Valutazione del decadimento della risposta in frequenza di un acquisitore per microtremori

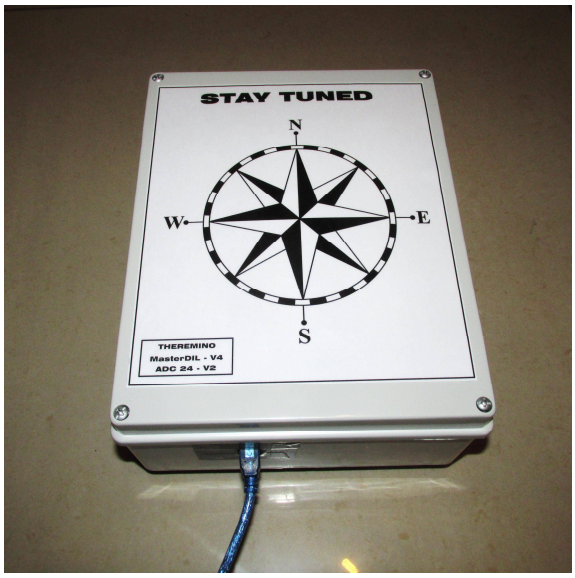
rev. 01

Si descrivono le fasi di valutazione del decadimento della risposta in frequenza di un acquisitore a 3 canali mediante elaborazione del segnale acquisito da canali con geofoni e quello da canali con accelerometri. I sensori oggetto di valutazione sono quelli orizzontali e il moto nel piano orizzontale è stato imposto mediante tavola vibrante su banco.

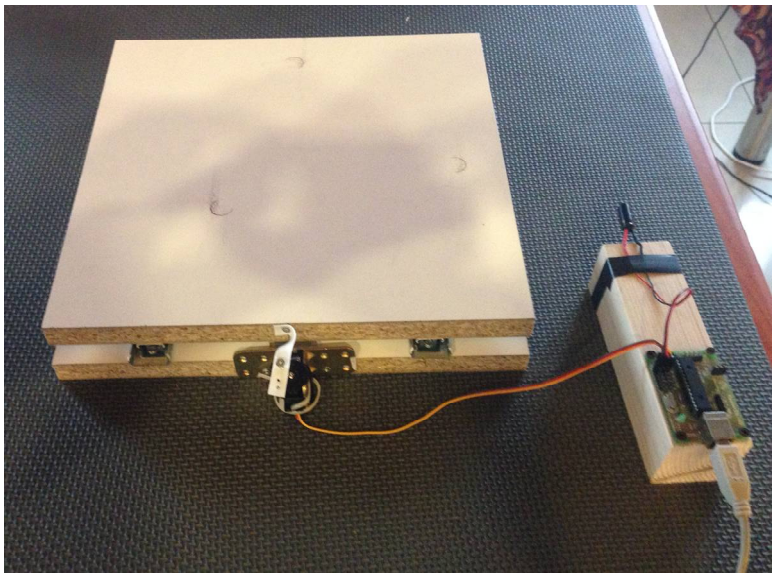
Per l'acquisitore si rimanda alla precedente nota di costruzione dello strumento con Theremino Master e ADC24. Per la tavola vibrante (strumento con movimento monodirezionale di un piano secondo una forma d'onda assegnata) si rimanda alla relativa precedente nota di costruzione.

Si ringraziano gli sviluppatori di Theremino e di Dolfrang per gli proficui scambi di opinioni durante la fase di valutazione dei risultati.

1 – STRUMENTI



1 acquisitore con Theremino Master e ADC24,
avente 3 canali con geofoni da 4.5Hz e 6 canali con accelerometri (LIS344)



1 tavola vibrante

2 – PARTICOLARI SULLA STRUMENTAZIONE E IMPOSTAZIONE DELLA CAMPAGNA DI MISURE

L'acquisitore "Stay Tuned" ha i seguenti sensori per le misure di confronto:

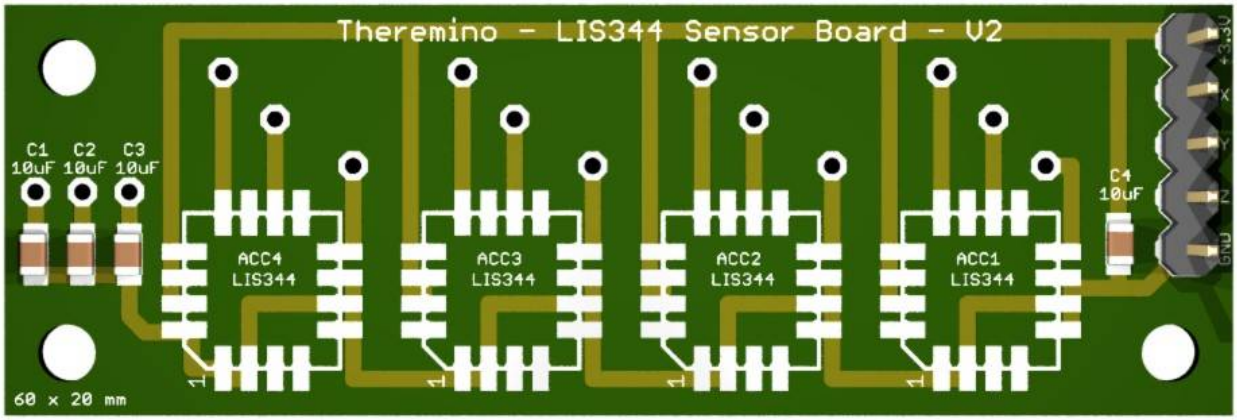
- 3 canali con geofoni collegati per misure in differenziale all'ADC24;
- 6 canali con accelerometri collegati per misure in pseudo-differenziale all'ADC24.

Il singolo geofono presenta un condensatore ceramico SMD da 4.7μF saldato ai poli di interfaccia del sensore.

