

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102011901972585A1

Publication Date

20130212

Applicant

TARTAGNI MARCO

Title

APPARATO E METODO DI RIDUZIONE DEL RUMORE IN AMPLIFICATORI A
TEMPO CAMPIONATO.

DESCRIZIONE dell'invenzione avente per TITOLO: "APPARATO E METODO DI RIDUZIONE DEL RUMORE IN AMPLIFICATORI A TEMPO CAMPIONATO", a nome di CRESCENTINI MARCO residente in Colbordolo (PU), Via Serra di Genga n. 1/A, di nazionalità italiana; BENNATI MARCO residente in Tuoro sul Trasimeno (PG), Via Nuova n. 34, di nazionalità italiana; THEI FEDERICO residente in Cesena (FC), Via Montalti n. 42, di nazionalità italiana; ROSSI MICHELE, residente in Forlì (FC), Via Ugo Foscolo n. 11, di nazionalità italiana; TARTAGNI MARCO, residente in Meldola (FC), Via Mastri n. 17, di nazionalità italiana depositata in data 12 Agosto 2011 con il n. FO2011A000009

Nella sensoristica il rumore elettronico è un problema basilare, poiché influisce direttamente sul rapporto segnale – rumore e quindi sul minimo segnale misurabile. Con lo sviluppo di nuove tecnologie e l'apertura verso nuove applicazioni, soprattutto in ambito biomedico, in cui sono richieste sempre di più misura ed acquisizione di segnali molto deboli, la problematica del rumore è diventata di importanza sempre maggiore.

Gli amplificatori elettronici tempo-campionati sono molto usati in sensoristica poiché permettono un approccio molto strutturale per l'acquisizione del segnale e si adattano molto bene ad essere integrati su singolo dispositivo in silicio. L'utilizzo di tali circuiti tempo-campionati in applicazioni a basso rumore è però ostacolato dall'effetto di ripiegamento del rumore (folding), intrinseco nell'operazione di campionamento del segnale e che sarà spiegato qui di seguito. Nella letteratura scientifica è possibile trovare svariati articoli che analizzano il problema del

ripiegamento del rumore, ma solo pochi di essi presentano delle tecniche capaci di ridurre, o quantomeno mitigare, suddetto problema. Inoltre, le tecniche di riduzione del rumore presentate in letteratura non sono generali ma sfruttano sempre la particolare realizzazione elettronica del dispositivo analizzato. Ad esempio Fowler nell'articolo "Reset Noise Reduction in Capacitive Sensors", pubblicato sulla rivista internazionale IEEE Transaction on Circuits and Systems – I, Vol. 53, N. 8, Agosto 2006, pagine 1658-1669, presenta tre diverse tecniche per la riduzione del rumore in un sistema elettronico per lettura di sensori, ma tali tecniche sono strettamente correlate all'utilizzo di sensori capacitivi e non sono quindi generalizzabili. La Figura 1 mostra uno schema generale di un amplificatore elettronico a tempo-campionato.

La Figura 2 mostra una rappresentazione dello spettro di potenza di rumore del sistema di cui alla Figura 1 al variare del parametro g_m caratteristico del detto amplificatore GS.

La Figura 3 mostra uno schema a blocchi dell'apparato proposto nel presente brevetto.

La Figura 4 mostra uno schema elettrico dell'apparato di cui a Figura 3.

La Figura 5 mostra una rappresentazione dello spettro di potenza di rumore del sistema di cui alla Figura 4 al variare del parametro g_m caratteristico dello stadio amplificatore GS.

La Figura 6 illustra lo schema elettrico di un prototipo che è stato oggetto di sperimentazione.

La Figura 7 illustra i risultati sperimentali ottenuti nelle differenti condizioni di test di un apparato realizzato secondo lo schema di Figura 6.

