

Progetto Speciale CNR "Diamond"
(Dosimeter Implementing Accurate Misurement of Noise Dose)

**Specifiche di progetto del dosimetro per la misura accurata
della dose personale di rumore**

Graziano Bertini, Paolo Emilio Giua, Giovanni Marras, Santina Rocchi, Valerio Vignoli

Nota Tecnica I.E.I. B4 – 29
Dicembre 2000



B4-29 (2000)

Ringraziamenti

Si ringrazia Luigi Bedini per la collaborazione e per e utili osservazioni sugli algoritmi di calcolo, Giovanni Scaramelli per la stesura di queste pagine

Progetto Speciale CNR “Diamond” (Dosimeter Implementing Accurate Misurement of Noise Dose)

Coordinatore Dott. Paolo E. Giua

Partecipanti:

U. O. proponente: Ist. di Acustica O. M. Corbino (IDAC - CNR Roma) – Dott. P. E. Giua (Resp. Scientifico), P. Rossi .

U. O. IEI – CNR Pisa – G. Bertini (Resp. Scientifico), A. Landucci, L. Bedini, G. Marras

U. O. Facoltà Ing. Elettronica – Univ. di Siena – S. Rocchi (Resp. Scientifico), V. Vignoli

Premessa.

E' noto che il rumore ambientale da qualsiasi fonte esso sia generato produce danno non solo all'apparato uditivo ma anche alla sfera psicologica, ai ritmi sonno veglia e alle comunicazioni in generale. Per ridurre i costi umani e sociali sono state via via emanate normative nazionali ed europee, pur se con carattere settoriale e con metodiche non ancora completamente standardizzate e definitive. In seguito a ciò stanno aumentando gli sforzi in ogni direzione possibile per la riduzione del rumore (trattamento degli ambienti esterni ed interni agli edifici, interventi alla fonte, ecc.).

Nel campo delle tecniche di misura del rumore acustico, è in continuo aggiornamento la normativa inerente la determinazione del danno per l'udito (livelli di pressione sonora, esposizione ecc.) e la relativa strumentazione di misura. Per questo è stato proposto un nuovo tipo di dosimetro che prevede due microfoni di ingresso (anziché uno solo), per una ripresa del suono di tipo binaurale, e l'uso di opportuni trasduttori dedicati alla rilevazione della voce del portatore, al fine di ridurre la perturbazione da essa introdotta sui livelli misurati.

Al progetto, proposto e coordinato dal Dott. P.E. GIUA dell'Istituto di Acustica “O.M. Corbino” di Roma (IDAC-CNR) collabora oltre all'IEI (Dott. G. Bertini) anche il Dip. di Ingegneria dell'Informazione (DII) della Univ. di Siena (Prof.ssa S. Rocchi).

L'obiettivo generale della ricerca iniziata nel 1998 consiste nello sviluppo di un prototipo di strumento capace di eseguire misure più precise dei dosimetri commerciali, in grado di trattare i segnali provenienti da un insieme di trasduttori (tre/quattro al posto di uno) opportunamente posizionati sulla persona sotto test.

Le grandezze rilevate dai trasduttori vengono acquisite ed elaborate in tempo reale da un nucleo di calcolo basato su microprocessore per DSP. Le elaborazioni consistono in un insieme di operazioni su sequenze numeriche sia nel dominio del tempo che nel dominio della frequenza, da eseguire in tempo reale, a determinati istanti di tempo, durante la misura. Alla fine della sessione (8 - 24 ore) i risultati opportunamente memorizzati, devono essere trasferiti su un personal computer per ulteriori analisi "fuori linea" e per le opportune valutazioni, visualizzazione dei risultati sia su monitor che su stampa, ecc.

Uno degli obiettivi assegnati all'IEI era quello di approntare un sistema prototipale basato su pc portatile e un kit DSP a basso consumo, per poter eventualmente fare delle sperimentazioni sul campo.

Durante il 1999 i primi mesi del 2000 è stato sviluppato un primo prototipo col DSP 2181, controllato tramite PC desktop, in attesa che la Analog Devices rendesse disponibile sul mercato il DSP2189M caratterizzato da migliori prestazioni (alta velocità e minori consumi).

In questa nota vengono riportati le considerazioni che a partire dagli obiettivi da raggiungere hanno portato alla definizione ed ad una prima stesura delle specifiche di progetto.