I collegamenti tra i sensori e l'ADC24 sono realizzati con cavi schermati autocostruiti.

I cavi per i geofoni sono realizzati mediante intreccio della coppia di cavi relativi al singolo sensore, schermatura per avvolgimento con nastro di rame adesivo, collegamento a GND della carcassa cilindrica del geofono e dell'avvolgimento, rivestimento dell'insieme del cavo con guaina plastica termorestringente. Quindi ogni geofono è collegato all'ADC24 con 3 contatti: 2 per la misura in differenziale e 1 per il collegamento a GND.

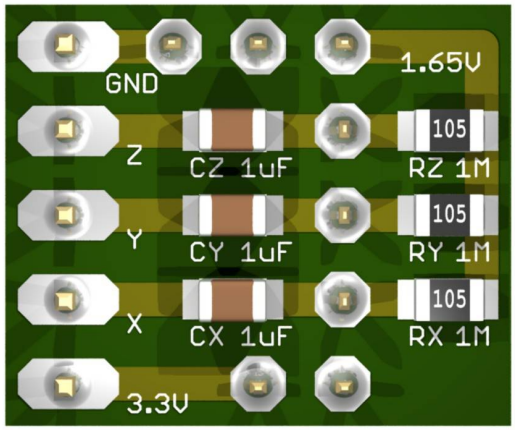
I primi 3 canali con accelerometri utilizzati per le misure per confronto sono relativi ad un singolo sensore LIS344, montato secondo le indicazioni contenute nelle relative pagine del sito di Theremino per il modulo con 4 accelerometri (sul quale è stata utilizzata una sola posizione)



modulo con LIS344 (http://www.theremino.com/hardware/inputs/accelerometers)

L'alimentazione del modulo è 3.3V presa sull'apposito PIN del Master. Il collegamento a GND del modulo è sull'ADC24. I cavi di collegamento dal modulo all'ADC24 sono anch'essi intrecciati, complessivamente schermati con collegamento a GND della schermatura e rivestiti da guaina plastica termorestringente.

Per completamento dell'attività di misura e per prova di un altro tipo di hardware sono stati utilizzati altri 3 canali con accelerometri in misura pseudo-differenziale mediante collegamento ad un secondo modulo con 4 accelerometri LIS344 in parallelo, connesso all'ADC24 mediante l'adattatore descritto nelle stesse pagine del sito di Theremino



adattatore per modulo con LIS344

Anche in questo caso i cavi di segnale sono intrecciati, schermati e collegati a GND.

Entrambi i moduli descritti sono fissati ad una basetta in PLA (parallelepipedo avente dimensioni in pianta pari al modulo e altezza 1.0cm, realizzato con stampante 3D), a sua volta incollata con resina epossidica alla piastra metallica dell'acquisitore.

Infine, per quanto riguarda l'ADC24, il numero complessivo di collegamenti è:

- 6 di segnale per le misure in differenziale dei geofoni + 3 collegamenti a GND delle schermature dei cavi,
- 3 di segnale per le misure in pseudo-differenziale per il modulo con singolo accelerometro + 1 collegamento a GND per la schermatura,
- 5 sui pin di segnale per le misure in pseudo-differenziale con l'adattatore (che svolge la funzione di filtro integratore), oltre ai collegamenti a GND per la schermatura e quello per la tensione a 1.65V;

per un totale di 14 collegamenti sui PIN di misura (terza fila dell'ADC24) sui 16 disponibili.

Si noti che nel seguito del testo non si illustrerà l'analisi dei risultati dell'hardware con 4 accelerometri in parallelo, in quanto i risultati sono ancora oggetto di valutazione in relazione al rapporto segnale/rumore. Pertanto il confronto in descrizione si riferisce ai risultati da geofoni e dal modulo con un solo accelerometro, che sono anche componenti di facile reperibilità e di semplice costruzione.

Per quanto riguarda la tavola vibrante "Shake Table" essa si interfaccia al computer mediante distinta scheda Theremino Master, sulla quale è collegato anche un condensatore elettrolitico 1000μF 10V sui PIN immediatamente successivi a quelli di collegamento per il servo

condensatore utilizzato

al fine di sopperire alle sporadiche variazioni di tensione che potrebbero capitare sull'alimentazione da linea USB, interrompendo il funzionamento del servo. Quindi la gestione del movimento avviene per via numerica mediante l'elettronica di interfaccia al computer.

3 – SOFTWARE

Per controllare i 2 strumenti “Stay Tuned” e “Shake Table” l’applicazione è unica:

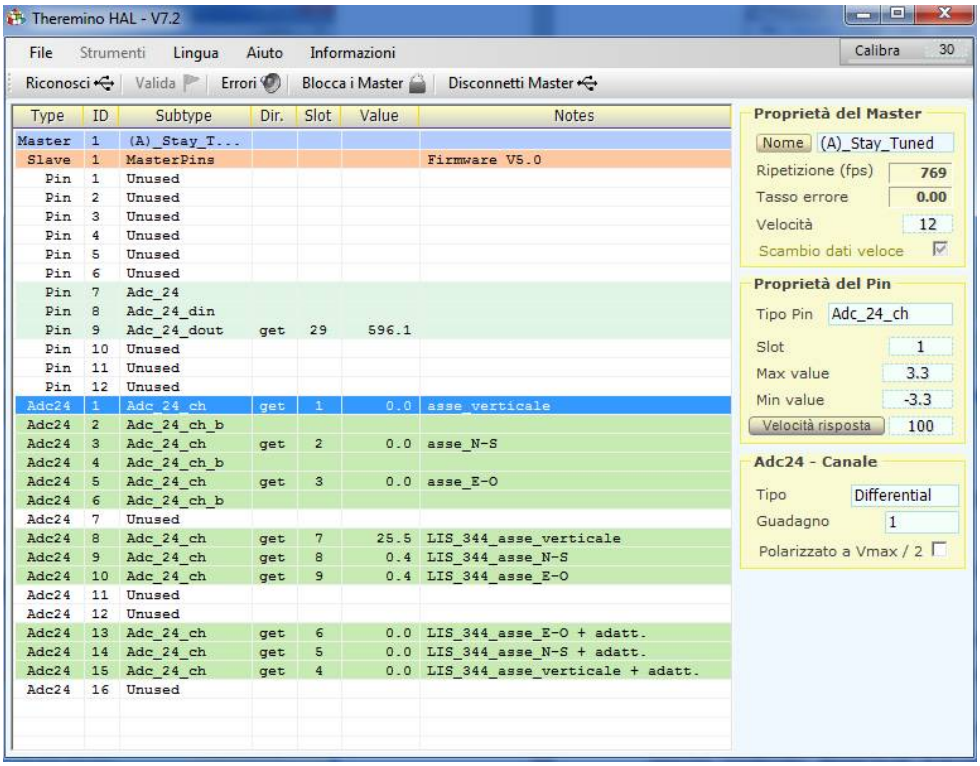
- **HAL** versione 7.2

Per generare il moto con la “Shake Table” l’applicazione è:

- **WaveGenerator**, versione 1.5

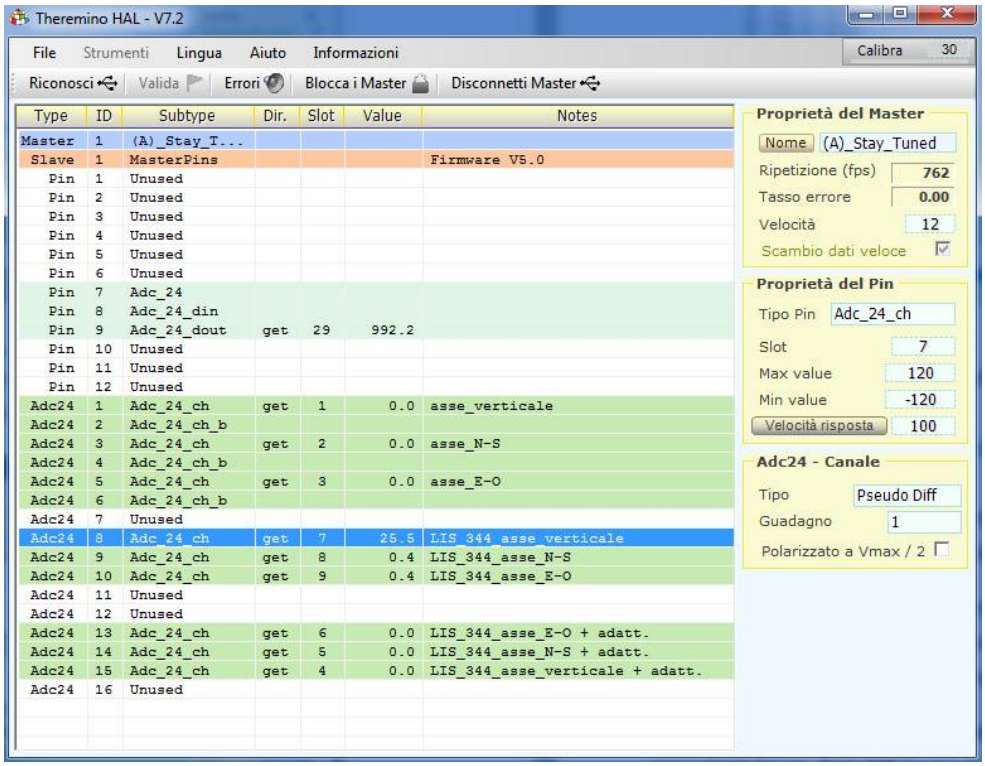
Entrambe sono disponibili liberamente sul sito di Theremino, compresi gli aggiornamenti.

Le impostazioni di **HAL** sono le seguenti:

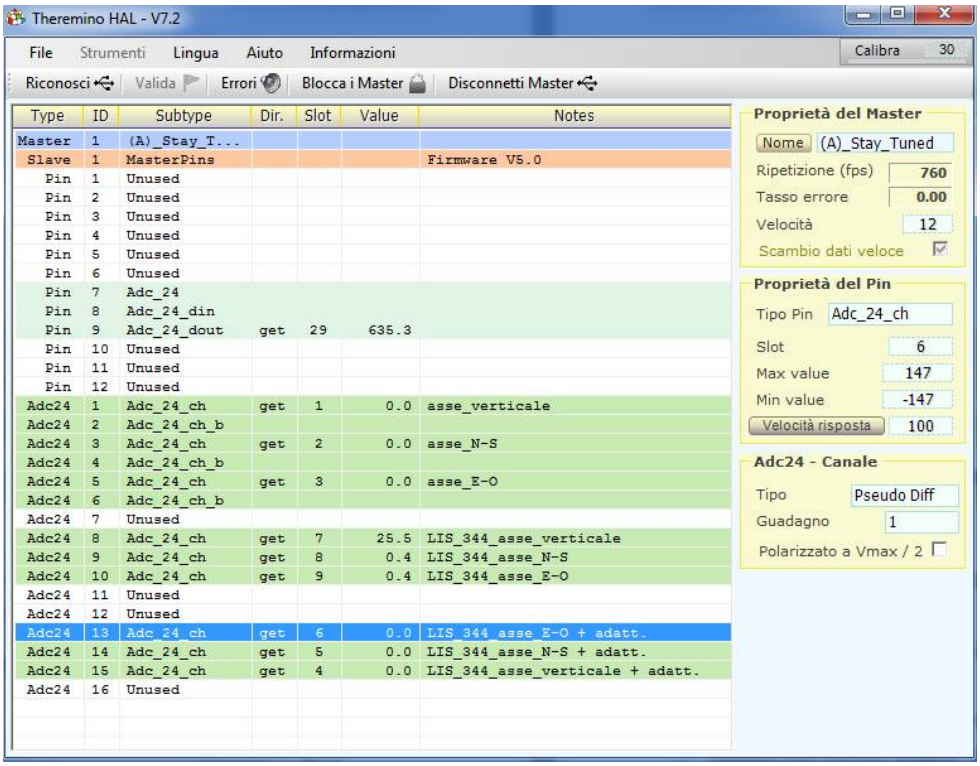


parametri per il canale A della misura in differenziale per il geofono.

