ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902109509A1

Publication Date

20140612

Applicant

SOTGIU ANTONELLO

Title

BOBINA SOLENOIDALE COMPOSITA IN GRADO DI MIGLIORARE IL RAPPORTO SEGNALE RUMORE NELLA RIVELAZIONE DI SEGNALI IN RISONANZA MAGNETICA.

Front page automatically generated by WIPO

CONSIDERAZIONI INTRODUTTIVE: Per ottenere immagini di alta qualità clinica tramite tecniche di risonanza magnetica occorre un alto rapporto segnale rumore (SNR). Questo rapporto aumenta all'aumentare del campo e ciò spiega la rincorsa a valori del campo sempre più alti. Lavorare a campi bassi, comunque, presenta vari vantaggi tra cui un minor costo delle apparecchiature, minori artefatti dovuti alla suscettibilità magnetica dei campioni ed eventualmente maggior contrasto nelle immagini dovuto al ridotto valore di T1 in molti tessuti. Questi possibili benefici devono essere bilanciati contro la riduzione in SNR. Il rapporto SNR può essere scritto nella forma:

$$SNR = (M_0 * \omega_0)/\sqrt{c_1 \omega_0^{1/2} + c_2 \omega_0^2} \qquad 1.$$

Dove M_0 e ω_0 sono rispettivamente la magnetizzazione del campione e la frequenza di lavoro mentre c_1 e c_2 sono costanti che tengono conto rispettivamente del rumore della bobina e del campione. Se il rumore del campione domina su quello della bobina (i.e. $\mathbf{c_2\omega^2 >> c_1\omega^{1/2}}$) il termine SNR sarà dominato dalla frequenza di osservazione e quindi dal valore del campo magnetico esterno. Al contrario se SNR è dominato dalla bobina, come nel caso dell'MRI a bassa frequenza, allora vi è spazio per migliorare SNR tramite un opportuno disegno delle bobine a RF.

Lo scopo della presente invenzione è quello di introdurre un nuovo modo di costruire un bobina solenoidale a RF in grado di migliorare il rapporto SNR. Questo tipo di disegno è particolarmente ben applicabile per l'osservazione di regioni di dimensioni dell'ordine di 15-20 cm a frequenze relativamente basse (indicativamente <= 15MHz).

Le due geometrie di bobine usate per l'osservazione o l'irraggiamento di volumi cilindrici sono i solenoidi e le bobine a sella. Il numero di spire n con cui entrambe queste geometrie vengono costruite può essere aumentato accrescendo contemporaneamente la forza elettromotrice rivelabile ai loro capi. Facendo ciò aumenta linearmente anche la resistenza delle bobine r_C ma dato che il rumore è proporzionale alla radice di r_C in totale si avrà un miglioramento di SNR proporzionale a $\sqrt{n}$. Questo processo non può durare indefinitamente, infatti quando la lunghezza del filo si avvicina al valore della lunghezza d'onda λ alla frequenza di lavoro, lungo il filo vi sarà una distribuzione delle fasi pari a 360° e un punto al centro sarà esposto a radiazione contenente tutte le fasi in modo tale che la loro somma sia virtualmente nulla. L'uso di una elevata lunghezza di conduttore che in teoria dovrebbe portare ad un aumento di SNR si traduce invece in un pessimo ricevitore. Una regola normalmente rispettata è infatti che la lunghezza del conduttore non superi in lunghezza il valore di $\lambda/20$ che corrisponde ad una distribuzione di fase di circa 18°.