Introduzione

Fin dalla nascita la fonometria strumentale ha posto l'attenzione sulla caratterizzazione dei fenomeni sonori: una misura qualitativa delle sensazioni di disturbo propone difficoltà notevoli, oggettive e soggettive, derivate dalla complessità delle situazioni pratiche. I fattori di carattere oggettivo e soggettivo che conducono alla diversificazione delle analisi possono essere classificati nel modo seguente:

- Caratteristiche legate alla natura delle sorgenti di rumore: potenza sonora irradiata, andamento temporale e composizione spettrale del suono, durata, etc.
- Caratteristiche ambientali: morfologia e proprietà acustiche dei materiali utilizzati (capacità di assorbimento, riflessione, diffusione del suono), disposizione delle sorgenti nello spazio.
- Caratteristiche psicofisiologiche del soggetto disturbato: sensibilità individuale al disturbo, indifferenza, assuefazione.
- Circostanze accessorie: natura dell'attività disturbata (lavoro intellettuale o manuale, riposo, etc), interesse all'ascolto (per motivi di lavoro o altro), etc.

Tutto ciò, in aggiunta alla imperfetta conoscenza dei meccanismi psicofisiologici della funzione uditiva, comporta una difficile modellizzazione del sistema e apre la strada a metodologie alternative per le misure del rumore.

Strumentazione esistente

Come è noto lo strumento più utilizzato per effettuare misurazioni nel campo della fonometria è il fonometro [1]. Nato per rilevare i livelli energetici istantanei (SPL), nelle versioni più accessoriate è capace di integrare le misure in opportuni intervalli di tempo così da fornire, talvolta in unione con personal computer, nuovi indici e parametri energetici (Livello equivalente continuo, Sound Exposure, etc.)[2]. Mentre il fonometro ed altri sistemi misura, anche multicanale, per misurare le emissioni prodotte da macchine, motori ecc.. operano in posizioni fisse dello spazio è risultato utile misurare la quantità di energia sonora che insiste su una persona nell'arco di una giornata come sommatoria derivata da tutti i possibili siti in cui si trova. E' nata così la dosimetria personale di rumore che viene definita secondo le caratteristiche riportate in letteratura. Per valutare la dose di rumore si utilizza un particolare fonometro integratore detto "dosimetro" che è costituito da una piccola unità tascabile e viene indossato dal soggetto sottoposto a misura per tutta la durata della rilevazione.

Problemi derivanti dall'uso dei dosimetri disponibili attualmente

Come la maggior parte di fonometri reperibili in commercio il dosimetro è capace di acquisire i segnali da un solo microfono: la struttura interna è predisposta per elaborare un solo canale quindi, data la particolarità di essere indossato da un portatore che si muove nella sua normale attività, può verificarsi di posizionare il microfono nelle direzioni meno significative per la caratterizzazione delle fonti di rumore e della dose a cui viene sottoposta la persona. Quindi il fatto che i risultati dipendano dalla collocazione del microfono porta alla criticità nella scelta nel posizionamento di quest'ultimo: i punti adatti sono generalmente sulla spalla, sul bavero della giacca, sull'elmetto di protezione o sul busto del soggetto in dipendenza dall'ambiente, dai tipi di sorgente di rumore ecc..

Una possibile soluzione che migliora le prestazioni è sicuramente quella di adoperare due microfoni e posizionarli in prossimità dei padiglioni auricolari, cosa questa finora non praticabile causa l'elevata potenza di calcolo richiesta al sistema per l'elaborazione di due canali di segnale anziché uno.

Un altro fattore che influenza negativamente l'affidabilità delle misure è il contributo vocale del soggetto. Infatti a seconda dell'intensità di fonazione del portatore una quantità non prevista di energia viene sommata ai livelli misurati. Per i motivi suddetti l'impiego dei dosimetri attuali non è ritenuto valido dalla normativa italiana per fini legali, mentre si ritiene utile a fini conoscitivi e di indagini statistiche. Infatti si possono trarre utili informazioni qualitative ad es. in maniera combinata fra più soggetti portatori, previa opportuna fase di istruzione degli stessi sul corretto uso del dispositivo.

Criteri di progetto

Tradizionalmente in fonometria ci si occupa della misura del suono in relazione ai massimi valori tollerabili per l'udito ed al rischio di danno da rumore ('loudness'). Gran parte della strumentazione di misura presente sul mercato si limita al rilievo delle sole grandezze utili ai fini civilistici¹ sui massimi valori ammessi per le emissioni, risultando pertanto inadatta ad uno studio più approfondito dei fenomeni sonori esaminati.

In questo progetto abbiamo vagliato nuove caratterizzazioni trascurate nel passato ma rilevanti ai fini della sensazione uditiva, svolgendo pertanto sui segnali un esame di natura qualitativa oltre che quantitativa:

- la sottrazione del contributo vocale del portatore (in funzione dell'intensità sonora)
- la natura binaurale delle rilevazioni fonometriche (i due canali tengono conto sia della capacità umana di rilevazione sia del maggior numero di valori considerati)
- un'analisi tempo-frequenza maggiormente raffinata (utilizzo di appropriati algoritmi di calcolo).