Il canale B presenta il segno di spunta per “Polarizzato a Vmax/2”.



parametri per la misura pseudo-differenziale per il modulo con singolo accelerometro



parametri per la misura pseudo-differenziale per il modulo con 4 accelerometri

Gli slot utilizzati dai canali di acquisizione sono 9:

- geofoni: slot da 1 a 3,

- modulo con LIS344 multipli ed adattatore: slot da 4 a 6,
- modulo con LIS344 singolo: slot da 7 a 9.

L'ordine di numerazione degli slot segue la consueta convenzione per l'ordine degli assi di misura (verticale, Nord-Sud, Est-Ovest). L'associazione PIN-slot è correlata alla fisica connessione del collegamento elettrico sull'ADC24. Le figure sono esplicative a riguardo e le scelte sono rappresentative delle potenzialità di HAL nell'associazione PIN-slot.

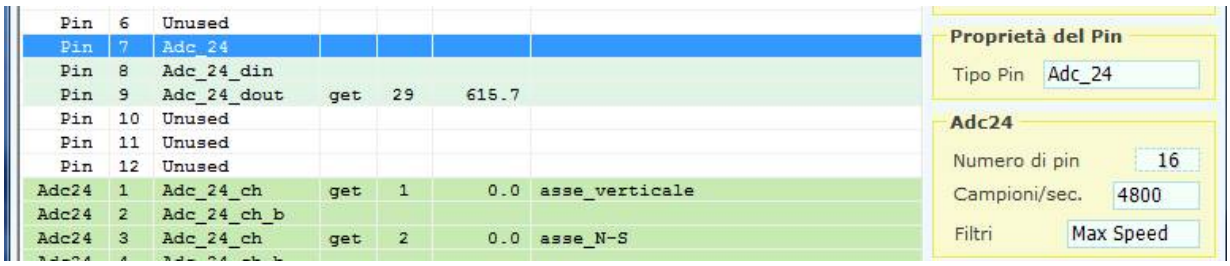
Si presti attenzione allo slot associato al PIN 9 del Theremino Master, come visibile nelle precedenti figure. Tale PIN è uno dei 3 (7, 8 e 9) sui quali c'è il collegamento tra Master e ADC24. Quale normale impostazione di default al PIN 9 è associato lo slot 9, con evidente conflitto con lo slot associato ad un canale di misura per il modulo con LIS344 singolo (nel caso qui illustrato il canale Est-Ovest del modulo con LIS344 singolo). Ebbene non è indispensabile che il PIN 9 del Master sia associato proprio allo slot 9 affinché il collegamento tra Master e ADC24 funzioni: è possibile variare tale numero di slot. Nel caso in illustrazione è stato associato allo slot 29, per lasciare continuità di numerazione agli slot, come sarà chiaro nel seguito illustrando l'utilizzo del software di acquisizione.

Tutti i canali sono impostati con guadagno pari a 1 (uno). Volutamente diversi e variegati sono i valori relativi alle variabili "Max value" e "Min value" di ogni singolo canale, come illustrato nella tabella seguente

			Max Value	Min Value
Geofoni	Verticale	1	3,3	-3,3
	Nord-Sud	2	+3,3	-3,3
	Est-Ovest	3	+3,3	-3,3
LIS344 con adattatore	Verticale	4	+120	-120
	Nord-Sud	5	+173	-173
	Est-Ovest	6	+147	-147
LIS344 senza adattatore	Verticale	7	+120	-120
	Nord-Sud	8	+173	-173
	Est-Ovest	9	+147	-147

Si ricorda che tali valori hanno solo effetto sulla scala di visualizzazione del segnale sul quel dato canale. I valori qui scelti sono stati valutati in base ai risultati di una serie di prove, al fine di avere un valore comune di visualizzazione su una determinata frequenza. In fase di analisi dei risultati, trattandosi di scale di tipo lineare, verranno ricondotti a valori omogenei e confrontabili, senza alterare la forma d'onda acquisita.

Sul PIN 7 del Theremino Master, associato al collegamento con l'ADC24, la configurazione è la seguente



parametri per il PIN 7 del Theremino Master

Collegando ad altra USB la seconda scheda Theremino Master, associata alla Shake Table, **HAL** riconosce il secondo distinto componente e mette a disposizione dell'utente una dedicata sezione per l'associazione PIN-slot.

Nel presente studio al PIN 1 è stato associato lo slot 10, configurato come Servo16 con Max Value pari a 1000 e Min Value pari a 0, velocità di risposta deselezionato e valore 100. Per quanto riguarda i tempi si sono scelti Tempo max = 1500 e Tempo min = 900 dopo prove per regolare l'escursione del servo.

In **WaveGenerator** occorre impostare:

Waveform: scelta della forma d'onda, ossia Sinusoidal;

Output Slot: quello definito in HAL correlato al PIN di connessione al servo, ossia 10;

Amplitude: valore imposto pari a 300, ossia tale da avere un rapporto segnale/rumore significativo;

Constant speed: flag attivo;

Frequency: la frequenza della forma d'onda da indurre nel moto della Shake Table;

Min. Freq.: valore pari a Frequency, per la massima escursione.

Per registrare il segnale dall'acquisitore l'applicazione è:

- **Dolfrang**, versione 5.3

con parametri descritti nel seguito.

Per l'analisi della risposta in frequenza dei segnali acquisiti l'applicazione è:

- **Geopsy**

attualmente disponibile anche nella versione per sistemi a 64 bit. I risultati sono stati controllati con distinta analisi condotta in ambiente **Scilab**.

