IMPLEMENTAZIONE DI UN INTENSIMETRO SU PERSONAL COMPUTER

M.Bigi, M.Jacchia

Audiomatica S.r.l. - Firenze

SOMMARIO

Viene affrontato il problema classico della misura dell'intensità acustica; si dimostra come sia possibile pervenire, in modo semplice ed elegante, al calcolo, in tempo reale, dell'intensità acustica sfruttando la potenza di un moderno processore di segnale digitale e algoritmi di calcolo efficienti; naturale ospite del sistema risulta essere un personal computer. L'obiettivo raggiunto permette implementazioni economiche, efficaci e conformi ai requisiti sui processori intensimetrici definiti nella norma IEC 1043.

1 IL PROCESSORE INTENSIMETRICO

1.1 Definizione

E' parte costituente essenziale di uno strumento per la misura dell'intensità acustica; viene usato insieme ad una sonda che rileva l'intensità per mezzo di due microfoni rigidamente accoppiati nello spazio; effettua il calcolo dell'intensità elaborando i due segnali elettrici ai suoi ingressi e presenta il risultato finale secondo quanto stabilito dalle norme accennate di seguito.
Applicazioni principali degli strumenti per la misura dell'intensità acustica sono la caratterizzazione della radiazione e la determinazione della potenza emessa da sorgenti acustiche.

1.2 La norma ISO 9614-1 [1]

Riguarda la determinazione della potenza acustica di una sorgente mediante misure "in situ" della intensità acustica in punti discreti attorno ad essa; storicamente importante perchè ha per prima delineato alcune caratteristiche richieste ai processori intensimetrici; rimanda comunque alla norma IEC 1043 [2] per ogni dettaglio specifico.

1.3 La norma IEC 1043

Riguarda tutti i requisiti di progetto e le specifiche minime che devono essere rispettate da uno strumento per la misura dell'intensità acustica; riassumiamo quelle più attinenti al progetto della parte di calcolo di un processore intensimetrico di classe 1 o 2:
requisito 1 - i valori devono essere calcolati in intervalli di un terzo d'ottava tra 50 Hz e 6,3 kHz
requisito 2 - deve operare in tempo reale
requisito 3 - deve effettuare la misura della pressione acustica onde rendere possibile la determinazione degli indicatori di campo definiti nella ISO 9614-1.

2 SOLUZIONE TEORICA

La formula che lega l'intensità acustica di un'onda sonora, in una determinata direzione, alla pressione istantanea nel punto di misura e alla proiezione della velocità delle particelle nella medesima direzione (1) può essere approssimata (2) considerando la relazione di proporzionalità che lega la velocità al gradiente di pressione nel punto (quest'ultimo approssimato da una espressione alle differenze finite).

(1) $$I_r = \overline{p} * \overline{v_r}$$ (2) $$v_r = \frac{1}{2\rho_0 \Delta r} \int (p_A - p_B) dt$$

