $S_b$ . Se, come nel nostro caso, il dominio della frequenza è discreto e  $B = I$ , la soluzione approssimata della funzione  $J$  è definita da:

$$H[k] = \left[ C^H[k]C[k] + \beta I \right]^{-1} C^H[k] \quad (12)$$

dove  $k$  indica la  $k$ -esima frequenza corrispondente a  $\exp(j2\pi k/N)$  e l'apice  $^H$  denota l'operatore Hermitiano.

# Overlap and Save I

Dato che l'uscita  $Y$  è data da:

$$Y = CHX = \begin{bmatrix} C_{11}X_1 & C_{12}X_1 & C_{11}X_2 & C_{12}X_2 \\ C_{21}X_1 & C_{22}X_1 & C_{21}X_2 & C_{22}X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \\ H_{12} \\ H_{22} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

nell'implementazione pratica non si può calcolare tutta l'uscita con la sola operazione matriciale (13), occorre usare la tecnica dell'overlap and save per filtrare l'ingresso  $X$  con i filtri  $C$  e  $H$ . L'overlap and save è utile per eseguire un filtraggio in real time con un filtro a risposta impulsiva finita.

# Overlap and Save II

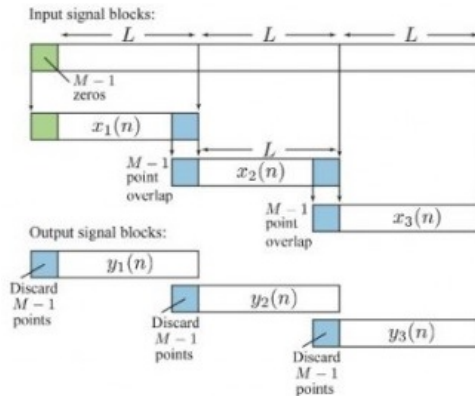


Figura: Metodo Overlap and Save

# Overlap and Save III

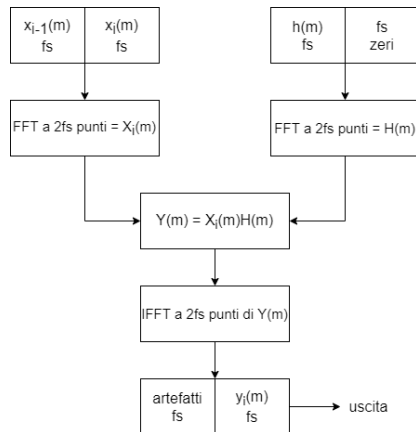


Figura: Diagramma dell'implementazione dell'Overlap and Save

- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset
- 4 LMS
- 5 Fast Deconvolution
- 6 Implementazione NU-Tech**
- 7 Risultati

# LMS

- 1 Inizializzazione delle variabili nel costruttore.
- 2 Allocazione delle variabili e lettura delle HRIR nella Init.
- 3 Costruzione segnale desiderato traslando il segnale di ingresso di  $\tau$  campioni nella Process.
- 4 Filtraggio dei segnali  $x_i[n]$  con le HRIR  $c_{lm}$  usando l'equazione (3).
- 5 Calcolo delle uscite con la formula (4).
- 6 Calcolo dell'errore come la differenza fra il segnale desiderato e l'uscita effettiva.
- 7 Aggiornamento dei tappi del filtro di ricostruzione con la formula (7).
- 8 Deallocazione della memoria nella Delete.



# Fast Deconvolution

- 1 Inizializzazione delle variabili nel costruttore.
- 2 Allocazione delle variabili e lettura delle HRIR nella Init.
- 3 Calcolo della FFT a  $\text{fftLen}$  punti delle HRIR.
- 4 Calcolo della matrice  $\mathbf{H}$  con la formula (12).
- 5 Costruzione del buffer di ingresso con  $f_s$  campioni per l'overlap and save nella Process.
- 6 Calcolo della FFT a  $\text{fftLen}$  punti del buffer di ingresso.
- 7 Calcolo del buffer di uscita moltiplicando il buffer di ingresso per le HRTF.
- 8 Aggiornamento dell'uscita scartando i primi  $f_s$  campioni del buffer.
- 9 Deallocazione della memoria nella Delete.