La comparazione dei risultati in termini di risposta in frequenza è stata svolta con l'ausilio di un comune foglio elettronico.

4 – IMPOSTAZIONE DEL CONFRONTO TRA LE MISURE DI SENSORI DIVERSI MA RIFERITI ALLO STESSO INGRESSO

Nel seguito alcune figure sono tratte dalla tesi di Laurea Magistrale di Michael S. Hons "Seismic sensing: Comparison of geophones and accelerometers using laboratory and field data" del 2008, reperibile su internet.

Rimandando al testo per gli approfondimenti, si riassumono gli aspetti salienti della sperimentazione da impostare e condurre.

I geofoni e gli accelerometri sono sensori che descrivono in maniera diversa lo stesso fenomeno oggetto di misura, ossia il moto. In ragione delle modalità costruttive di ciascun sensore e dell'analisi della risposta, il geofono fornisce un segnale in termini di velocità e l'accelerometro in termini di accelerazione. Nel seguito si illustrerà un significato di tali affermazioni.

Da un punto di vista matematico il legame tra ingresso e uscita di uno strumento di misura si può esprimere <u>nel dominio delle frequenze</u> come

$$B(\omega) = H(\omega) \cdot A(\omega)$$

dove:

ω è la frequenza, $B(\omega)$ è l'uscita, $A(\omega)$ è l'ingresso e $H(\omega)$ è detta <u>funzione di trasferimento</u>.

Per un sistema dinamico <u>la funzione di trasferimento è una funzione che caratterizza il comportamento di un sistema dinamico tempo-invariante nel dominio delle frequenze</u>, <u>mettendo in relazione l'ingresso e l'uscita</u>. Può essere definita per descrivere sia sistemi lineari che non-lineari.

L'osservazione principale che sta alla base della sperimentazione per confronto è che i sensori misurano in maniera diversa lo stesso fenomeno in ragione della peculiarità del sensore riferita ad una certa caratteristica del moto.

Per focalizzare tale osservazione si faccia riferimento alla figura seguente, dove si mettono a confronto i modelli matematici del comportamento di un geofono (la parte in alto della figura) e di un accelerometro (la parte in basso della figura). Per ogni parte di figura la prima colonna da sinistra illustra il segnale in ingresso nel dominio del tempo in termini di spostamento – velocità – accelerazione (figure dall'alto verso il basso). La terza colonna mostra il segnale in uscita nel dominio del tempo, che, considerando un certo sensore, è il medesimo poiché il moto è lo stesso pur descritto in maniera differente. La colonna centrale evidenza la forma della funzione di trasferimento nel dominio delle frequenze.

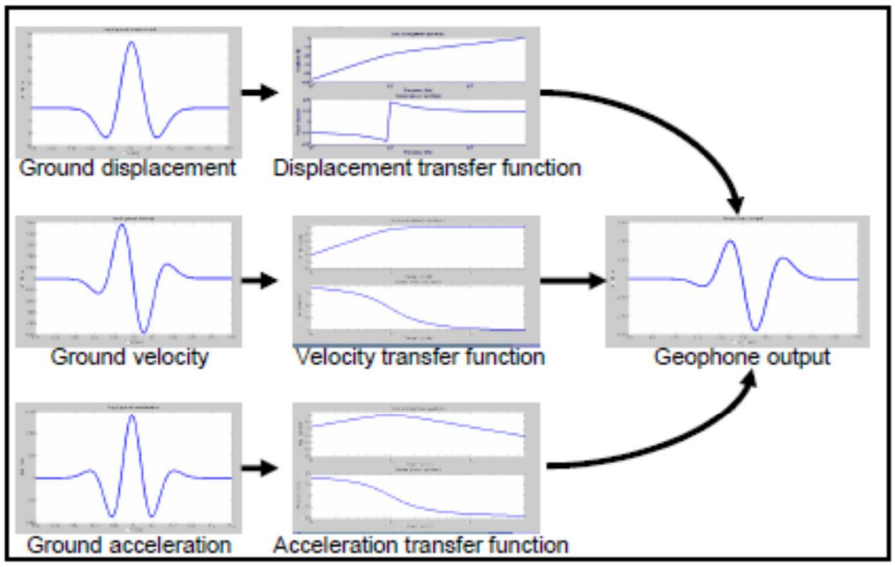


FIG 2.2. For a single ground motion, as long as each domain of ground motion is input to its appropriate transfer function, the output from a geophone is always the same.

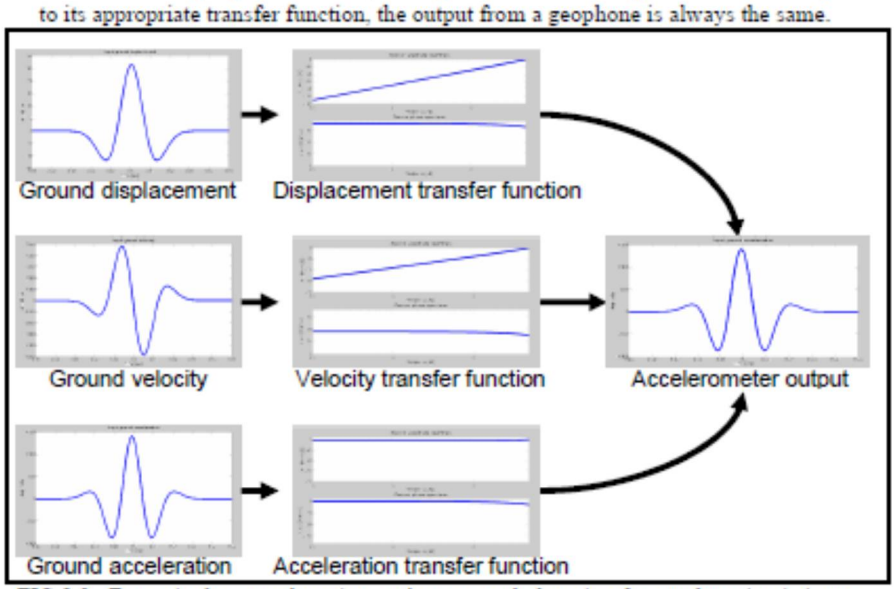
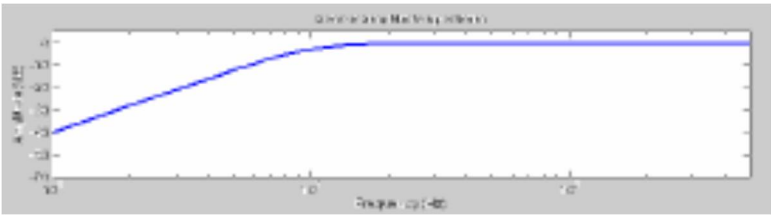