DESCRIZIONE GENERALE DEL DISPOSITIVO: Per superare questa limitazione e rendere vantaggioso l'uso di un elevato numero di spire è stato studiato e realizzato a titolo dimostrativo un solenoide composto di un numero m_0 di risonatori indipendenti ciascuno composto da un numero m_1 di spire. In questo modo il numero effettivo di spire utilizzato sarà pari a $n=m_0*m_1$ ma la lunghezza del conduttore che determina lo sfasamento sarà proporzionale a m_1. A titolo

dimostrativo sono stati realizzati diversi circuiti risonanti mostrati in Fig. 1 e Fig. 3 ciascuno costituito da un totale di 32 spire avvolte attorno ad una superficie cilindrica. Le spire sono state divise in 4 gruppi ciascuno di 8 spire in tre diversi modi in modo da formare un solenoide che circonda il campione e collegato verso l'esterno tramite 4 preamplificatori come mostrato in Fig. 2.
Ai fini del funzionamento del dispositivo e per ottenere che tramite di esso si realizzi un effettivo incremento di SNR è necessario che questi risonatori abbiano essenzialmente lo stesso campo di vista e cioè che insistano sulla stessa regione di spazio. Questo è essenzialmente diverso da molte implementazioni di risonatori multipli presenti sia nella letteratura scientifica che nelle raccolte di brevetti che hanno essenzialmente lo scopo di estendere il campo di vista e a tale scopo utilizzano risonatori che insistono su volumi diversi.
Nei diversi casi realizzati per dimostrare il funzionamento della tecnica i gruppi di spire sono distribuiti attorno alla stessa regione di spazio. E' intuitivamente evidente che su ciascun risonatore sarà rivelabile una forza elettromotrice prodotta dal campione e che queste possono essere sommate fra di loro. Questo tipo di disegno che per motivi pratici è stato realizzato con 4 avvolgimenti separati può essere esteso ad un numero molto maggiore di avvolgimenti con ulteriore guadagno in sensibilità. Il numero di spire in ciascun risonatore è stato calcolato in modo da non eccedere $\lambda/20$.

DESCRIZIONE DELLE FIGURE:

Figura 1. : La figura 1 mostra una prima implementazione del risonatore composito ottenuto tramite l'avvolgimento di quattro strati di spire ciascuno formato da 8 spire (l'intero solenoide è indicato con 1). Tali strati sono stati costruiti utilizzando piattina di rame. Le prime 8 spire (da S_{11} a S_{81}) formano l'avvolgimento più esterno e sono connesse in serie al condensatore C1 in modo da formare il circuito risonante 3 di Fig. 1. Il secondo strato è composto dalle spire da S_{12} a S_{82} che connesse al condensatore C3 formano il circuito risonante 4 di Fig. 1. In modo analogo sono formati i circuiti risonanti 5 e 6 di fig. 1. Lo schermo in rame 2 di Fig. 1 circonda il solenoide.
Figura 2. : La figura 2 mostra come i diversi gruppi di spire siano collegati a diversi circuiti di matching e successivamente ad amplificatori a basso rumore. I segnali rilevati dai singoli gruppi di bobine vengono successivamente utilizzati per effettuare la ricostruzione spaziale. A questo punto una volta ottenuta l'immagine dai singoli ricevitori si procede a sommarle in modo da accrescere il rapporto segnale rumore. In Fig.2 i diversi Sub Coil (da 1 a 4 nella presente implementazione) sembrano insistere su regioni diverse di spazio, ciò è dovuto esclusivamente alla rappresentazione grafica. E' evidente da Fig. 1 e dalla successiva Fig. 3a che possono essere realizzati in modo da insistere esattamente sulla stessa regione di spazio.
Figura 3. : Nell'implementazione di Fig. 3a le spire S_{11},S_{21},S_{31},S_{41},S_{51},S_{61},S_{71} ed S_{81} sono collegate in serie tra di loro ed ad un condensatore in modo da costituire un circuito risonante e così via in

gruppi successivi di 8 spire. In questa implementazione le spire sono realizzate con filo di rame di 1.5 mm di spessore e distanziate tra di loro di circa 2mm.

In Fig. 3b gruppi di 8 spire consecutive sono collegate in modo da formare 4 diversi circuiti risonanti.