Recenti studi mostrano che per una analisi accurata del suono, nello studio psicoacustico del disturbo da rumore, deve introdursi la presenza fisica dell'individuo (o di un manichino di misura) all'interno del campo sonoro esaminato usando una coppia di microfoni all'ingresso di ciascun condotto auricolare. Altro importante aspetto considerato nel progetto, per il quale non si conoscono soluzioni finora proposte in tal senso, riguarda la desensibilizzazione del sistema rispetto alla voce del soggetto portatore. La possibilità di correggere le misure, unitamente alle caratteristiche di ridotto ingombro ed ergonomicità dell'intera struttura, consentiranno l'utilizzo efficace del dispositivo rispettando il naturale svolgimento delle attività di chi lo porta, compresa la facoltà di comunicare verbalmente (senza limitazioni sul livello di fonazione). Le elaborazioni svolte sui segnali rilevati saranno finalizzate per la descrizione dei fenomeni sonori secondo i criteri della

¹ Norme sulle tecniche di rilevamento del rumore (DM 16/03/98)

fonometria tradizionale e per la determinazione di nuovi parametri e descrittori del suono in accordo con i più recenti studi nel campo della psicoacustica. In questo progetto teniamo conto degli aspetti più critici del problema che di solito vengono semplificati o trascurati:

- a) Si considera la “qualità” dell’emissione sonora senza svalutare il livello sonoro in senso assoluto;
- b) Si caratterizza adeguatamente la natura spettrale evitando l’utilizzo di descrittori globali;
- c) La rilevazione viene effettuata “in situ” con il soggetto la cui presenza determina una differente configurazione del campo sonoro;
- d) La modalità di rilevamento è di tipo binaurale in accordo con la nostra funzione uditiva.

Architettura del dosimetro

In base alle considerazioni su esposte la struttura proposta per la realizzazione dello strumento è quella indicata in figura 1.

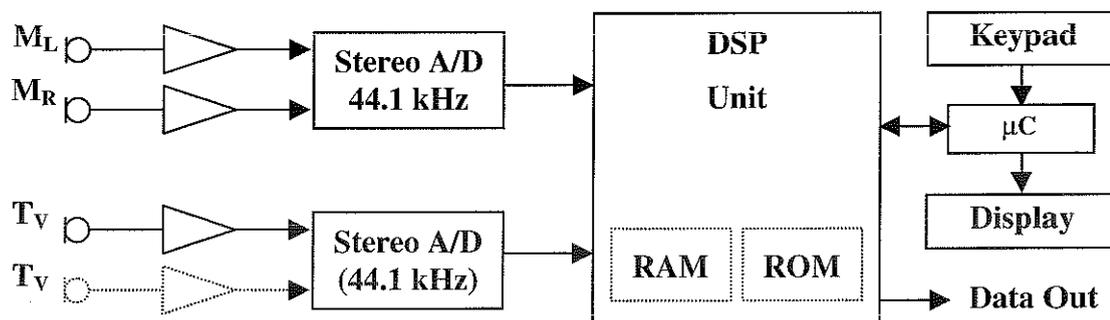


Fig. 1 – Architettura generale dello strumento

In aggiunta alla coppia di microfoni auricolari (M_L e M_R in fig. 1), necessari per il rilievo del suono di tipo binaurale, si deve considerare l’uso di un trasduttore (eventualmente due, la cui tipologia potrà essere definita in un secondo tempo) per il rilievo della voce (T_V). I segnali rivelati dai microfoni subiscono successivamente il condizionamento (attenuazione e/o amplificazione) necessario per rispettare e sfruttare completamente la dinamica di ingresso dei convertitori A/D, che sono di tipo stereofonico per applicazioni audio. Il cuore del sistema è costituito da un’unità di calcolo basata su processore DSP, completa di memoria RAM per il mantenimento dei risultati nel corso delle elaborazioni e memoria ROM per il necessario firmware di sistema. Al fine di dispensare l’unità di calcolo dalla gestione delle operazioni ingresso-uscita dalla visualizzazione e

dall'archiviazione dei dati nel corso della misura, è previsto il collegamento con un Pc host tramite interfaccia seriale.

Scelta del DSP

Il carico computazionale globalmente generato dal sistema è superiore, sia per le numerose tipologie di calcolo che per il numero di canali simultaneamente trattati, a quello offerto da un fonometro di tipo tradizionale. Per decidere quale unità di calcolo adoperare abbiamo tenuto conto dei seguenti requisiti:

- Trattamento dei segnali in banda audio (Hi-Fi qualità CD) con aritmetica fixed point ed almeno 16 bit nella dinamica dei segnali trattati;
- Velocità computazionale elevata (almeno 20 MIPS) con memoria indirizzabile interna al processore (ottimizzata per velocità di accesso e consumi) oppure RAM e ROM esterna per immagazzinamento dati e memorizzazione del firmware;
- Possibilità di interfacciamento con altri dispositivi (PC, PDA, etc..) per visualizzare, elaborare o memorizzare le successive indagini tramite porte di I/O con relativi protocolli;
- Bassi consumi dettati dalla portabilità dello strumento e costo ridotto.