- 1 Introduzione
- 2 Stato dell'arte
- 3 Dataset
- 4 LMS
- 5 Fast Deconvolution
- 6 Implementazione NU-Tech
- 7 Risultati**

# Risultati Matlab

## Fattori di separazione dei canali

$$J_L = E \left\{ 20 \cdot \log_{10} \frac{C_{11}H_{11} + C_{12}H_{21}}{C_{21}H_{11} + C_{22}H_{21}} \right\} \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

$$J_R = E \left\{ 20 \cdot \log_{10} \frac{C_{22}H_{22} + C_{21}H_{12}}{C_{12}H_{22} + C_{11}H_{12}} \right\} \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

$\mu$	$J_R$ [dB]	$J_L$ [dB]
$10^{-3}$	22.032	21.924
$5 \cdot 10^{-4}$	17.610	20.375
$10^{-4}$	11.063	16.921
$5 \cdot 10^{-5}$	9.742	16.161

(a) Confronto di  $J_R$  e  $J_L$  per l'algoritmo LMS per diversi  $\mu$ .

Azimuth	$J_R$ [dB]	$J_L$ [dB]
$\pm 20^\circ$	21.511	25.532
$\pm 30^\circ$	22.032	21.924
$\pm 40^\circ$	19.667	23.528

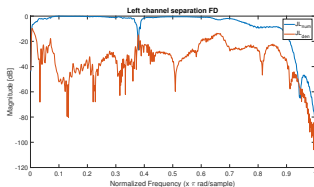
(c) Confronto di  $J_R$  e  $J_L$  per l'algoritmo LMS per diversi angoli azimutali con  $\mu = 10^{-3}$ .

$\beta$	$J_R$ [dB]	$J_L$ [dB]
1	25.062	26.538
0.3	28.829	30.498
0.1	34.908	36.532
0.01	47.657	48.661

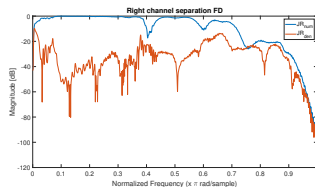
(b) Confronto di  $J_R$  e  $J_L$  per l'algoritmo FD per diversi  $\beta$ .

Azimuth	$J_R$ [dB]	$J_L$ [dB]
$\pm 20^\circ$	45.672	47.034
$\pm 30^\circ$	34.908	36.532
$\pm 40^\circ$	40.523	42.098

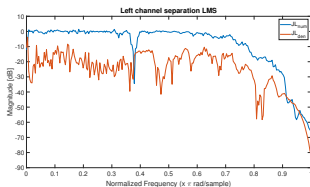
(d) Confronto di  $J_R$  e  $J_L$  per l'algoritmo FD per diversi angoli azimutali con  $\beta = 0.1$ .



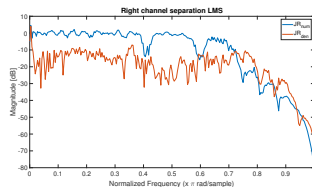
(a)



(b)

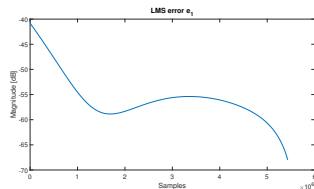


(c)

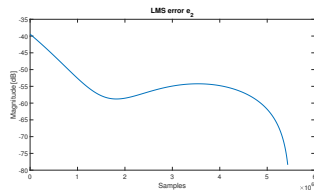


(d)

Figura: Confronto del numeratore e del denominatore di (a)  $J_L$  e (b)  $J_R$  per FD con  $\beta = 0.3$ , (c)  $J_L$  e (d)  $J_R$  per LMS con  $\mu = 10^{-3}$ .

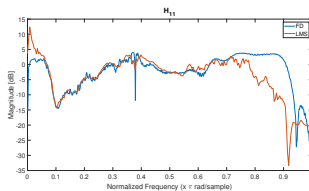


(a)

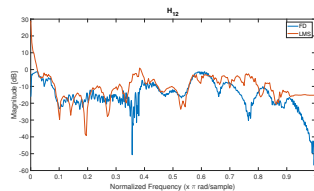


(b)

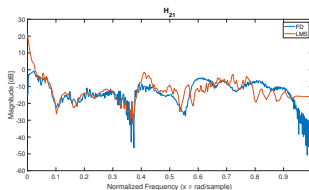
**Figura:** Confronto dell'MSE del canale (a) sinistro e (b) destro dell'algoritmo LMS.