Un generico amplificatore elettronico tempo-campionato può essere descritto dal sistema di figura 1. Esso è generalmente composto da uno stadio amplificatore (GS), un interruttore (SW) ed una capacità (CL) che memorizza il dato campionato. Il segnale tempo-continuo presente all'ingresso (A) dell'amplificatore si presenta amplificato all'uscita (B) dallo stadio di guadagno (GS) per essere poi campionato sulla capacità (CL) tramite l'interruttore (SW). Affinché il campionamento del segnale all'uscita dell'apparato (C) sia effettuato correttamente, ovvero non ci sia perdita di contenuto informativo, è necessario che il processo di campionamento sia realizzato conformemente alla legge del campionamento di Shannon, cioè la frequenza di campionamento deve essere il doppio della massima frequenza del segnale. Sovrapposto ad un qualsiasi segnale analogico vi è sempre del rumore caratterizzato da una distribuzione spettrale molto più estesa di quella caratteristica del segnale. Questo rumore è generato dai componenti interni al blocco amplificatore (GS), che possono essere resistori o transistori.

Considerata l'elevata larghezza di banda del rumore, l'interruttore (SW) realizzerà un sotto-campionamento del rumore dando origine ad un effetto di "ripiegamento", detto "*folding*", che ne ridistribuisce le componenti spettrali in banda-base in modo tale da mantenere invariata la potenza totale di rumore, cioè l'integrale dello spettro di potenza. E' noto che la potenza totale di rumore termico in un sistema di questo tipo è indipendente dai valori delle resistenze dei componenti che generano il rumore e contenuti ad esempio nell'amplificatore (GS) ed è pari a kT/C , dove k è la costante universale di Boltzmann, T è la temperatura in gradi Kelvin e C è il valore della capacità (CL) di carico dell'amplificatore. La figura 2 esemplifica

bene questo concetto di invariabilità della potenza totale di rumore all'uscita dell'apparato (C). Agendo su un parametro dell'elemento rumoroso (GS), ad esempio aumentando la transconduttanza g_m , si riduce il valore della densità spettrale di rumore, passando da (F1) a (F2), a costo di un pari aumento della banda equivalente di rumore, passando da (G1) a (G2), e mantenendo così costante l'area sottesa (H1) (H2), che equivale alla potenza di rumore. L'invenzione rivendicata dal presente brevetto, descritta in figura 3 e figura 4, propone un metodo ed un apparato capace di ridurre il rumore "*folding*" in un generico amplificatore elettronico tempo-campionato. Lo stadio di guadagno (GS) è comunemente realizzato tramite un amplificatore operazionale retroazionato ma, affinché l'apparato presentato riesca a ridurre il rumore, è sufficiente che tale blocco sia caratterizzato da un elevato guadagno e che il suo rumore riferito all'ingresso sia indipendente dal valore di detto guadagno. A seguire si ipotizzerà che lo stadio di guadagno (GS) in figura 4 sia realizzato mediante un amplificatore operazionale retroazionato, in cui il guadagno è imposto dalla retroazione mentre il rumore riferito all'ingresso è legato ai parametri circuitali realizzativi dell'operazionale, come la transconduttanza g_m dei transistori usati. Tra l'uscita (B) dello stadio di guadagno (GS) e l'interruttore (SW) è introdotto un resistore (R) che, assieme alla capacità (CL), realizza un filtro passa-basso (FP), evidenziato in figura 3. Scegliendo accuratamente il valore di questo resistore è possibile fissare la banda equivalente di rumore (G3) e renderla indipendente dai parametri dello stadio di guadagno (GS). A questo punto è possibile progettare l'amplificatore in modo tale da diminuire la densità spettrale di rumore passando da (F1) - (I3) a (F2) - (I4), rappresentati in figura 5. Avendo fissato la banda equivalente di rumore

tramite la resistenza (R), la potenza totale di rumore all'uscita dell'apparato (C) si ridurrà proporzionalmente alla riduzione della densità spettrale, passando da (H3) a (H4) come mostrato in figura 5. La presente invenzione non elimina il problema del “*folding*” di rumore nella banda-base che è strettamente legato all'operazione di campionamento tramite l'interruttore (SW), ma ne limita gli effetti riducendo la potenza totale di rumore ripiegata.

