

Microvolt? No, molto meno...

Un volt non è molto, un millivolt è poco, dieci microvolt sono veramente insignificanti, ma se questo fosse un fondo scala?....

Suggerimenti vari sulle misure sub-microvolt.

Elio Pedranti *

* Elio Pedranti – consulente e progettista elettronico per conto terzi e titolare dell'omonima società.

Molte grandezze vengono convertite in segnali elettrici e la misura dell'ampiezza spesso contiene l'informazione desiderata. Alcuni tipi di segnali hanno però ampiezze modeste:

- *termocoppie*
- *celle di carico*
- *shunt*
- *resistenza di bassissimo valore*

sono caratterizzati da segnali che vanno da pochi microvolt alla decina di millivolt.

Da anni vi sono appositi componenti studiati ad hoc, all'inizio dell'era elettronica realizzati con componenti discreti, successivamente in versione monolitica. In particolare le prestazioni di quest'ultimi sono notevolmente migliorate in questi anni sia nella parte analogica che digitale, fornendo delle caratteristiche che anche solo dieci, quindici anni fa erano prerogativa di apparecchiature e strumentazione d'avanguardia.

Ma non è sufficiente disporre di ottimi componenti per eseguire misure di segnali di basso e bassissimo livello: è essenziale adottare alcuni accorgimenti che si basano su nozioni elementari, ma che non vanno mai trascurati se si desidera raggiungere risoluzioni dell'ordine dei nanovolt.

Se qualcuno si preoccupa quando deve misurare segnali nel campo dei millivolt, cosa deve dire chi ha a che fare con segnali un milione i volte inferiore?

Verranno considerati segnali in continua e lentamente variabili, intendendo sino a frequenze di qualche hertz.

Ovviamente con simili frequenze in gioco è impensabile un accoppiamento in alternata, per cui occorre considerare una serie di effetti elettrici di vario tipo quali:

- *potenziali di contatto*
- *potenziali termoelettrici*
- *effetti triboelettrici*
- *cadute di tensione*
- *rumore ambientale*
- *rumore interno ai componenti*
- *(errore di quantizzazione)*

A seconda dei casi specifici è necessario tenere in varia considerazione le cause di disturbo sopra elencate, ma il punto iniziale è il tipo di amplificatore di segnale da considerare.

Amplificatore d'ingresso e rumore

Anche se il segnale è riferito alla massa analogica, la misura è pressoché sempre differenziale. Come in tutte le cose potrebbe esserci qualche eccezione, ma l'utilizzo di un amplificatore differenziale direi che è d'obbligo. Riuscire a prelevare il segnale **esattamente** dove si genera è di primaria importanza.

Consideriamo un semplice esempio: immaginiamo che nel percorso di massa del nostro segnale vi sia una pista lunga 10mm (molto corta) larga 10mm (molto larga) in cui scorre una corrente di alimentazione (che supponiamo per semplicità costante) di soli 1mA (poco). Tale pista offre una resistenza di circa 550microohm a 20°C, determinando una caduta di tensione di

0,55microvolt. Una caduta di tensione risibile in molti casi, ma più che leggibile per le nostre considerazioni. Ecco il perché di misure differenziali.

Realizzare un amplificatore differenziale con operazionali, anche se di precisione, è però fuori discussione quando si scende sotto il microvolt di risoluzione poiché sarebbe richiesta una precisione troppo spinta delle resistenze accoppiate per garantire un'adeguata reiezione alla tensione in modo comune o al rumore dell'alimentazione. La reiezione è molto importante quando si hanno in gioco pochi microvolt: la tensione in modo comune può essere variabile e milioni di volte superiore al segnale e se la reiezione è insufficiente si rischia di misurare più la tensione in modo comune che il segnale.

Oltre a problemi di reiezione vi sono anche quelli dovuti al rumore generato dai componenti medesimi o captati nell'area dell'amplificatore stesso: più componenti corrisponde a più rumore, soprattutto se vi sono resistenze di alto valore, equamente accade per la superficie occupata dall'amplificatore.

Le conseguenze di quanto indicato è la necessità di scegliere una soluzione circuitale compatta e adeguata. Vi sono topologie circuitali che sono un mix fra discreto ed integrato, con componenti realizzati ad hoc, che unitamente ad approfondite conoscenze sviluppate negli anni, ad accorgimenti, brevetti e "segreti industriali", consentono la realizzazione di amplificatori d'ingresso di altissime prestazioni in quanto a banda passante, rumore, impedenza d'ingresso. Nella maggior parte dei casi però oggi la soluzione è di tipo monolitica.

Per risoluzioni sino a 10 nanovolt, e con qualche accorgimento ulteriore sino a 1 nanovolt, si possono usare soluzioni monolitiche, anzi... è l'unica. Se infatti sino a qualche anno fa la soluzione era di usare un amplificatore differenziale seguito dall'integrato di conversione, le odierne soluzioni monolitiche contengono sia il front end dell'amplificatore differenziale programmabile che il convertitore analogico-digitale da cui prendere i dati tramite collegamento seriale.