FIG 2.3. For a single ground motion, as long as each domain of ground motion is input to its appropriate transfer function, the output from an accelerometer is always the same.

Ricapitolando, la parte in alto della figura illustra il comportamento di un geofono: a parità di segnale in uscita lo strumento potrebbe descrivere l'ingresso in 3 diversi modi (spostamento, velocità ed accelerazione del fenomeno moto) in ragione di 3 distinte funzioni di trasferimento. Ebbene osservando la forma della funzione di trasferimento per la descrizione della velocità del moto si osserva che la risposta in frequenza in termini di modulo, richiamata nella figura seguente



ha un andamento orizzontale a partire da una certa frequenza e un decadimento al di sotto di essa.

Quindi, partendo dalla forma del segnale in uscita (che è la misura in termini di Volt sul sensore e che è oggetto di un campionamento), solo in termini di velocità si ha una significativa corrispondenza con la forma del segnale in ingresso, in generale per un fattore di scala e con un decadimento a partire da un certo valore in frequenza. Il decadimento ha un andamento lineare (in un piano log-log) al di sotto di una certa frequenza e un tratto di raccordo non rettilineo (più o meno pronunciato, talvolta in ragione del valore di smorzamento del sensore).

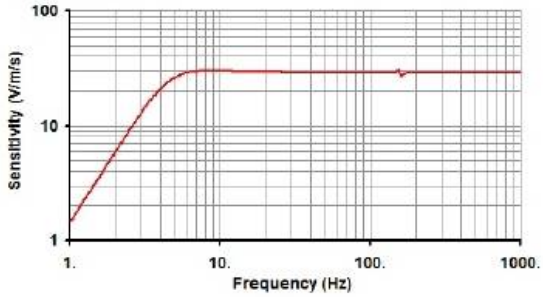
Osservando la parte in basso della figura composta precedente, nel caso di un accelerometro è in termini di accelerazione che si osserva un andamento orizzontale del modulo della funzione di trasferimento con considerazioni simili alle precedenti.

Quanto esposto è una spiegazione in termini di modello matematico dell'associazione tra geofono e velocità del moto e tra accelerometro e accelerazione del moto medesimo.

Inoltre, pur riconoscendo che sotto certe ipotesi è possibile valutare l'espressione analitica delle varie funzioni di trasferimento per un certo sensore, è necessario ritenere che il sensore reale non può non risentire delle caratteristiche costruttive, rendendo arduo enumerare compiutamente tutti i parametri necessari per una definizione della particolare funzione di trasferimento. Da questo derivano le prove di laboratorio della risposta in frequenza del sensore, che lo caratterizzano nel caso sia necessario recuperare nel dominio delle frequenze le parti di risposta soggette a decadenza mediante equalizzazione del segnale in uscita.

Riassumendo, da un punto di vista applicativo i sensori geofono ed accelerometro manifestano differenze di comportamento:

- in termini di descrizione di velocità del moto il geofono ha un decadimento della risposta in frequenza a partire da un certo valore, come illustrato dalla figura seguente relativa alle misure industriali su banco di un sensore di questo tipo



- in termini di accelerazione del moto l'accelerometro (qui utilizzato il LIS344, accelerometro inerziale MEMS) ha una risposta in frequenza costante anche nel tratto in cui il geofono manifesta decadimento della risposta.

Inoltre si aggiunge che il geofono manifesta un rapporto segnale/rumore significativo anche in presenza di segnali in ingresso di ridotta ampiezza, mentre il tipo di accelerometro utilizzato richiede un segnale in ingresso di ampiezza significativa per poterne apprezzare la risposta in ragione del rumore, ossia dell'insieme di segnali indesiderati che si sovrappongono al segnale utile.

L'idea di fondo che sta alla base del confronto numerico dei segnali in uscita dei 2 sensori è quello di confrontare nel dominio delle frequenze il comportamento del geofono con quello dell'accelerometro, constatandone per quest'ultimo la costanza della risposta in frequenza in termini di accelerazione e tenendo conto della necessità di un segnale in ingresso di ampiezza significativa.

Essendo noto il relativo comportamento nell'intervallo delle basse frequenze e constatando il decadimento del geofono in tale intervallo, si vuole ricavare la curva di equalizzazione (ossia la risposta in frequenza del geofono) dal rapporto numerico dell'analisi in frequenza della risposta dei 2 sensori, inseriti nella meccanica di un medesimo acquisitore, soggetti ad un moto sinusoidale di frequenza ed ampiezza imposti.

Questa valutazione consente:

- mediante la curva di equalizzazione si ha la misura dell'amplificazione da imporre a parti della risposta in frequenza per recuperare le perdite di ampiezza dovute al decadimento della risposta del sensore geofono;
- svolgere un primo riscontro di eventuali anomalie nel comportamento dei sensori.