Seguono alcuni esempi di test sperimentali del metodo di riduzione del rumore in amplificatori a tempo campionato secondo l'invenzione.

Esempio 1

Il metodo descritto è stato applicato ad un prototipo 100, realizzato con un amplificatore di corrente per elettrofisiologia, il cui schema a blocchi è mostrato in figura 6.

Il prototipo 100 comprende un amplificatore retroazionato 101 che funge da amplificatore di carica, ovvero un dispositivo elettronico in grado di integrare un segnale in corrente fornendo in uscita un segnale in tensione con ampiezza proporzionale alla carica posta in ingresso, una resistenza R collegata in serie ad un interruttore SW1 ed un blocco CDS (correlated double sampling), ovvero un circuito comprendente capacità di memorizzazione e che permette di eliminare un offset indesiderato.

Tale prototipo 100 è stato realizzato in tecnologia integrata mediante un amplificatore operazionale dedicato 101 di cui sono elencati di seguito i principali parametri caratteristici:

- Guadagno ad anello aperto in DC = 88 dB
- GBW = 41 MHz

- g_m (transconduttanza) = 7,5 mA/V
- A (guadagno di tensione ad anello chiuso) = circa 20

L'interruttore SW2 è stato inserito per eliminare l'effetto della resistenza R (cortocircuitando i punti A' e A'') e per provare in questa maniera la validità della tecnica di riduzione del rumore.

Sono stati effettuati tre test tenendo l'ingresso IN del sistema 100 a vuoto e misurando lo spettro di rumore al punto C con un analizzatore di spettro a bassa frequenza (precisamente HP35670A). I risultati di tale misura, sono stati divisi per la transresistenza totale del circuito 100, pari a 2,25G Ω , ottenendo una densità spettrale di potenza di rumore espressa in A²/Hz riferita in ingresso.

In questo primo esempio il resistore R ha una resistenza di 100k Ω ed il rilevamento viene effettuato con l'interruttore SW2 aperto. La densità spettrale di potenza del rumore riferita in ingresso è rappresentata con linea nera continua 200 in figura 7.

Esempio 2

Tra i punti A' e A'' del circuito di figura 6 è stato inserito un resistore R di valore pari a 17k Ω , quindi inferiore come valore a quello del resistore dell'Esempio 1. Il rilevamento è stato quindi effettuato mantenendo l'interruttore SW2 aperto.

La densità spettrale di potenza del rumore riferita in ingresso è mostrata in figura 7 dalla linea nera tratteggiata 201.

Esempio 3

Lo stesso rilevamento degli Esempi 1 e 2 è stato effettuato con l'interruttore SW2 chiuso: i punti A' e A'' risultano quindi cortocircuitati, vale a dire nella

stessa condizione in cui venisse collegato un resistore R di valore pari a 0Ω .

La densità spettrale di potenza del rumore riferita in ingresso è mostrata in figura 7 ed è rappresentata con la linea grigia 202.

Dai risultati degli Esempi 1-3 si può notare che l'effetto della resistenza R è quello di ridurre la densità spettrale di potenza del rumore lasciando inalterata la banda equivalente di rumore, e quindi di ridurre la potenza totale di rumore come descritto precedentemente. E' comunque evidente che non è fisicamente possibile ridurre all'infinito la potenza totale del rumore; la tecnica della presente invenzione vale fin quando il valore di R è tale per cui il rumore termico introdotto dal resistore R risulta trascurabile rispetto al rumore introdotto dall'amplificatore retroazionato 101.