Una possibile soluzione teorica di questo calcolo è già stata ampiamente descritta in letteratura ed implementata con successo da anni; noi ci atterremo ad uno schema descritto da Randall e Upton [3] che realizza il calcolo, in tempo reale, mediante l'applicazione di un efficiente filtraggio digitale parallelo; illustreremo poi alcuni aspetti dell'implementazione degli algoritmi di calcolo in tempo reale. Generalmente un processore intensimetrico sarà formato da una sezione di condizionamento per i due segnali analogici provenienti dalla sonda, da una sezione di calcolo in tempo reale e da una sezione ulteriore di calcolo in tempo differito nonchè di presentazione dei risultati come da schema 1.
Scendiamo nel dettaglio dei vari blocchi logici di calcolo di un processore digitale; si presuppone che i segnali analogici forniti da una sonda intensimetrica siano stati correttamente preamplificati e convertiti in forma digitale (e vedremo poi le richieste che discendono per questi stadi); la chiave della soluzione al problema sta in un efficiente metodo di calcolo delle grandezze filtrate a terzi d'ottava, normalmente severo banco di prova per qualsiasi processore. Consideriamo innanzitutto che sia necessario calcolare almeno i 22 terzi d'ottava tra 50 Hz e 6,3 kHz.
Un'approccio diretto, che esemplifica il problema ma che è del tutto sconsigliabile perchè poco efficiente e prono a notevoli imprecisioni numeriche, consisterebbe nel calcolo contemporaneo dei 22 terzi d'ottava per ciascun canale; un modo assai più efficiente (schema 2) consiste nel suddividere la banda di interesse in ottave e realizzare tre celle di filtraggio passa-banda a terzi d'ottava per calcolare i terzi relativi all'ottava di frequenza maggiore ed una cella di filtraggio passa-basso per filtrare e quindi sottocampionare il segnale di un fattore due (operazione equivalente a dimezzare la frequenza i campionamento) e memorizzarlo; così facendo il calcolo dei terzi d'ottava compresi nelle ottave inferiori alla prima può venire realizzato dalle stesse celle di filtraggio utilizzate per l'ottava maggiore ma ora applicate a campioni decimati; l'algoritmo ricorsivo che si ottiene è estremamente elegante e si può dimostrare che, per ottenere il risultato voluto, è sufficiente, tra un campione ed il successivo (soddisfacendo così il requisito di tempo reale), calcolarsi i valori dei tre terzi relativi all'ottava più alta ed i valori di tre terzi relativi ad una seconda ottava che viene selezionata di volta in volta secondo la sua frequenza; si tiene cioè conto che i campioni decimati di un fattore due dell'ottava adiacente alla prima, ma di frequenza più bassa, andranno filtrati esattamente la metà delle volte e così via sino alle ottave di frequenza più bassa; ovviamente sarà necessario realizzare il filtraggio passa-basso (e decimazione) anche della seconda ottava selezionata, per ottenere i campioni da memorizzare e da dare successivamente in ingresso alle ottave di ordine inferiore; nell'esempio mostrato vengono calcolate 8 ottave per un totale di 24 terzi.
L'aspetto più singolare del metodo è che, scelta la frequenza di campionamento in base alla larghezza di banda da analizzare, sarà possibile estendere l'analisi sulle basse frequenze semplicemente aumentando la capacità di memoria dedicata all'immagazzinamento dei

campioni decimati; inoltre non vi sarà perdita di precisione al diminuire della frequenza di intervento delle celle di filtro, problema molto sentito in approcci più tradizionali soprattutto quando realizzati con processori in virgola fissa.

3 IMPLEMENTAZIONE PRATICA

Il lavoro mira ad implementare per mezzo di un UNICO processore digitale di segnale (DSP) tutti gli algoritmi necessari per il calcolo, in tempo reale, dell'intensità acustica; *dalla complessità di questi derivano le caratteristiche richieste al DSP.*
Elenchiamo di seguito svariati aspetti di progetto di una nostra realizzazione oggetto di studio e prototipazione.

3.1 Requisiti di precisione ed algoritmi

Il processore utilizzato dispone di architettura in virgola fissa a 16 bit, con possibilità di accumulo interno sino a 40 bit.
Per quanto riguarda il semplice calcolo della pressione acustica si è deciso di puntare ad una precisione di 14 bit e ad una corrispondente gamma dinamica di almeno 80 dB. Gli algoritmi dei filtri passa-banda a 1/3 di ottava utilizzati sono dei Tchebyshev del sest'ordine; l'implementazione mediante tre celle biquadratiche. Il filtro passa-basso è invece stato realizzato con un dodicesimo ordine di Butterworth tramite sei celle biquadratiche. La massima velocità di esecuzione di una cella di filtraggio è, in una implementazione in tempo reale, l'obiettivo principale; nonostante ciò si è privilegiata la precisione numerica dell'implementazione tramite biquadratiche, più lenta della fattorizzazione diretta, onde limitare gli errori di quantizzazione dei coefficienti di filtro (necessariamente a 16 bit) e gli errori di accumulo dovuti alla ricorsività degli algoritmi.
Un accenno alla precisione di accumulo della media dei valori di pressione ed intensità in uscita dal DSP verso le sezioni di calcolo in tempo differito implementate sul PC; questa grandezza limita il tempo massimo per il quale è possibile effettuare la media; si è scelto un accumulo in virgola fissa e tripla precisione (48 bit).