Da un punto di vista matematico, avvalendosi di alcune parti tratte dal testo di riferimento citato per mettere in evidenza alcuni fattori di scala, per un geofono la risposta in termini di misura elettrica in Volt riferita alla velocità del moto al suolo è

$$\boxed{V_G = -S_G \frac{\omega^2}{-\omega^2 + 2j\lambda\omega\omega_0 + \omega_0^2} \frac{\partial U}{\partial t}}$$

dove: V_G è la misura in Volt nel dominio delle frequenze, S_G è la sensitività dello strumento (rapporto tra la variazione del segnale in uscita e la corrispondente variazione della grandezza all'ingresso, dato di fabbrica), j è il numero complesso, λ è lo smorzamento del sensore, ω e ω_0 sono correlati al comportamento di un oscillatore elementare, U è il campo di spostamenti al suolo nel dominio delle frequenze (nella precedente relazione espresso in termini di variazione prima nel tempo).

Per un accelerometro con tecnologia MEMS la risposta in termini di misura elettrica in Volt riferita alla accelerazione del moto al suolo è

$$\boxed{V_A = S_A \frac{1}{-\omega^2 + 2j\lambda\omega\omega_0 + \omega_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}}$$

con analogia di significato dei vari termini espressi per il sensore geofono qui riferiti al sensore accelerometro.

In questo caso, con applicazione diretta ai microtremori ed ai segnali sismici, essendo la banda del segnale con frequenze molto piccole rispetto la frequenza di risonanza del sensore, l'espressione precedente si riduce alla seguente

$$\boxed{V_A = \frac{S_A}{\omega_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = S_A^g \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}}$$

dove S_A^g è espresso in V/g, dato di fabbrica riportato nelle schede tecniche, come nel seguito illustrato per il LIS344ALH

LIS344ALH

MEMS inertial sensor

high performance 3-axis ±2/±6g ultracompact linear accelerometer

2.1 Mechanical characteristics

Table 3. Mechanical characteristics @ Vdd =3.3 V, T = 25 °C unless otherwise noted(1)

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ.(2)	Max.	Unit
Ar	Acceleration range(3)	FS pin connected to GND	±1.8	± 2		g
		FS pin connected to Vdd	±5.4	± 6		
So	Sensitivity(4)	Full-scale = ±2 g	Vdd/5 - 5%	Vdd/5	Vdd/5 + 5%	V/g
		Full-scale = ±6 g	Vdd/15 - 10%	Vdd/15	Vdd/15 + 10%	
SoDr	Sensitivity change Vs Temperature	Delta from +25 °C		± 0.01		%/°C

4. Zero-g level and sensitivity are essentially ratiometric to supply voltage at the calibration level ±8%.

Inoltre, dato che la sensitività è espressa in V/g, si noti che occorre un fattore 9.81 per rendere omogenee le quantità relative alla sensitività dei 2 sensori.

Da un punto di vista operativo il confronto numerico avviene secondo i seguenti passi:

- l'acquisitore è posto sulla tavola vibrante con inclinazione in pianta a 45° rispetto l'asse del moto imposto, in modo da sollecitare i 2 sensori orizzontali in modo simile e avere un dato sulla eventuale differenza di comportamento. Quindi, constatata la somiglianza di comportamento, si considererà il valore medio della risposta in frequenza dei 2 canali relativamente a ciascuna coppia di canali orizzontali con geofoni o con accelerometri;

- imposto un segnale sinusoidale, a causa degli inevitabili giochi di costruzione della tavola vibrante e del tipo di trasmissione tra servo e piano mobile, il movimento della tavola vibrante non sarà una forma sinusoidale pura come imposto dal software di controllo del servo, ma sarà un segnale di tipo periodico nel quale saranno presenti altre componenti in frequenza. Inoltre è necessario che il comportamento transitorio sia esaurito, mediante l'applicazione del moto per una certa durata e successivamente l'analisi del segnale condotta sulla parte finale del segnale;

- impostata l'ampiezza e la frequenza del moto sul servo, si opera la registrazione del segnale di tutti i sensori dell'acquisitore. Quindi, in sede di analisi, definito il tratto temporale oggetto di valutazione della risposta in frequenza, per un intervallo stretto

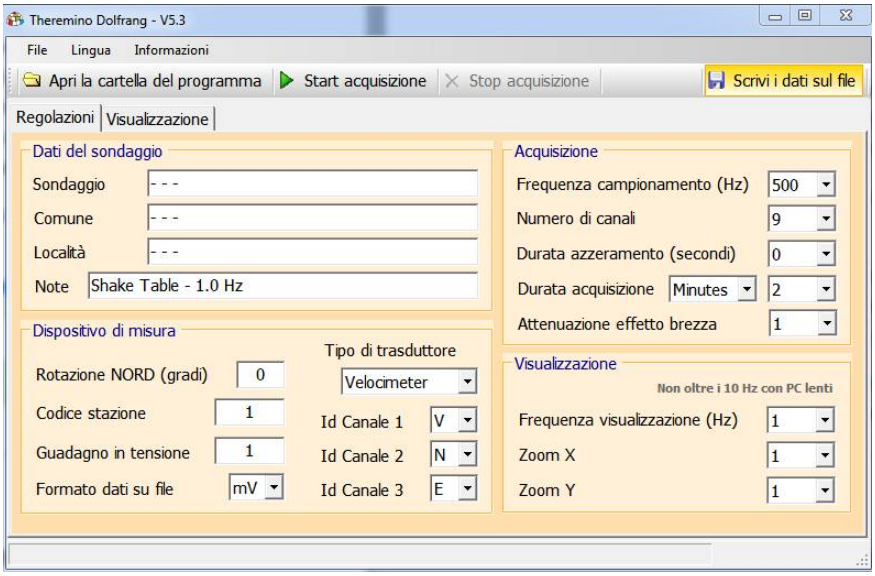
(±1Hz) centrato sulla frequenza imposta, si valuta il valore del modulo della Trasformata di Fourier per ognuno dei 4 segnali di canale orizzontale (2 da geofoni e 2 da accelerometri), ricordando i fattori di scala dovuti alla sensitività dei sensori, alle unità di misura e al comune intervallo di voltaggio cui riferirsi;

- si ripetono le operazioni sopra descritte variando la frequenza imposta e lasciando inalterata l'ampiezza, per un numero di volte corrispondente ai punti con i quali si intende ricostruire la curva di decadimento;

- una volta elaborati tutti i punti e mediati i valori per un certo tipo di sensore, il rapporto tra i valori di modulo da geofono e da accelerometro darà la stima della curva cercata.