RIVENDICAZIONI

1. Apparato elettronico a basso rumore di amplificazione per il campionamento di un segnale, comprendente:

un amplificatore elettronico retroazionato (GS) con proprie caratteristiche di densità spettrale di rumore ($F1$ o $F2$) e banda equivalente di rumore ($G1$ o $G2$) dipendenti dalla transconduttanza dei transistori interni a detto amplificatore;

un filtro elettronico passa-basso (FP) connesso tra l'uscita (B) di detto amplificatore (GS) e l'uscita (C) di detto apparato ed avente la finalità di disaccoppiare la dipendenza del rumore di detto apparato dalle caratteristiche di detto amplificatore (GS), in cui detto filtro passa-basso è costituito da un condensatore elettrico (CL) di memorizzazione del segnale campionato di detta uscita (B) di detto amplificatore (GS) e da un resistore bipolare (R),

caratterizzato dal fatto che detto resistore è collegato in serie all'uscita di detto amplificatore (GS), e dal fatto che il valore della transconduttanza (g_{m1} o g_{m2}) di detto amplificatore (GS) ed il valore della resistenza di detto resistore bipolare (R) sono selezionati in modo tale da fissare la banda equivalente di rumore ad un valore ($G3$) inferiore o uguale a detta banda equivalente di rumore ($G1$ o $G2$) di detto amplificatore (GS) e renderla indipendente dalla transconduttanza (g_{m1} o g_{m2}) dei transistori di detto amplificatore (GS).

2. Apparato elettronico secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di comprendere una linea di ritardo che connette elettricamente detta uscita (B) di detto amplificatore (GS) con detto condensatore di memorizzazione (CL) per mezzo di un dispositivo elettronico di campionamento temporale ed avente finalità di aumentare il tempo caratteristico di detta memorizzazione.

3. Apparato elettronico secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che detta linea di ritardo è costituita da detto resistore (R) e da un interruttore elettronico (SW) bipolare connesso in serie con detto resistore (R).

4. Procedimento per la riduzione del rumore di un apparato di amplificazione elettronico

a tempo campionato, comprendente le fasi di:

a) mettere a disposizione un amplificatore elettronico retroazionato (GS) con un proprio rumore equivalente di uscita (H_1) dipendente dalla transconduttanza dei transistori interni a detto amplificatore e una propria frequenza di taglio (G_1);

b) collegare un filtro elettronico passa-basso (FP) tra l'uscita (B) di detto amplificatore (GS) e l'uscita (C) di detto apparato ed avente la finalità di disaccoppiare la dipendenza del rumore di detto apparato dalle caratteristiche di detto amplificatore (GS), in cui detto filtro passa-basso è costituito da un capacitore elettrico (CL) di memorizzazione del segnale campionato di detta uscita (B) di detto amplificatore (GS) e da un resistore bipolare (R);