3.2 Requisiti di velocità

Normalmente sono il fattore più limitante in una realizzazione di questo genere; per valutare la velocità di esecuzione richiesta al DSP cercheremo di suddividere il lavoro complessivo di calcolo in una serie di operazioni elementari per le quali siamo in grado di esprimere il numero necessario di cicli macchina nei quali vengono eseguite; con ciclo macchina si intende il tempo nel quale il DSP esegue una istruzione macchina.
Facendo riferimento alla tabella 1 abbiamo identificato le seguenti operazioni: filtro a 1/3 d'ottava, filtro passa basso, calcolo della media della pressione, calcolo della media dell'intensità, selezione dell'ottava, operazioni di sistema; per ciascuna operazione sono indicati i cicli macchina e le volte che viene eseguita.
Per esempio una cella di filtraggio 1/3 d'ottava impiega 8 cicli per biquadratica più quattro cicli (quindi 8x3+4) e viene ripetuta sei volte (l'ottava più alta e quella di volta in volta selezionata) per due canali e quindi per dodici volte; in totale si impiegano 336 cicli macchina per realizzare il filtraggio a 1/3 d'ottava.
Come si vede il gran totale dei cicli richiesti per la nostra implementazione è di 984; dovendo rispettare il tempo reale queste operazioni devono essere fatte tra un campione del segnale ed il successivo, quindi in un intervallo di tempo reciproco della frequenza di campionamento.
La frequenza di campionamento scelta è di 25.6 kHz che permette agevolmante l'analisi

del terzo d'ottava centrato a 8 kHz; seguendo l'esempio mostrato verranno calcolati 24 terzi sino a quello centrato a 40 Hz; l'intervallo di campionamento sarà quindi di circa 40 μS.
Considerando infine la velocità richiesta al DSP otterremo che il ciclo macchina dovrà essere minore di circa 40 nS ovvero una frequenza di lavoro di almeno 25 MHz; nella nostra implementazione, per avere sufficienti margini di sicurezza, è stato utilizzato un processore capace di lavorare sino a 33 MHz.

3.3 Requisiti di memoria

Di nuovo facendo riferimento alla tabella 1 vediamo, per ciascuna operazione, i requisiti in termini di parole di memoria richieste (le parole sono di 16 bit).
Per esempio ogni cella di filtraggio a 1/3 d'ottava richiede 8 locazioni di memoria per immagazzinare i campioni precedenti all'attuale; vengono calcolati un totale di 48 terzi per cui sono necessarie 384 locazioni di memoria.
Il gran totale di memoria richiesto per l'immagazzinamento dei dati è di 912 parole a 16 bit; a questa "memoria dati" si affiancherà una memoria cossiddetta "memoria programma" che conterrà i codici macchina delle istruzioni ed anche i coefficienti di filtro calcolati off-line; la memoria sarà tutta contenuta all'interno dello stesso chip del DSP.
Come si vede i requisiti di memoria di questa applicazione sono minimi; nella nostra implementazione è stato utilizzato un DSP con capacità di memoria interna di 1k di parole "dati" e 2k di parole "programma"; sono comunque disponibili processori con quantità di memoria "on-chip" decisamente superiori.
Un accenno al "bootstrap" del DSP ovvero alla sua inizializzazione; all'atto dell'accensione il PC provvederà al trasferimento del firmware di sistema (memorizzato sul disco fisso) attraverso il bus di comunicazione verso la memoria programma interna al DSP; il DSP, sino a quel momento tenuto nello stato di "reset" sarà quindi lasciato libero di eseguire il programma contenuto nel firmware.

3.4 Possibile struttura del processore intensimetrico

La più semplice struttura hardware che consegue dalla discussione fatta risulta sicuramente essere quella descritta nello schema 1: ipotizzando un personal computer ospite (come, per esempio, un PC-IBM o compatibile dotato di uno slot di espansione standard ISA) è possibile realizzare una scheda ove alloggino un singolo DSP per effettuare tutti i calcoli descritti, un CODEC bicanale per la conversione analogico digitale ed il condizionamento del segnale e pochi altri circuiti di interfaccia con il PC.
Tutti gli algoritmi descritti verranno implementati come firmware del DSP, mentre il software di sistema girerà in ambiente standard PC e provvederà a tutti i calcoli in tempo differito, all'interfaccia utente ed alla presentazione dei risultati.

CONCLUSIONI

Il lavoro mostra come sia possibile realizzare un processore intensimetrico, che soddisfi i requisiti più stringenti della norma IEC 1043, mediante un'approccio hardware/software semplice ed elegante.
E' precisa convinzione degli autori che debba essere intrapreso ogni sforzo volto alla semplificazione ed alla razionalizzazione degli strumenti per la misura dell'intensità acustica finalizzato ad un progressivo abbattimento dei costi e del prezzo all'utente finale.