Figura 4. : La figura 4 mostra l'implementazione logica del circuito di matching dei singoli gruppi di spire che è realizzato in modo da presentare dal lato del risonatore una alta impedenza e dal lato dell'amplificatore un'impedenza molto bassa. Questa modalità, presente in letteratura, riducendo, a causa dell'alta impedenza la corrente che circola nel circuito risonante, permette di ridurre l'accoppiamento induttivo fra le spire.

INCREMENTO DE RAPPORTO SNR:

Con riferimento alle figure 1-3, se supponiamo che il solenoide sia composto da *n* risonatori indipendenti, invece che da 4 come nell'implementazione dimostrativa, possiamo scrivere per l'insieme dei risonatori che lo compongono la relazione:

$$\vec{V}_t = \vec{V} + \vec{N}_C + \vec{N}_S \qquad 2.$$

dove $\vec{V}$ è la tensione ai capi dovuta all'interazione con il campione, $\vec{N}_C$ è il rumore generato nella bobina a causa della resistenza della bobina stessa e dell'eventuale rumore nel pre-amplificatore e $\vec{N}_S$ è il rumore generato dal campione.

In modo esplicito la relazione può essere scritta come:

$$\begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ \\ V_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \\ V_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{C1} \\ N_{C2} \\ \\ N_{Cn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{S1} \\ N_{S2} \\ \\ N_{Sn} \end{bmatrix} \qquad 3.$$

All'uscita di ciascun risonatore è possibile distinguere tra segnale e rumore generato su quel risonatore da quello generato negli altri risonatori ed accoppiato induttivamente. Possiamo quindi scrivere:

$$V = V' + C_v V \qquad 4.$$

$$N_C = N'_C + C_C N_C \qquad 5.$$

$$N_S = N'_S + C_S N_S \qquad 6.$$

in cui C_v, C_C e C_S sono le matrici che danno I coefficienti di accoppiamento rispettivamente per: segnale, rumore delle spire e rumore del campione. In modo del tutto generale possiamo scrive l'accoppiamento tra le tensioni misurate ai capi di ciascun risonatore con l'espressione:

$$V_{out} = W^H V_T \qquad 7.$$

dove W^H è un vettore che descrive l'accoppiamento. Il caso più comune è che tale vettore sia un vettore unitario il che significa che le tensioni si sommino in modo diretto. Potrebbe però essere

possibile una combinazione delle tensioni più complessa per tener conto di eventuali pesi dei diversi risonatori il che porterebbe a coefficienti diversi da 1.

Come si vede dalle eq. 4-6 all'uscita di ciascun risonatore è presente sia il segnale e il rumore misurato nelle spire di quel risonatore che quello generato nelle spire di altri risonatori ed accoppiato induttivamente. E' quindi conveniente trovare modo di disaccoppiare i risonatori. Nella implementazione dimostrativa il disaccoppiamento è stato ottenuto con l'aiuto dei preamplificatori ad impedenza di ingresso molto bassa di fig. 4. In questo caso infatti il circuito di matching può essere disegnato in modo da presentare una alta impedenza dal lato del circuito risonante in modo tale da non permettere un flusso di corrente in grado di accoppiare induttivamente le spire fra di loro.

Nella implementazione realizzata come dimostrativo il livello di disaccoppiamento raggiunto è stato dell'ordine di 20 dB. Per ridurre ulteriormente l'accoppiamento residuo si è ricorso a tecniche matematiche basate sulla conoscenza preventiva del grado di accoppiamento tra i diversi risonatori. Con questa ulteriore precauzione l'accoppiamento tra le spire è risultato dell'ordine di 50 dB e a questo punto trascurato. In questa ipotesi le eq. 4-6 diventano:

$$V = V' \tag{8.}$$

$$N_C = N'_C \tag{9.}$$

$$N_S = N'_S \tag{10.}$$

e il rapporto SNR può essere scritto come:

$$SNR = \frac{\left|W^H V\right|}{\sqrt{W^H \left\langle N'_C N'^H_C \right\rangle W + W^H \left\langle N'_S N'^H_S \right\rangle W}} \tag{11.}$$