Alla luce dei prodotti offerti dal mercato la scelta è stata infine indirizzata verso la famiglia Analog Devices ADSP-218X da cui abbiamo utilizzato lo Starter-Kit (ADSP-2181 EZ-KIT Lite) con sistema di sviluppo su Host-PC. Proponendoci di migliorare prestazioni, consumi e ulteriori raffinamenti nelle analisi delle misure prevediamo l'upgrade al modello superiore (ADSP-2189M): tale processore è 16 bit general-purpose con aritmetica in virgola fissa per applicazioni numeriche ad alta velocità, con prestazioni fino a 75 MIPS e consumi fino a 0.4 mA/MIPS con alimentazione a 2.5 V e rappresenta la situazione (prevista al momento) ideale per gli obiettivi del progetto.

Definizione delle specifiche

L'adozione di diversi criteri per semplificare le procedure di calcolo e rilievo fonometrico e la sua considerazione da parte delle normative possono portare facilmente a risultati insoddisfacenti sul piano valutativo e di limitata applicabilità rispetto ad individui che manifestino reazioni differenti allo stesso rumore oggettivo. Tali criteri si suddividono genericamente in tre categorie:

- Procedimenti basati sull'impiego del livello sonoro ponderato 'A'²

² Valore efficace in media logaritmica mobile della pressione sonora normalizzata espresso in dB [2]

- Procedimenti basati sull'impiego di curve di valutazione³
- Procedimenti basati sull'uso delle bande percentuali costanti⁴

I limiti di accettabilità per i valori rilevati sono generalmente fissati in termini di soglia massima che non deve essere superata in alcun modo e di soglia incrementale, rispetto al livello di fondo (rumorosità ambientale caratteristica), quale limite massimo per le emissioni delle sorgenti disturbanti. Tali valori di soglia per la rumorosità ambientale, dal punto di vista della normativa civilistica, vengono infine stabiliti in funzione della 'zonizzazione acustica' per l'area urbana interessata dalle emissioni (residenziale, commerciale, industriale etc).

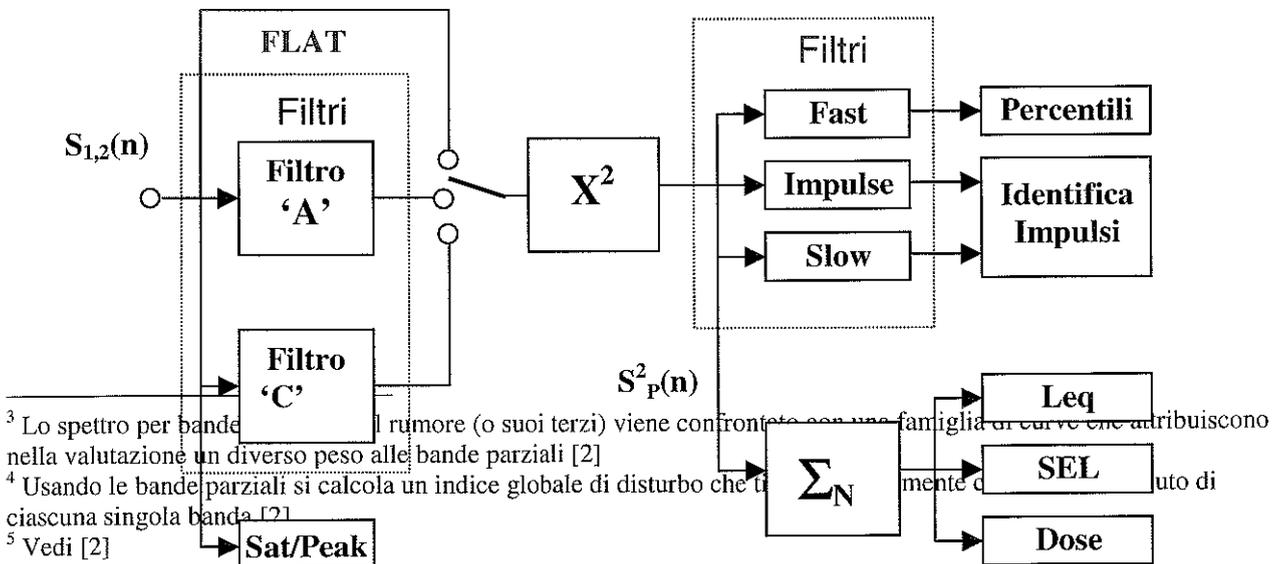
Gli indici fonometrici e i descrittori psicoacustici da noi considerati nel progetto, riservandoci di introdurre successive modifiche per ampliare la struttura logica del sistema, rendere flessibile la struttura hardware e successivamente riprogrammare il software sono questi:

- SPL, Livelli Percentili, Leq, SEL, Dose, Impulsi⁵
- Analisi in frequenza (Bande di Ottava, Terzi di Ottava, Ricerca Componenti Tonalì, ...)⁵
- Calcolo dei descrittori psicoacustici binaurali (Differenza di Livello Interaurale (IID), Ritardo Interaurale (ITD), Differenza Interaurale Spettri di Potenza, ...)⁵

Simulazione su segnali

Descriviamo i risultati delle analisi fonometriche strumentali considerate nel nostro lavoro, riportando la definizione delle diverse grandezze e la loro interpretazione secondo la recente normativa italiana: per il calcolo dei tradizionali descrittori fonometrici consideriamo nel dettaglio i blocchi relativi alla elaborazione numerica dei segnali (figura 2).

La generica successione numerica $S_i(n)$, relativa al campionamento del segnale auricolare, viene filtrata secondo una delle curve di ponderazione globale, le quali possono essere escluse attraverso



la selezione di risposta lineare 'FLAT'.

L'orientamento verso una tipologia IIR (Infinite Impulse Response) per questi filtri numerici si giustifica in virtù della successiva operazione di quadratura che determina la perdita delle informazioni di fase per il segnale in uscita dal filtro. In tal modo la caratteristica di risposta in fase non lineare del filtro IIR non influisce sulle elaborazioni successive ed inoltre si realizzano strutture di ordine inferiore rispetto all'uso dei corrispondenti filtri FIR (Finite Impulse Response). Ciascun valore della successione di ingresso viene inoltre confrontato con un valore di soglia per individuare eventuali fenomeni di saturazione all'ingresso del convertitore AD (Sat/Peak).

I valori del Livello SPL ponderato secondo le tre costanti di tempo (Impulse, Fast, Slow)[4], si ottengono come somma di convoluzione tra la successione dei quadrati $S_{2P}(n)$ e i campioni della risposta impulsiva della rete ritardatrice del primo ordine. In tal caso la scelta di una tipologia IIR per la realizzazione dei filtri è necessaria, a causa dell'elevatissimo numero di coefficienti che caratterizzerebbe i corrispondenti filtri di tipo FIR.

Il valore prodotto per il Livello SPL Fast costituisce inoltre il parametro per la determinazione dei livelli percentili, mentre i valori Impulse e Slow consentono di individuare le componenti impulsive.

La successione $S_{2P}(n)$ costituisce infine la funzione integranda per il calcolo di Livello Equivalente Continuo (Leq), Sound Exposure Level (SEL) e Dose di rumore (Dose). Tutte le elaborazioni descritte sono svolte per ciascuno dei due segnali numerici, relativi alla coppia di