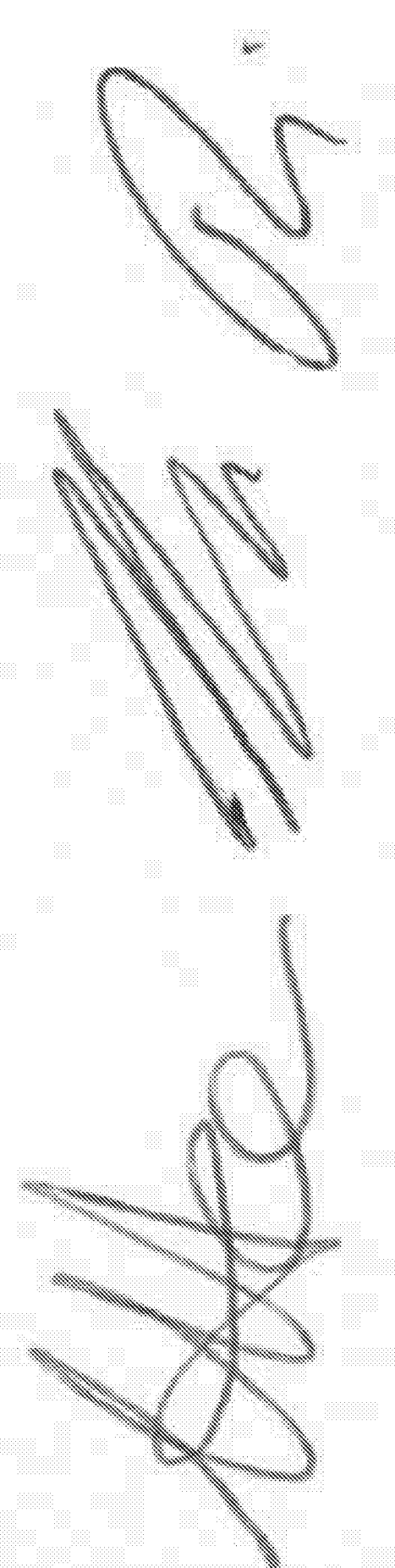
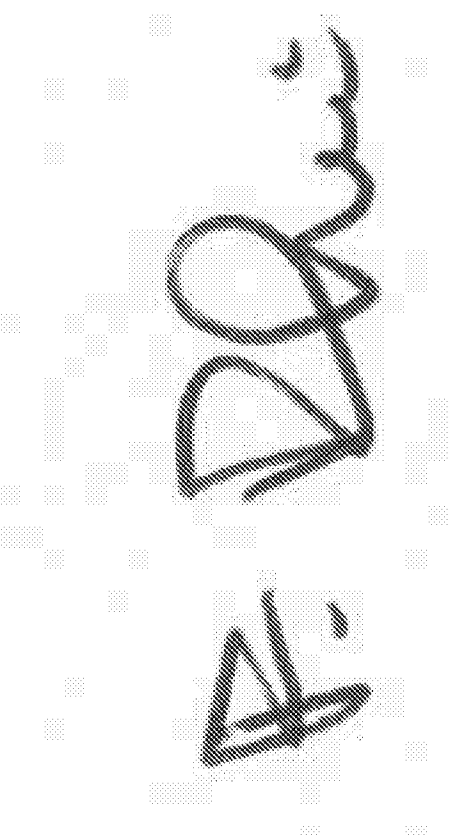
c) campionare l'uscita (B) di detto amplificatore elettronico retroazionato (GS) su detto capacitore elettrico (CL) mediante il resistore (R) elettricamente connesso a detto capacitore (CL),

caratterizzato dal fatto che detto resistore è collegato in serie all'uscita di detto amplificatore (GS), e dal fatto che il valore della transconduttanza (g_{m1} o g_{m2}) di detto amplificatore (GS) ed il valore della resistenza di detto resistore bipolare (R) sono selezionati in modo tale da fissare la banda equivalente di rumore ad un valore (G_3) inferiore a detta banda equivalente di rumore (G_1 o G_2) di detto amplificatore (GS) e renderla indipendente dalla transconduttanza (g_{m1} o g_{m2}) dei transistori di detto amplificatore (GS).

Allen M. B. F. Bai Bent-Mary Hoa Gaentini

- 

- sampling the output (B) of an electronic amplifier (GS) onto an electric capacitor (CL) by means of an electronic switch (SW) and a resistor (R) and having the purpose of augmenting the time required to store the signal of said output (B) onto said capacitance (CL) with the benefits of reducing the equivalent input referred noise and increasing signal to noise ratio of said apparatus.