In cui W^H è il vettore unitario che combina tra di loro I segnali dei diversi risonatori (in questo caso sommandoli). La tensione finale ai capi dell'insieme dei risonatori sarà:

$$\left|W^H V'\right| = m\left|V'\right| \tag{12.}$$

Le due componenti del rumore diventeranno:

$$W^H \left\langle N'_C N'^H_C \right\rangle W = \sigma_C^2 W^H I W = m\sigma_C^2 \tag{13.}$$

$$W^H \left\langle N'_S N'^H_S \right\rangle W = \sigma_S^2 W^H K_e W \tag{14.}$$

dove $\sigma_C{}^2$ e $\sigma_S{}^2$ sono rispettivamente la varianza del rumore di bobina e del campione.

Mettendo insieme eq.11-14 si otterrà:

$$SNR = \frac{m\left|V'\right|}{\sqrt{m\sigma_C^2 + \sigma_S^2 W^H K_e W}} \tag{15.}$$

Che mostra come SNR cresce con $m/\sqrt{m} = \sqrt{m}$ rendendo conveniente la costruzione di questo tipo di solenoide composito.

Rivendicazioni

1. Un solenoide usato come ricevitore in apparati di Risonanza Magnetica composto da una pluralità di circuiti risonanti che insistono su un volume cilindrico coassiale al solenoide stesso.

2. Un solenoide come in rivendicazione 1 in cui il numero totale di spire n_T sia dato dal prodotto del numero n dei circuiti risonanti moltiplicato per il numero m delle spire in ciascun circuito risonante $n_T=n*m$;

3. Un solenoide come in rivendicazioni 1-2 in cui la sensibilità sia proporzionale a $\sqrt{n_T}$;

4. Un solenoide come in rivendicazioni 1-3 in cui i risonatori componenti abbiano un numero di spire m tale da rispettare la condizione che la lunghezza totale delle spire non comporti uno sfasamento maggiore di circa 20° del segnale a radio frequenza.

5. Un solenoide come da rivendicazioni 1-4 i cui risonatori componenti, pur essendo coassiali, sono disaccoppiati con diverse tecniche, che includono ma non esauriscono, l'utilizzo di circuiti di matching che presentino un'alta impedenza dalla parte del circuito risonante, lo studio preliminare dell'accoppiamento reciproco o altre tecniche presenti in letteratura.

Claims

1. A solenoid to be used as front end receiver in MRI apparatus composed by a plurality of resonant circuits which enclose a cylindrical volume coaxial to the solenoid.
2. A solenoid as in claim 1 in which the total number of turns n_T is given by the product of the number n of the resonant circuits times the number m of turns in each circuit $n_T=n*m$.
3. A solenoid as in claims 1-2 in which sensitivity is proportional to $\sqrt{n_T}$.
4. A solenoid as in claim 1-3 in which each of the component resonators have a number m of turns for which the total length of the turns does not cause a phase variation larger then 20°of the RF signal at the operating frequency.
5. A solenoid as in claim 1-4 in which the component resonators are decoupled through the use of matching circuits that present high impedance on the side of the resonant circuit or by other systems present in literature.