La curva di rumore dell'amplificatore riferito all'ingresso ha un andamento generalmente opposto al guadagno: maggiore è questo e minore è il rumore riferito all'ingresso, ma oltre certi limiti non scende stabilizzandosi a valori attorno a 20-50nV rms.

Ovviamente più ci si avvicina al nanovolt di risoluzione e maggiore sarà l'instabilità della misura, nonostante pesanti filtraggi.

Per segnali a bassissima frequenza, alta risoluzione e sensibilità il convertitore è un delta-sigma, che unisce altissime risoluzioni (sino a 24 bits) a rumore estremamente contenuto (dai nanovolt ai microvolt in funzione della frequenza di aggiornamento).

Il filtraggio

Lo svantaggio dei segnali in continua è che non è possibile eliminare, tramite filtri passa-alto, le lente fluttuazioni di varia causa presenti. Il vantaggio è che è possibile filtrare anche pesantemente il segnale. Ciò deve avvenire su due fronti: quello analogico copre la componente ad "alta frequenza", dalla decina di hertz o meno in su, mentre quello digitale si occupa della parte a bassissima frequenza.

Il filtro analogico deve però ottemperare a due requisiti antitetici che richiedono di realizzare filtri passa-basso con frequenze di taglio di pochi hertz mantenendo la minor resistenza di ingresso possibile, poiché un'elevata resistenza d'ingresso porta a due conseguenze deleterie: rumore (dovuto all'agitazione termica degli elettroni e proporzionale, fra l'altro, alla resistenza che il segnale "vede") e caduta di tensione (dovuta alla corrente di polarizzazione dell'amplificatore e della resistenza di filtro). La soluzione è quindi tendenzialmente di realizzare filtri LC che minimizzano la resistenza serie vista dal front end del convertitore. Ma anche così occorre fare attenzione ad utilizzare componenti adeguati. Per i condensatori in particolare occorre evitare quelli con dielettrico ceramico per il loro comportamento piezoelettrico, che può indurre/generare tensioni in presenza di vibrazioni meccaniche e rumore acustico. Segnali che generalmente sono ampiamente sotto il microvolt, ma non trascurabile per noi.

Oltre al tipo di rumore appena citato, che in genere può essere abbastanza facilmente filtrato dal filtro passa-basso digitale, un secondo rumore a frequenza anche assai più bassa è dato dall'effetto triboelettrico dovuto a torsioni o flessioni del circuito stampato, dei componenti su di

esso montati e ai cavi di misura. Anche questo tipo di segnale, di natura molto simile al precedente, è in grado di generare tensioni quasi continue (con decadimento dell'ordine anche di decine di secondi) che è poi difficile distinguere dal segnale da misurare.

Il tipico filtraggio digitale, in considerazione del rumore casuale presente, è del tipo a media mobile il campione acquisito più di recente sostituisce il più vecchio.

Considerando che i convertitori delta-sigma per segnali a basso livello raggiungono velocità minime di aggiornamento fra 2 e 8 hertz circa, è conveniente utilizzare la minima velocità disponibile ed in base a questa stabilire la lunghezza del registro circolare ove vengono poste le letture che via via si susseguono. Ammettendo una velocità di 4Hz lunghezze comprese fra 16 e 1024 acquisizioni sono del tutto normali, scegliendo lunghezze maggiori in presenza di rumore più elevato o di risoluzione in tensione più spinte. Con i valori indicati è possibile un completo rinnovo dei dati in tempi compresi fra 4 e 256 secondi.

Anche se apparentemente possono sembrare tempi lunghi è sufficiente fare due considerazioni:

- *La misura di segnali con risoluzioni di 10 o addirittura 1 nanovolt in continua richiede pazienza e per ottenere quantomeno risultati apprezzabili è indispensabile barattare il tempo con la precisione: più tempo... più precisione.*
- *Le derive termiche e gli stress meccanici devono necessariamente assestarsi e i tempi da considerare sono compresi fra le decine di secondi e le decine di minuti.*

Basti considerare che una termocoppia genera, a seconda del tipo, tensioni fra 10 e 80 microvolt per grado. Considerando il primo caso (il più favorevole) ed ammettendo uno squilibrio termico ai capi della nostra involontaria termocoppia nel circuito di misura di 0,001°C, il segnale risultante è di 10 nanovolt: leggibile!!!

Risulta intuitivo che sono notevoli i tempi di assestamento termico per ottenere differenze di temperatura sotto il centesimo di grado nell'intero sistema di misura (target, cavi e convertitore).

Alimentazione

Ovviamente non è per nulla di secondaria importanza.

Anche se tutto parte da uno stabilizzatore switching, come sempre più spesso accade, l'alimentazione del convertitore e del front end in esso contenuto deve essere ricavata da uno stabilizzatore lineare. Altra necessità è quella di disaccoppiare mediante induttanza e relativo condensatore (meglio una coppia formata da uno di 10-100nF e uno di 1-10uF di ottima qualità) l'alimentazione della sezione analogica da quella digitale del convertitore.

Va da sé che i percorsi di massa e di alimentazione vanno curati con molta attenzione.