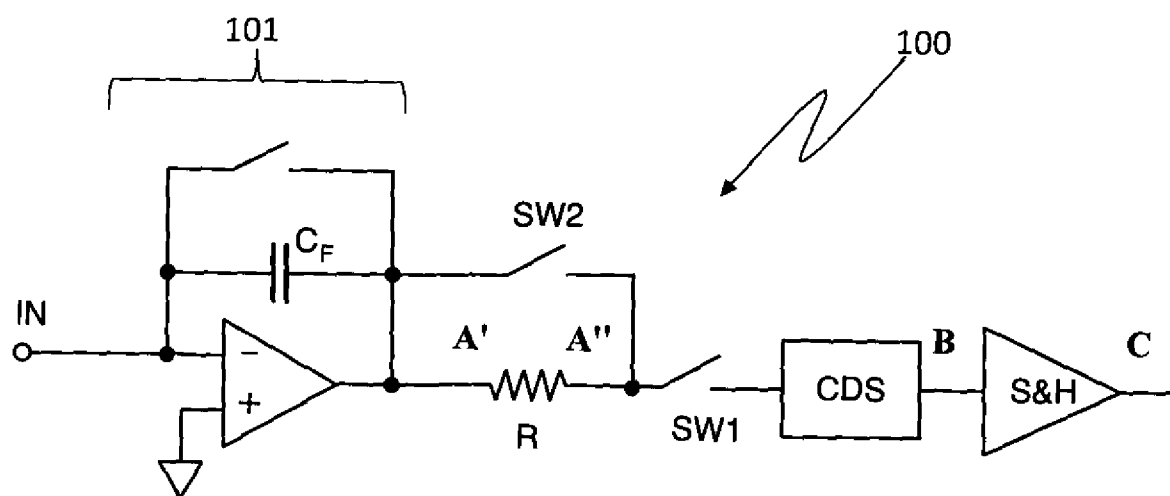


Figura 6

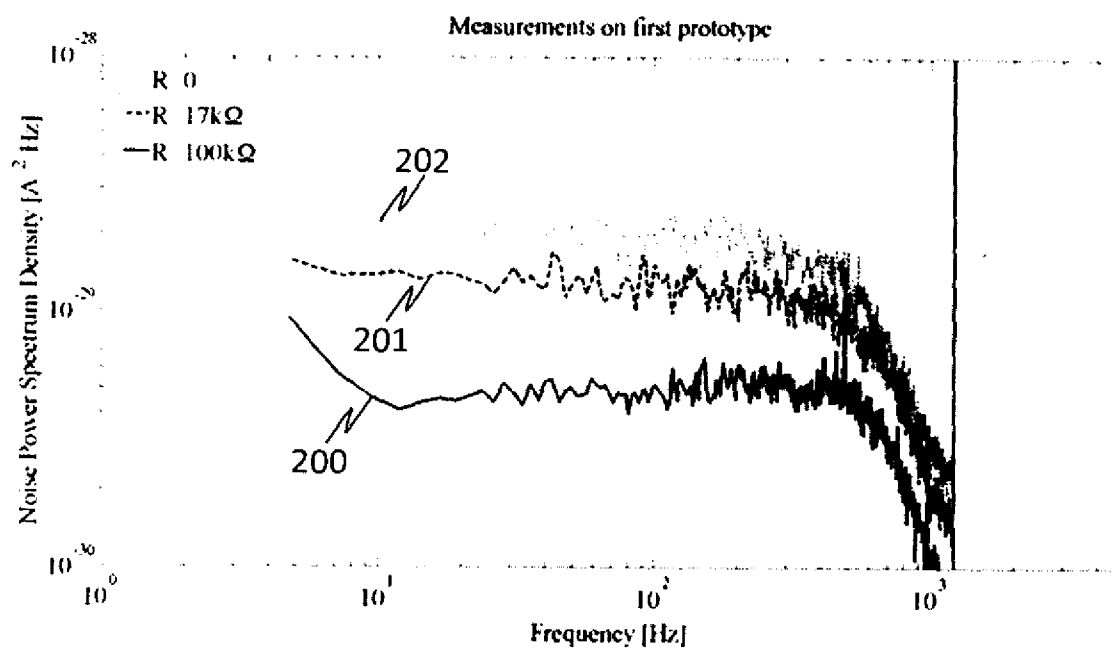


Figura 7