5 – MISURE SU SHAKE TABLE E RISULTATI

I parametri di configurazione di **Dolfrang** sono riassunti nell'immagine seguente



parametri per *Dolfrang*

Il processo di calcolo, che comprende sia misurazioni con Shake Table su banco rigido sia analisi numeriche, è così strutturato:

- imposizione di una forma d'onda ad una determinata frequenza mediante **WaveGenerator** per un periodo di almeno 2 minuti;

- registrazione di 2 minuti della risposta dei diversi sensori presenti nell'acquisitore in un unico file saf mediante **Dolfrang**;

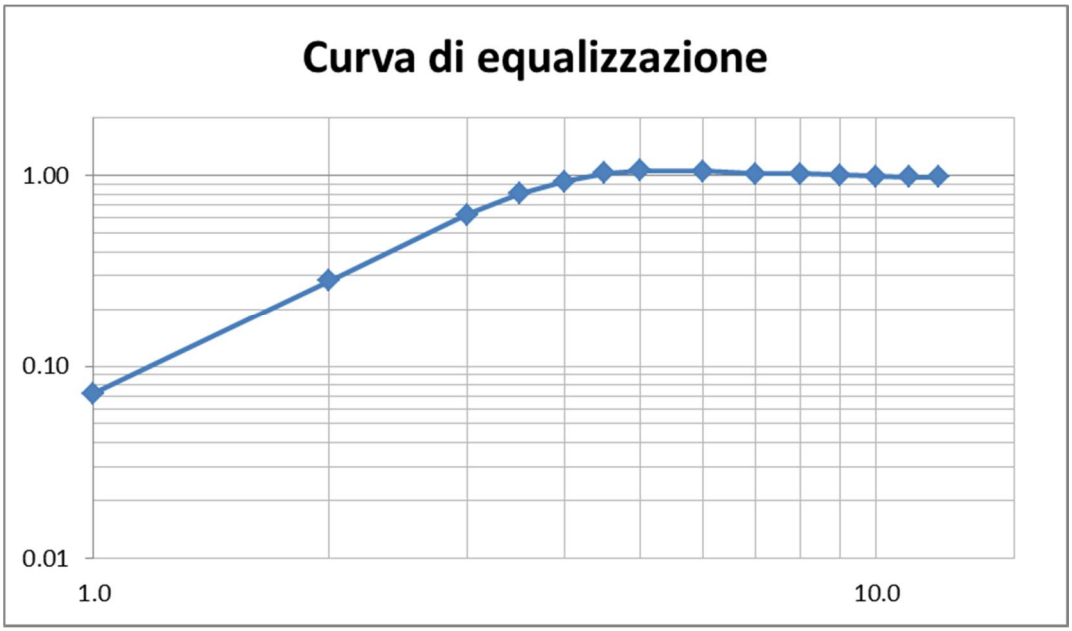
- scomposizione del file di misure dell'acquisitore in 3 distinti file con i dati di ciascun sensore, ossia scomposizione del file saf contenente 9 numeri per riga in 3 distinti file ciascuno con 3 numeri per riga;

- analisi in frequenza del segnale di ciascun canale mediante **Geopsy** (utilizzo della Fast Fourier Transform – FFT). Del segnale acquisito viene analizzata un'unica sequenza di un minuto, che è il secondo minuto di acquisizione;

- confronto della risposta in frequenza di ciascun canale orizzontale (Nord-Sud e Est-Ovest) relativo a diversi sensori.

I valori di ampiezza della FFT sono stati resi omogenei a quelli dei geofoni mediante proporzione lineare con i dati di scala espressi in precedenza.

I risultati ottenuti sono i seguenti:



Il grafico è in scala logaritmica in base 10 su entrambi gli assi. Sull'asse delle ascisse vi è il valore in frequenza e sull'asse delle ordinate il valore normalizzato del rapporto tra il modulo della Trasformata di Fourier relativa al canale orizzontale con geofono su quello con accelerometro. I 14 punti sul grafico sono quelli in cui è stata svolta la misura.

I valori ottenuti sono confrontabili con quelli forniti dal Produttore dei geofoni.

6 – CONCLUSIONI

Anzitutto spero che abbia avuto buon esito l'intenzione di presentare un argomento complesso attraverso la sperimentazione con strumentazione totalmente autocostruita e che il lettore abbia trovato qualche buon spunto di riflessione.

L'idea che anima questo lavoro è che occorre conoscere la strumentazione in proprio possesso in modo da poter applicare con soddisfazione questa come altra procedura, mantenendo capacità di giudizio sui risultati.

Considerando tutti i fattori che agiscono durante una sperimentazione (precisione della meccanica, tolleranze dei sensori geofoni e accelerometri, stabilità del banco di prova, rumori antropici, ecc.) l'errore, pur presente, è minimo sulle grandezze che si intendono misurare per confronto. Comunque il buon accordo tra comportamento teorico e rilievo sperimentale consente di formulare un giudizio quanto meno sull'integrità dell'intero sistema, eventualmente per controllo nel tempo e dopo particolari eventi estremi (per esempio una caduta).

Inoltre, per un geofono, l'operazione di equalizzazione nel dominio delle frequenze, mediante amplificazione a certi valori di frequenza del relativo valore di ampiezza della FFT, si comprende dall'andamento matematico del decadimento della risposta.

Grazie per l'attenzione.