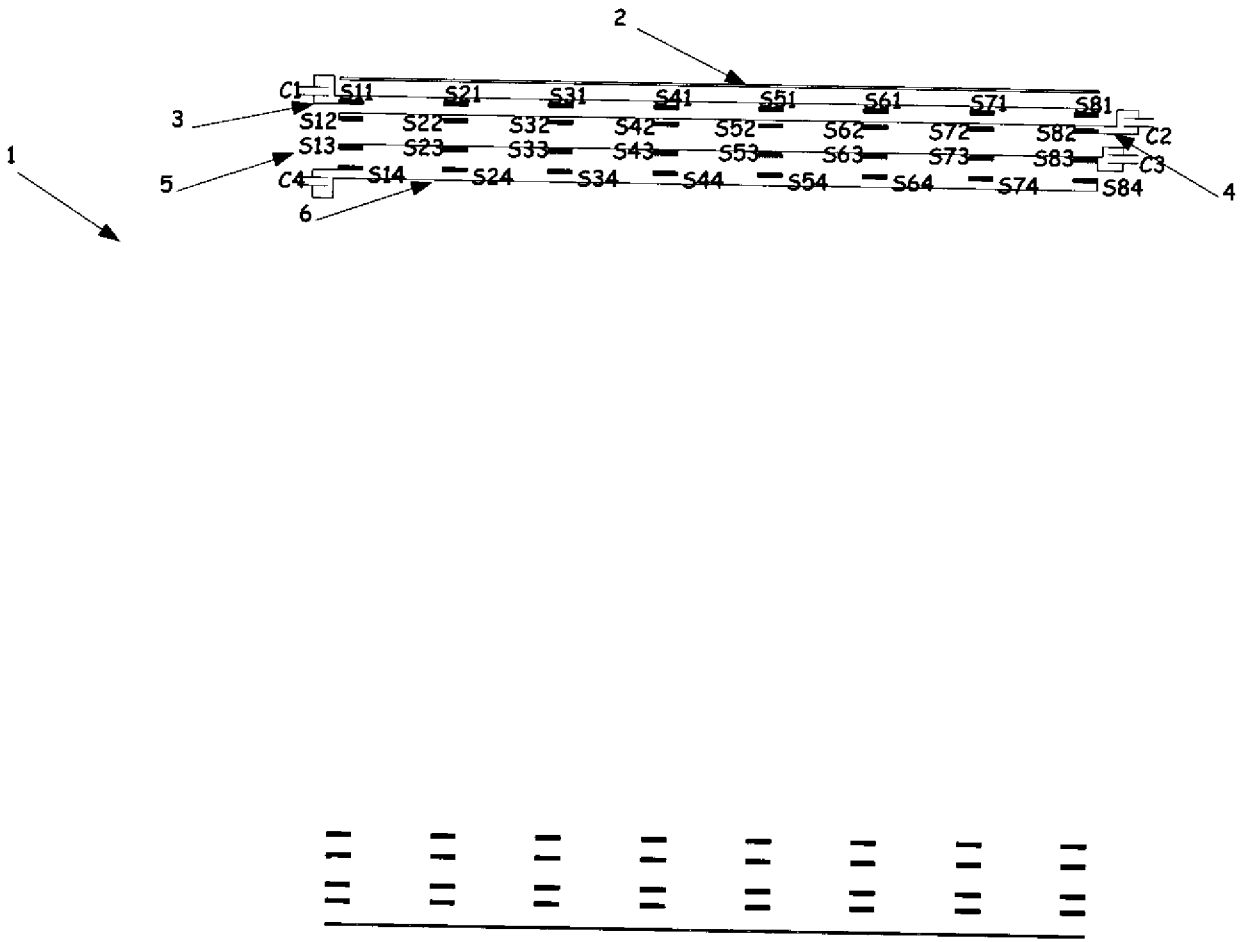

1
2
3
4
5
6
C1
C2
C3
C4
S11
S21
S31
S41
S51
S61
S71
S81
S12
S22
S32
S42
S52
S62
S72
S82
S13
S23
S33
S43
S53
S63
S73
S83
S14
S24
S34
S44
S54
S64
S74
S84