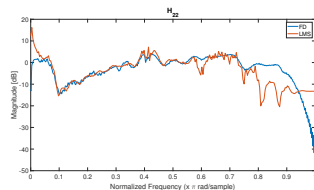
(a)



(b)

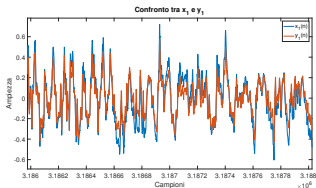


(c)

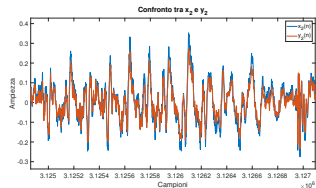


(d)

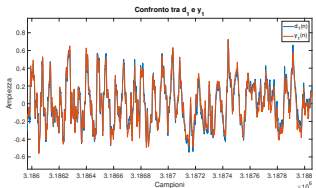
**Figura:** Confronto dei filtri di cancellazione del crosstalk (a)  $H_{11}$ , (b)  $H_{12}$ , (c)  $H_{21}$ , (d)  $H_{22}$  di LMS e Fast Deconvolution.



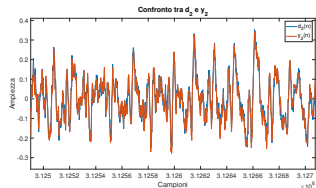
(a)



(b)



(c)

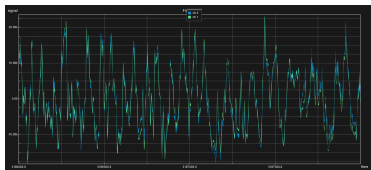


(d)

Figura: Confronto degli ingressi e le uscite (a) sinistro e (b) destro della Fast Deconvolution, (c) sinistro e (d) destro di LMS.



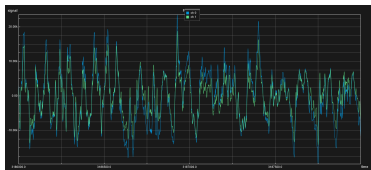
# Risultati NU-Tech



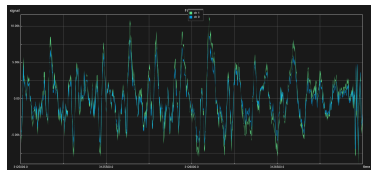
(a)



(b)

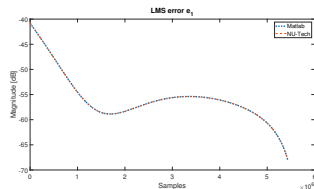


(c)

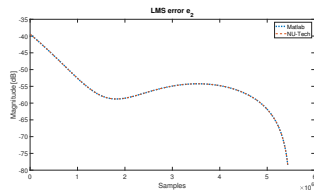


(d)

**Figura:** Confronto degli ingressi e le uscite (a) sinistro e (b) destro della Fast Deconvolution, (c) sinistro e (d) destro di LMS.

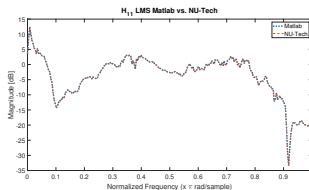


(a)

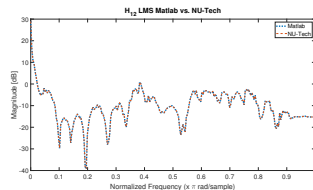


(b)

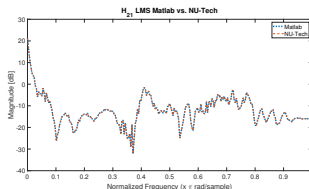
Figura: Confronto dell'MSE del canale (a) sinistro e (b) destro dell'algoritmo LMS.