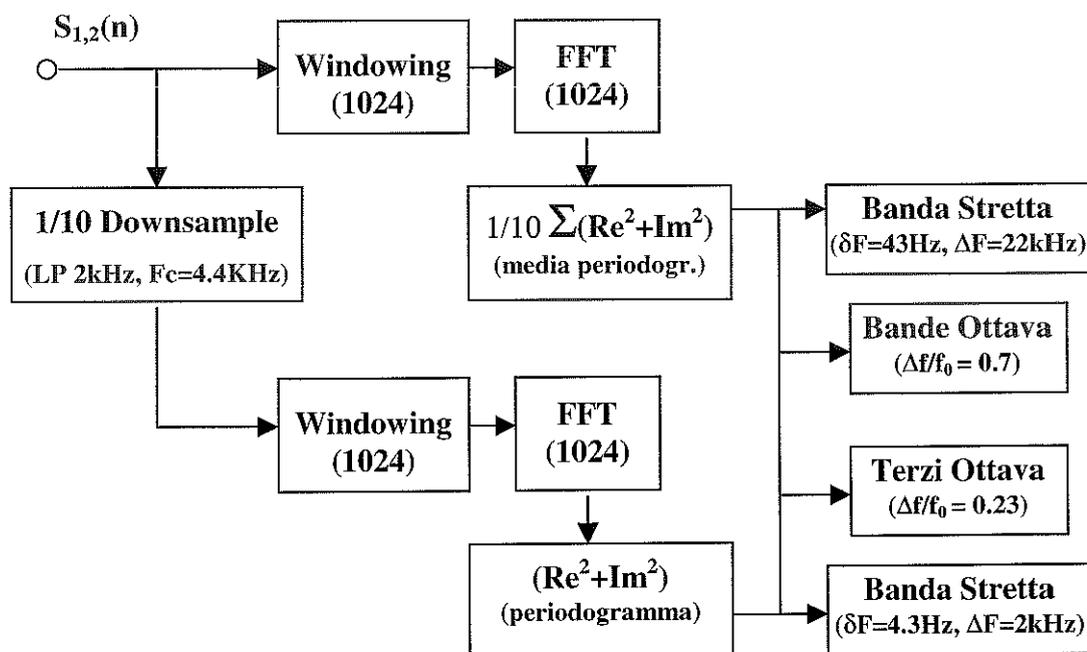


Fig.3 – Analisi in frequenza per un canale auricolare

canali microfonici auricolari. Nel dominio della frequenza i blocchi logici per il calcolo delle bande

di ampiezza costante ed ampiezza percentuale costante (Bande di Ottava e Terzi di Ottava) sono realizzati come in figura 3.

La successione $S_i(n)$, relativa al generico canale auricolare, viene trattata parallelamente per differenti porzioni dello spettro al fine di ottenere in frequenza la risoluzione non uniforme desiderata. Infatti se per frequenze molto basse interessa conoscere la distribuzione spettrale ad intervalli di pochi Hertz, per frequenze superiori è sufficiente una risoluzione meno raffinata sia per il calcolo delle bande parziali che per l'identificazione delle componenti tonali. La soluzione proposta consiste nel calcolo dello spettro del segnale tramite trasformata FFT su finestre adiacenti costituite da 1024 punti, per l'intera banda esaminata (22 kHz) e separatamente per le basse frequenze (2.2 kHz). In quest'ultimo caso si opera tramite sottocampionamento secondo un fattore 10, consistente in un filtraggio di tipo passabasso con frequenza di taglio pari a 2 kHz e successiva decimazione dei campioni, corrispondentemente ad un campionamento del segnale originale a frequenza $F'_c = 4.41$ kHz. L'operazione di Windowing, che consiste nel moltiplicare i 1024 campioni considerati con i coefficienti di una opportuna finestra ponderatrice (Hamming, Hanning, etc.), ha lo scopo di ridurre l'energia associata ai lobi laterali della semplice finestra rettangolare. La successione dei moduli al quadrato delle righe spettrali prodotte dalla FFT, per le sole frequenze positive, viene definita 'periodogramma' e costituisce una semplice stima dello spettro di potenza del segnale. Poiché vengono prodotti 10 periodogrammi su banda intera per ciascuno in banda decimata, l'operazione di media aritmetica per ogni gruppo di 10 periodogrammi (in banda piena) restituisce valori confrontabili fra i due rami e consente la successiva determinazione delle bande parziali. La stima energetica di queste ultime si ottiene come somma delle componenti spettrali rispettivamente contenute.

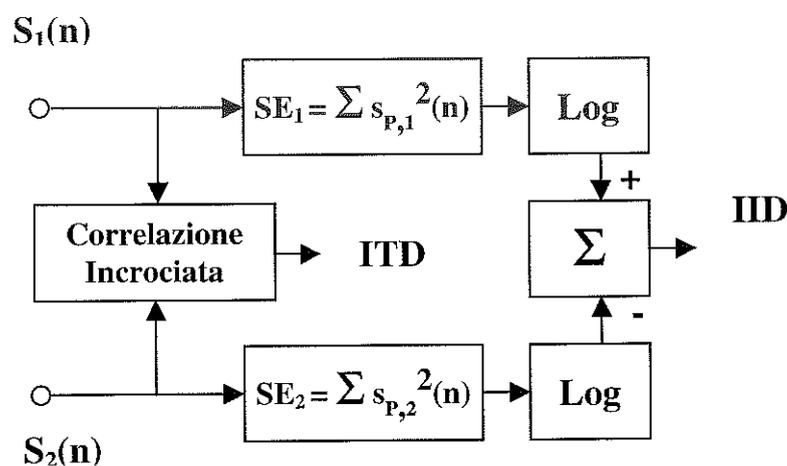


Fig. 4 – Calcolo della ITD e IID

Le componenti tonali possono essere infine individuate con precisione valutando la differenza energetica fra righe successive della banda piena (banda 22 kHz con risoluzione fra le righe pari a 43 Hz) oppure della banda decimata (banda 2.2 kHz con risoluzione di 4.3 Hz).

La stima della ITD (figura 4) può ottenersi attraverso il calcolo della funzione di correlazione incrociata fra i due segnali (operazione che sarà discussa in seguito nel dettaglio), mentre per la IID operiamo attraverso il calcolo della Sound Exposure (SE) sulle successioni numeriche $SP_i(n)$, relative ai segnali auricolari, eventualmente ponderate in frequenza secondo una delle curve globali. Il valore di IID è ottenuto infine come rapporto fra i valori di SE espresso in dB e coincide con la differenza dei valori in dB calcolati per i due canali.