Fig. 1

Fig. 2

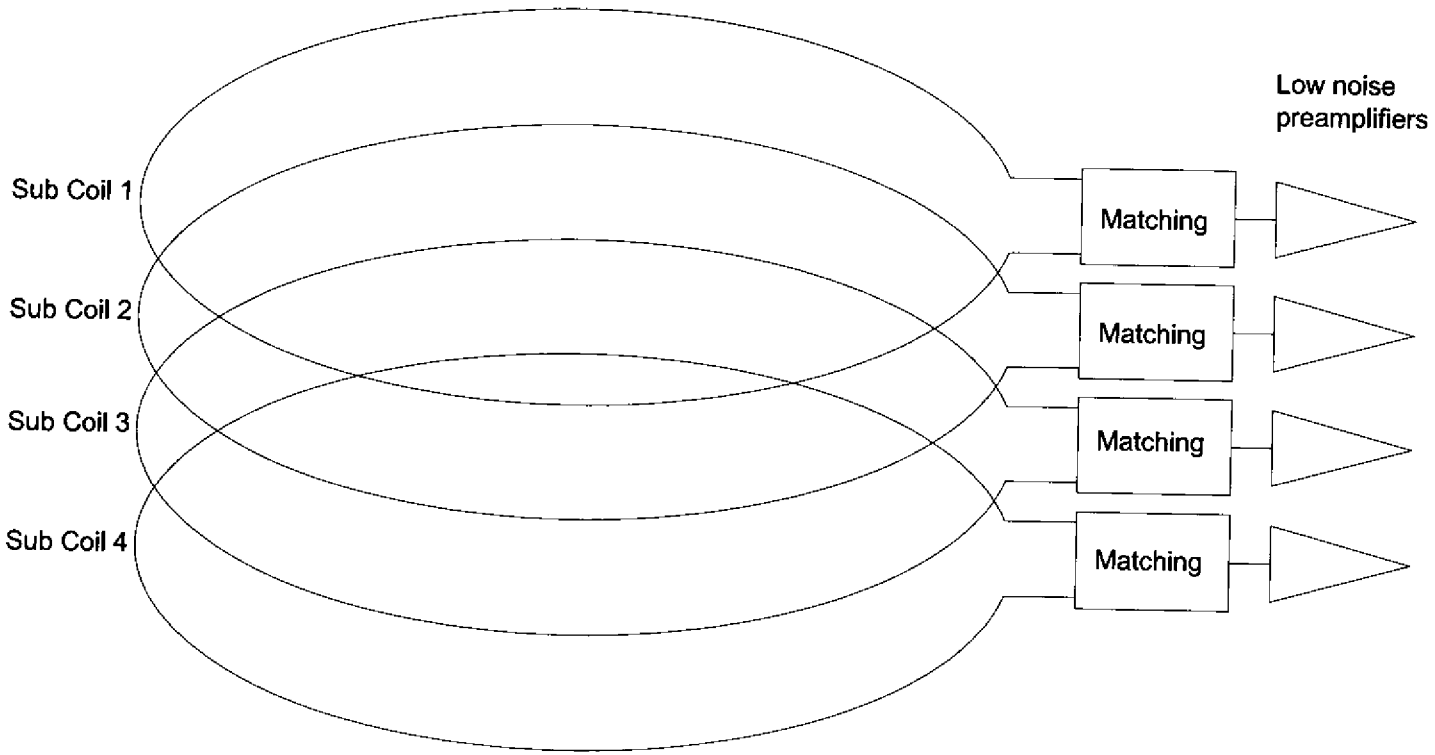
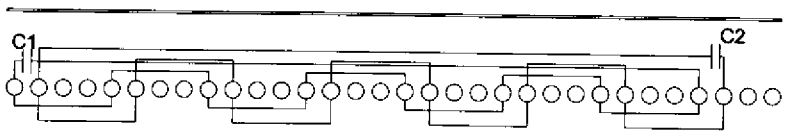

Low noise
preamplifiers
Sub Coil 1
Sub Coil 2
Sub Coil 3
Sub Coil 4
Matching
Matching
Matching
Matching