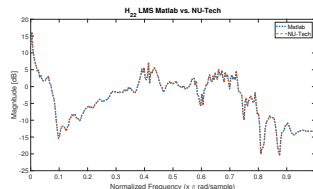
(a)



(b)

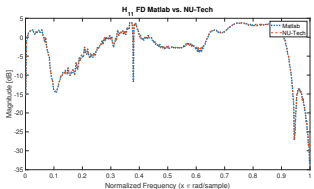


(c)

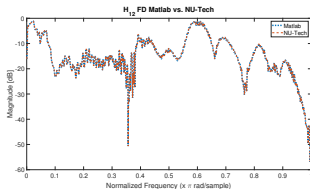


(d)

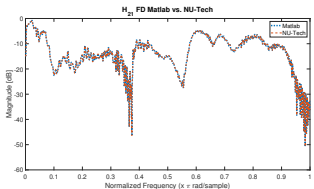
Figura: Confronto dei filtri di cancellazione del crosstalk (a)  $H_{11}$ , (b)  $H_{12}$ , (c)  $H_{21}$  e (d)  $H_{22}$  in Matlab e in NU-Tech per l'algoritmo LMS.



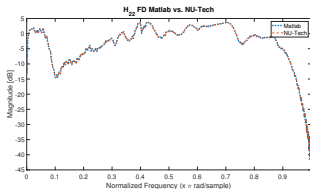
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura:** Confronto dei filtri di cancellazione del crosstalk (a)  $H_{11}$ , (b)  $H_{12}$ , (c)  $H_{21}$  e (d)  $H_{22}$  in Matlab e in NU-Tech per l'algoritmo Fast Deconvolution.

# Bibliografia I



Mingsian R. Bai e Chih-Chung Lee. «Objective and subjective analysis of effects of listening angle on crosstalk cancellation in spatial sound reproduction». In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 120.4 (2006), pp. 1976–1989. DOI: 10.1121/1.2257986.



E. Ferrara. «Fast implementations of LMS adaptive filters». In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 28 (1980), pp. 474–475.



Bill Gardner e Keith Martin. *HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone*. Rapp. tecn. 280. (update on October 13, 2006). [Online]. Available: <http://www.media.mit.edu>. MIT Media Lab Perceptual Computing, 1994.

# Bibliografia II



A. Gonzalez e J.J. Lopez. «Time domain recursive deconvolution in sound reproduction». In: *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.00CH37100)*. Vol. 2. 2000, 11833–11836 vol.2. DOI: 10.1109/ICASSP.2000.859089.



Emmanuel C. Ifeakor e Barrie W. Jervis. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. 2nd. Pearson Education, 2002. ISBN: 0201596199.



Intel®. *Intel® Integrated Performance Primitives*. Dic. 2020.



Jun Seong Kim et al. «A Novel Adaptive Crosstalk Cancellation using Psychoacoustic Model for 3D Audio». In: *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*. Vol. 1. 2007, pp. 1-185-1-188. DOI: 10.1109/ICASSP.2007.366647.



O. Kirkeby et al. «Analysis of ill-conditioning of multi-channel deconvolution problems». In: feb. 1999, pp. 155–158. ISBN: 0-7803-5612-8.

# Bibliografia III



O. Kirkeby et al. «Fast deconvolution of multichannel systems using regularization». In: *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 6.2 (1998), pp. 189–194. DOI: 10.1109/89.661479.



Ole Kirkeby et al. «Design of Cross-Talk Cancellation Networks by Using Fast Deconvolution». In: (nov. 2000).



Chris Kyriakakis. «Fundamental and Technological Limitations of Immersive Audio Systems». In: *Proceedings of the IEEE* 86 (giu. 1998), pp. 941–951. DOI: 10.1109/5.664281.



Dan Li et al. «Comprehensive comparison of the least mean square algorithm and the fast deconvolution algorithm for crosstalk cancellation». In: *2012 International Conference on Audio, Language and Image Processing*. 2012, pp. 224–229. DOI: 10.1109/ICALIP.2012.6376616.

# Bibliografia IV



A. Mouchtaris et al. «Inverse filter design for immersive audio rendering over loudspeakers». In: *IEEE Transactions on Multimedia* 2.2 (2000), pp. 77–87. DOI: 10.1109/6046.845012.



P.A. Nelson et al. «Adaptive inverse filters for stereophonic sound reproduction». In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 40.7 (1992), pp. 1621–1632. DOI: 10.1109/78.143434.



Lin Wang e Yin Fuliang. «A Stereo Crosstalk Cancellation System Based on the Common-Acoustical Pole/Zero Model». In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2010 (gen. 2010). DOI: 10.1155/2010/719197.