Anche la scelta dell'eventuale switching che fornisce l'alimentazione primaria non è banale, ma vanno considerate certe regole:

- *La frequenza di switching è bene sia compresa fra 100KHz e 300KHz poiché se troppo basse diventa più difficile filtrarle adeguatamente e se troppo alte si propagano più facilmente "in aria".*
- *"Inscatolare" convertitore e switching (ovviamente separatamente) se questo fornisce più di 3-4 watt al circuito.*
- *Calibrare lo switching sulla potenza effettivamente necessaria al circuito: switching sovradimensionato generalmente funziona in modo discontinuo e con correnti impulsive maggiori determinando disturbi impulsivi e di maggior intensità.*
- *Tenere lo switching alla massima distanza possibile dal convertitore.*
- *Tenere qualsiasi sorgente di calore il più distante possibile dal convertitore avendo cura di far sì che gli inevitabili gradienti di temperatura siano tali da investire i percorsi differenziali del segnale nel medesimo modo: in altre parole evitare che si scaldi di più la pista/componenti del segnale V+ rispetto a V-, o viceversa.*
- *Inserire delle "trappole" termiche come aree di massa o di alimentazione che raccolgono calore e uniformano la temperatura e cave (similmente a quelle usate per aumentare l'isolamento in circuiti ad alta tensione) che bloccano la trasmissione del calore attraverso la vetroresina.*

Detto tutto ciò rimane da considerare che un'alimentazione a batteria rimane la soluzione migliore poiché evita drasticamente collegamenti capacitivi, induttivi e dispersivi alla rete elettrica eliminando, e non è poco, i disturbi su di essa presenti. Ma se non è proprio possibile questa soluzione una buona alternativa è di usare alimentatori appositamente realizzati per il settore medicale che offrono le migliori garanzie di isolamento sotto tutti i punti di vista.

Ovviamente da tale tensione si ricavano tutte quelle necessarie al circuito mantenendo separate, come accennato precedentemente, quella per il convertitore fornita da uno stabilizzatore lineare nelle sue componenti per la parte digitale e analogica, da quella che fornisce l'alimentazione ad un microprocessore tramite uno switching. Per ridurre i disturbi derivanti dall'alimentazione medesima e quelli prodotti direttamente dal microcontrollore è bene che questo lavori alla frequenza di clock più bassa possibile e che non vada in sleep mode, o modalità analoghe, per ridurre sbalzi nei consumi.

Trasmissione dei dati

Una volta acquisiti i dati ci sono due possibili alternative: utilizzare i dati "in loco" o trasmetterli ad un secondo sistema, tipicamente un PC.

Nel primo caso non vi sono problemi.

Per la seconda ipotesi la trasmissione via radio può essere comoda, ma gli assorbimenti impulsivi di corrente durante la trasmissione e le onde radio stesse possono causare notevoli disturbi.

Anche un collegamento diretto via seriale è sconsigliabile perché possono indursi disturbi o accoppiamenti capacitivi ed induttivi che potrebbero disturbare la misura.

Rimane un'altra possibilità: un collegamento seriale accoppiato otticamente, al minimo baud rate possibile e con la minima corrente del led di trasmissione del sistema di acquisizione.

Cose da evitare assolutamente

Toccare i punti sotto misura

Questo comporta degli squilibri termici che possono richiedere anche alcune decine di minuti prima di essere assorbiti. E' una delle influenze più deleterie.

Dopo una saldatura scordarsi di proseguire le misure prima di mezz'ora.

Stare a meno di un metro di distanza

La semplice vicinanza prolungata può portare a gradienti di temperatura di centesimi di grado fra punti di misura, mentre l'avvicinarsi e l'allontanarsi determina spostamenti d'aria con conseguenze analoghe.

Ventilazione

Non ventilare mai il circuito di acquisizione né quello sotto misura poiché continue ancorché piccole variazioni nella velocità e nella temperatura dell'aria determinano gradienti di temperatura altrettanto mutabili, con conseguenze devastanti sulla stabilità del segnale.

Flettere i circuiti

Siano questi del circuito di acquisizione o sotto misura per evitare fenomeni triboelettrici e piezoelettrici. Ciò vale anche per i cavi che devono essere piegati/curvati il meno possibile.

Muovere cavi

In presenza di un campo magnetico alternato o stazionario, muovere i cavetti di misura o i cavi di alimentazione comporta inevitabilmente una variazione del campo magnetico concatenato con il circuito "spaziale" di misura con variazioni lente che se da un lato possono rientrare nella banda di frequenza misurabile, fortunatamente per contro l'ampiezza del disturbo diminuisce con il diminuire della frequenza del movimento, essendo l'ampiezza del disturbo legata alla velocità di

variazione del flusso magnetico concatenato, oltre naturalmente alla distanza fra “sorgente” e circuito di misura.

Conclusioni

Come in tutti i buoni progetti non dare mai nulla per scontato, ma considerare ogni possibile causa di disturbo sotto qualsiasi forma perché si è al limite estremo del misurabile e la misura di tensioni così piccole non è per nulla banale, anche se banali sono le cause che ne determinano l’inattendibilità, se non il fallimento.