Simulazione su segnali in ambiente Matlab

Sfruttando i “tools” dell’ambiente Matlab© v 5.01 per Windows© 9x, per simulare le funzioni dello strumento e studiare le modalità delle misure con gli algoritmi proposti è stata realizzata un’interfaccia grafica: costituita da un insieme di moduli, sviluppati separatamente tramite l’editor integrato, ASBI (Analisi di Segnali BInaurali)[2] visualizza l’analisi tempo-frequenza dei segnali auricolari rilevati (figura 5).

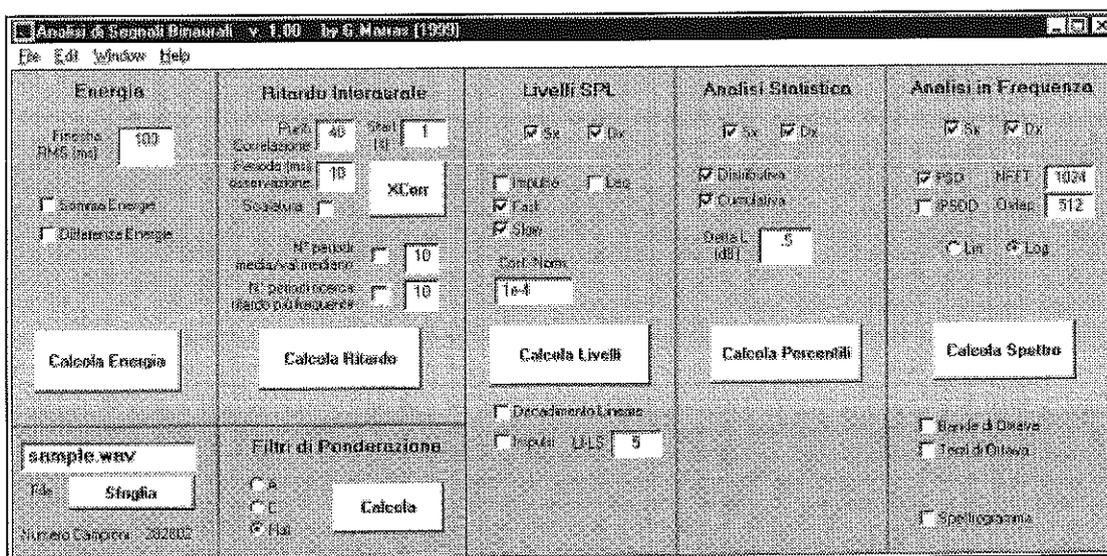


Fig.5 - Interfaccia utente

Valutazioni sui trasduttori

Nelle misure effettuate per rilevare il contributo energetico della voce del portatore abbiamo preso in considerazione alcuni tipi di trasduttori ritenuti più adatti: microfoni ad elettrete,

laringofono e accelerometro. Per ognuno sono state valutate le risposte in frequenza e la capacità di reiezione nei confronti del rumore ambientale, caratterizzandone vantaggi e peculiarità, con particolare attenzione alla modalità di posizionamento per effettuare la rilevazione, ecc.. Per una serie di considerazioni per il proseguo della sperimentazione nell'ambito dei compiti affidati all'IEI siamo giunti alla scelta del microfono a elettrete come trasduttore tenendo conto del compromesso tra l'ergonomicità della struttura, l'entità delle approssimazioni che desideriamo conseguire, il carico computazionale che siamo disposti a sopportare per migliorare la suddetta stima, etc[5] [6].

Riduzione del contributo vocale del portatore

Con riferimento all'uso di un microfono singolo collocato in prossimità della bocca per il rilievo del segnale abbiamo valutato la modalità di correzione dei descrittori energetici di lunga durata (Leq, SEL, Dose) approssimabile come differenza tra energia totale rilevata sull'orecchio e una frazione di quella rilevata sulla bocca. Data la larga variabilità del fattore α in funzione del fonema pronunciato, la strategia impiegata nella stima delle suddette misure si basa sul calcolo della Sound Exposure (SE), grandezza rappresentativa dell'energia dei segnali e utile per il calcolo di Livello Equivalente e Dose di Rumore, e sul suo confronto fra i segnali auricolare e vocale al fine di operare la correzione in caso di presenza della voce e risolvere l'eventuale inconsistenza del