BIBLIOGRAFIA

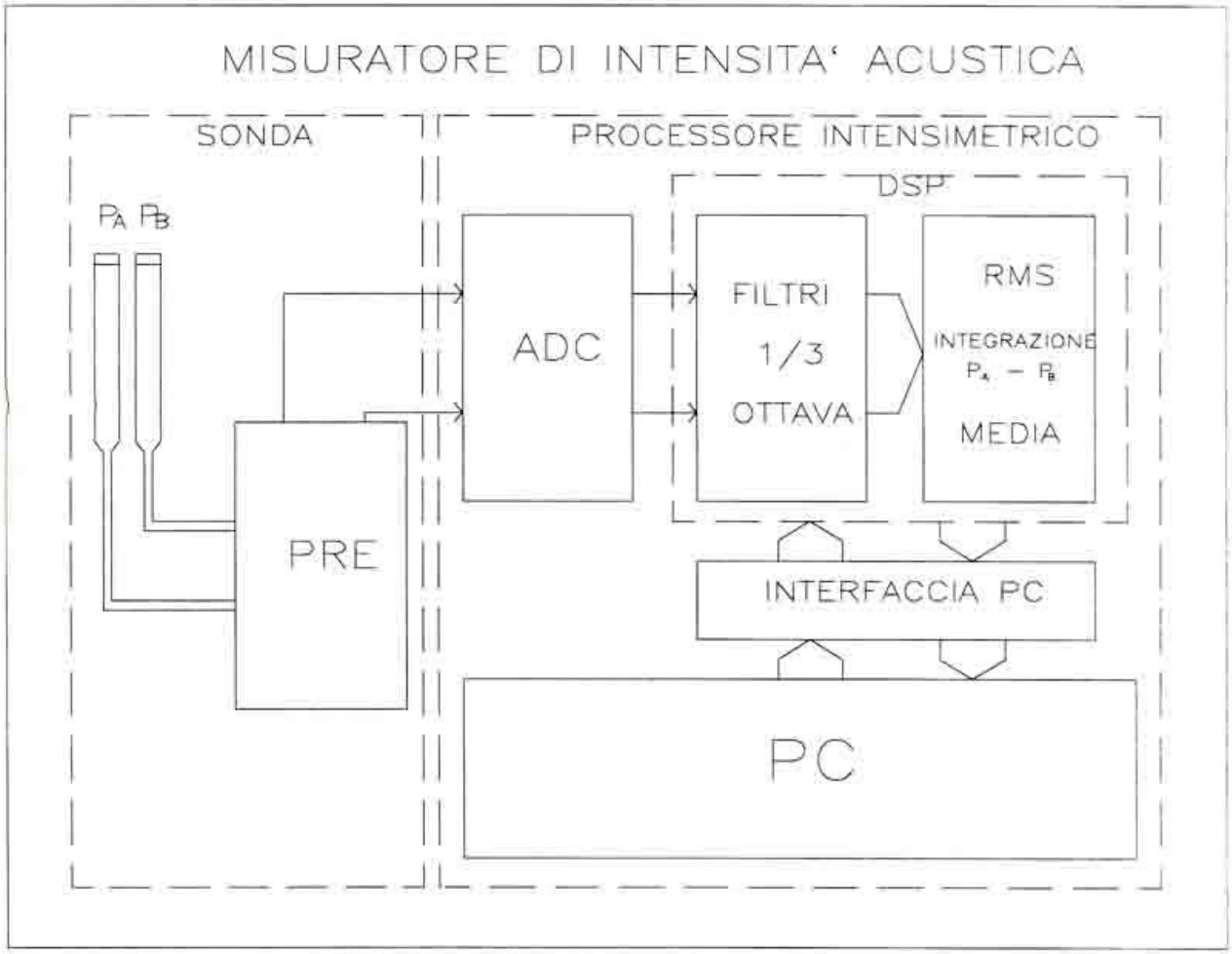
[1] ISO 9614-1: 1993, Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 1: measurement at discrete points.

[2] IEC 1043: 1993, Electroacoustics - Instruments for the measurement of sound intensity - Measurement with pairs of pressure sensing microphones.