Fig. 3a


C1
C2

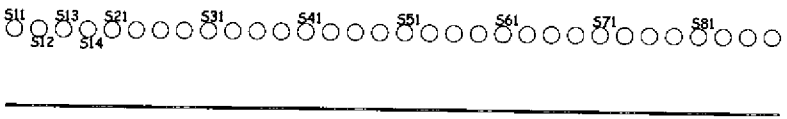
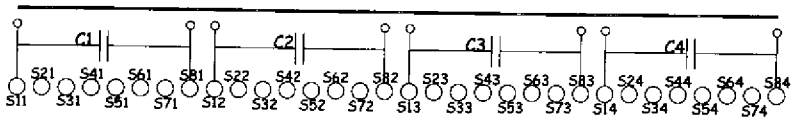
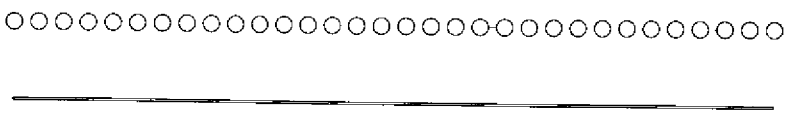

S11
S13
S21
S31
S41
S51
S61
S71
S81
S12
S14

Fig. 3b


C1
C2
C3
C4
S21
S41
S61
S81
S22
S42
S62
S82
S23
S43
S63
S83
S24
S44
S64
S84
S11
S31
S51
S71
S12
S32
S52
S72
S13
S33
S53
S73
S14
S34
S54
S74



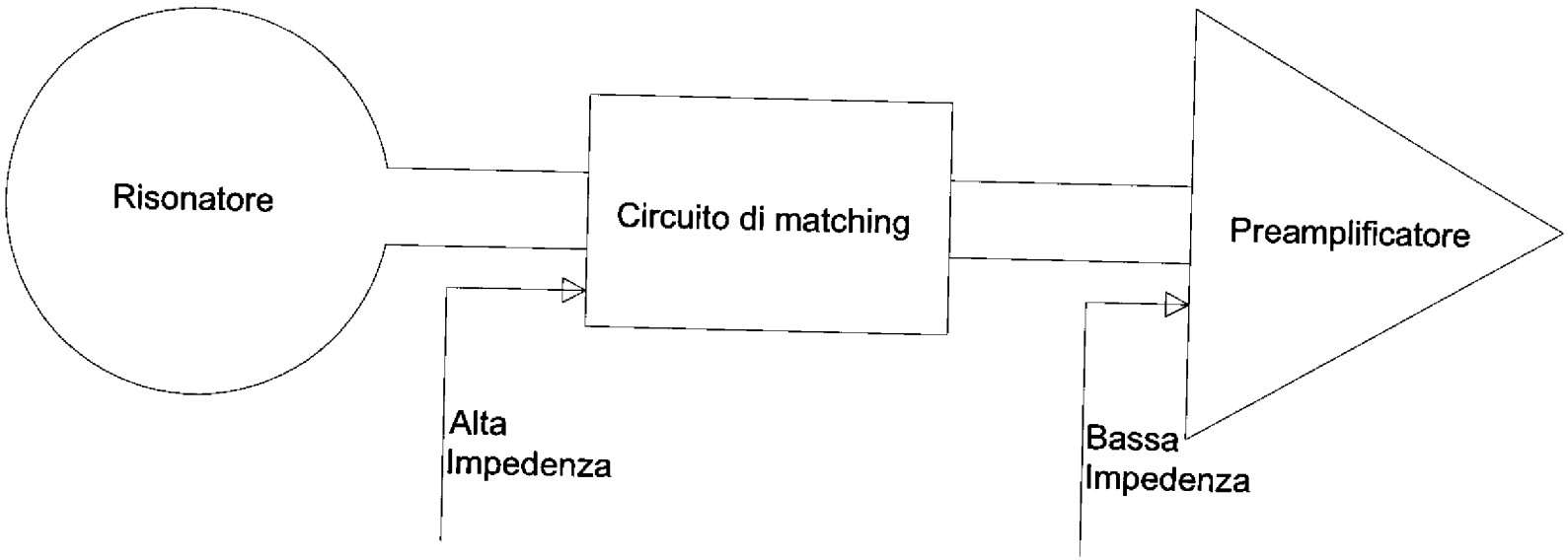

Risonatore
Circuito di matching
Preamplificatore
Alta
Impedenza
Bassa
Impedenza

Fig. 4