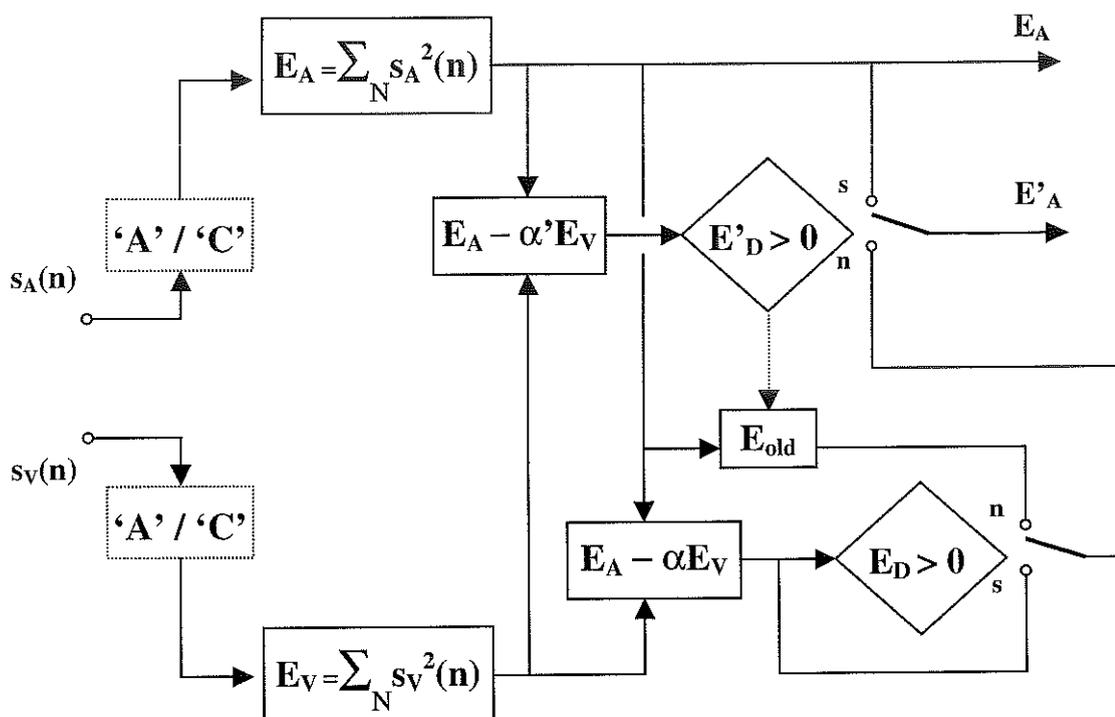


Fig. 6 - Correzione del contributo vocale

risultato (figura 6). I valori delle successioni $s_A(n)$, $s_V(n)$ relative ai canali auricolare e vocale, preventivamente ponderati in frequenza secondo una delle curve globali, sono elevati al quadrato e sommati su N termini (il cui valore sarà scelto in maniera opportuna) per costituire le SE indicate con E_A , E_V . La presenza di voce viene discriminata confrontando E_A con E_V , scalandolo opportunamente secondo la costante α' il cui valore determina la sensibilità del riconoscimento: se la differenza risulta positiva, il segnale vocale è giudicato assente o irrilevante ai fini della correzione e il valore stimato della SE (E'_A) viene posto pari ad E_A .

Nel caso contrario si opera la correzione valutando la nuova differenza $E_A - \alpha E_V$ dove α rappresenta un valore intermedio per l'attenuazione della tratta bocca-orecchio. A causa della variabilità di tale parametro quest'ultima differenza può produrre un risultato negativo evidentemente privo di significato fisico. Il parametro E'_A pertanto sarà dato dal valore della differenza positiva ovvero dall'ultimo valore della SE (E_{old}) registrato in assenza di voce.

BIBLIOGRAFIA

- [1] – Bruel & Kjaer
Manuale del Fonometro Integratore di precisione tipo 2230
Bruel & Kjaer, 1983
- [2] – Marras G., Bertini G.
ELABORAZIONE DI SEGNALI BINAURALI ED ANALISI FONOMETRICHE IN
AMBIENTE MATLAB
Atti MATLAB Conference 2000, Bologna 8/2/2000
- [3] – Franchina L., Giua P.E., Rossi P.
DOSIMETRO BINAURALE PER LE MISURE DI RUMORE
Atti XXIV Conv. Naz. AIA, Trento 12-14/6/1996, pp. 591-593.
- [4] – Harris Cyril M.
HANDBOOK OF ACOUSTICAL MEASUREMENT AND NOISE CONTROL (THIRD
EDITION)
McGRAW-HILL, 1991
- [5] – Bestini G., Marras G.
TRASDUTTORI PER RIVELAZIONE E STIMA DELLA ENERGIA DI UN SEGNALE
VOCALE IN AMBIENTE RUMOROSO
Atti XXVII Conv. Naz. AIA, Genova 26 –28/5/1999, pp. 148 – 151
- [6] – BRUEL & KJAER
MICROPHONE HANDBOOK (Volume 1)
Bruel & Kjaer, 1996