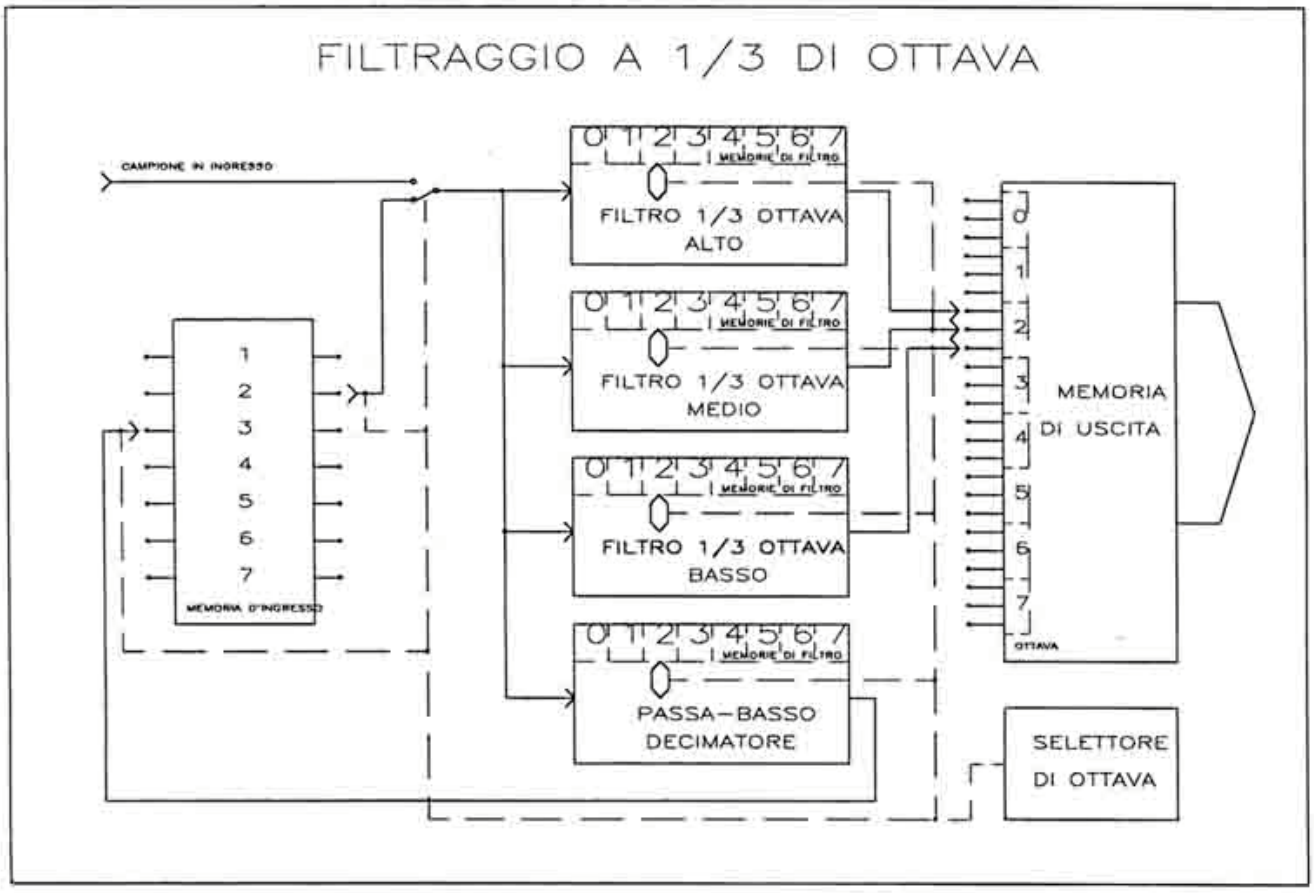
[3] Randall R.B., Upton R., "Digital filters and FFT technique in real-time analysis", Bruel&Kjaer TR 1, 1978.

[4] Roth O., "A sound intensity real-time analyzer", Senlis Congress on Sound Intensity, October 1981.

[5] Analog Devices, "Digital signal processing applications using the ADSP-2100 family", Prentice Hall, 1990.



Schema 1



Schema 2

	CICLI	RIPETIZIONI	TOT.CICLI
FILTRO 1/3	8x3+4=28	6x2=12	336
FILTRO PB	8x6+4=52	2x2=4	208
P	15	6x2=12	180
I	30	6	180
SEL.OTT.	20	2	40
SISTEMA	40	1	40
TOTALE CICLI MACCHINA			984

	PAROLE	TERZI	OTTAVE	TOT.PAROLE
FILTRO 1/3	8	24x2=48		384
FILTRO PB	14		8x2=16	224
P	3	24x2=48		144
I	3+3	24		144
SEL.OTT.	1		8x2=16	16
TOTALE MEMORIA DATI				912

Tabella 1