

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公 開 特 許 公 報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2012-13610

(P2012-13610A)

(43) 公開日 平成24年1月19日(2012.1.19)

(51) Int.Cl.
G 0 1 R 33/02 (2006.01)F 1
G 0 1 R 33/02テーマコード (参考)
2 G 0 1 7

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2010-151920 (P2010-151920)
(22) 出願日 平成22年7月2日 (2010.7.2)(71) 出願人 500302552
株式会社 I H I エアロスペース
東京都江東区豊洲三丁目1番1号
(71) 出願人 504180239
国立大学法人信州大学
長野県松本市旭三丁目1番1号
(74) 代理人 100090022
弁理士 長門 侃二
(72) 発明者 安井 英己
東京都江東区豊洲三丁目1番1号 株式会
社 I H I エアロスペース内
(72) 発明者 田代 晋久
長野県長野市若里4丁目17番1号 国立
大学法人信州大学工学部内
Fターム(参考) 2G017 AA15 AB08 AD04 BA05

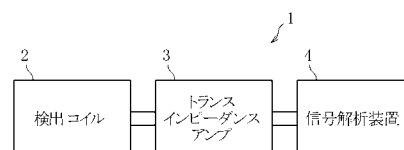
(54) 【発明の名称】 磁気センサ

(57) 【要約】

【課題】簡易な構成にして、MHz帯域の微弱磁界を検出することの可能な磁気センサを提供する。

【解決手段】微弱な高周波磁界を検出する検出コイル(2)と、検出コイルに誘導される誘導電流をインピーダンス変換して電圧信号として出力するトランスインピーダンスアンプ(3)とを具備し、検出コイルは、寄生容量が所定値より小さい巻数である。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

微弱な高周波磁界を検出する検出コイルと、
該検出コイルに誘導される誘導電流をインピーダンス変換して電圧信号として出力する
トランスインピーダンスアンプとを具備し、
前記検出コイルは、寄生容量が所定値より小さい巻数であることを特徴とする磁気セン
サ。

【請求項 2】

前記検出コイルの巻数は 1 であることを特徴とする、請求項 1 に記載の磁気センサ。

【請求項 3】

前記トランスインピーダンスアンプは、
入力された対象周波数の電流信号に対し可変のトランスインピーダンスゲインを選択す
る選択回路と、
前記対象周波数の電流信号のみを電圧に変換するフィルタ回路と、
を備えることを特徴とする、請求項 1 または 2 に記載の磁気センサ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は磁気センサに係り、詳しくは MHz 帯域の微弱磁界の検出に好適な磁気センサ
に関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年、様々な磁気センサが提案されている。特に微弱磁界を検出可能な磁気センサの開
発は、宇宙探査用人工衛星に搭載するための磁気観測用センサ、ハイブリッド自動車等の
パワーエレクトロニクス素子を制御するための電流センサ、ヒトの脳や心臓から自然に発
生する磁界を検出する生体磁気計測磁気センサ等の応用分野の発展に大きく寄与している
。

また、MHz 帯域の磁界検出は、核磁気共鳴現象を用いた NMR や MRI 等の装置や、
空港のセキュリティーゲート等に用いられる金属探知機、および PWM 制御による高効率
モータの電流波形を歪みなく観測するための電流センサ等で必要とされている。

微弱磁界の中でも 1 pT 以下という極めて微弱な磁界を検出しようとする場合、代表的
な検出方式は以下に挙げる 3 つに限定される。

【0003】

第 1 の検出方式としては、超電導量子干渉素子を用いた SQUID センサが挙げられる
。これは超電導量子干渉素子が磁束量子単位の微弱な磁界を非線形ながらも電圧に変換で
きることを利用したものであり、FLL (Flux Locked Loop) 回路と呼ばれるフィードバ
ック回路を用いることで、磁束波形に比例した電圧波形を出力する磁気センサである。

【0004】

第 2 の検出方式としては、ゼーマン効果を利用した光ポンピング磁力計が挙げられる。
これは、セシウム等のアルカリ金属の蒸気をガラス管に封入し、これに特定の波長の光を
当てながら高周波磁界を印加するものであり、印加する高周波磁界の周波数により、測定
対象となる磁界に対応した波長の光が吸収されることを利用した磁気センサである。

【0005】

第 3 の検出方式としては、ファラデーの電磁誘導の法則よりコイルに鎖交した磁束によ
り誘導される電圧を測定する磁気センサが挙げられる。これは、コイルの巻数が電圧波形
に比例する特性を有しており、この電圧波形を積分し、高感度電圧アンプで増幅した磁気
センサである（非特許文献 1）。また、磁性材料を検出コイルのコアとして用いることで
、コイルに鎖交する磁束を増加させ、感度を上げる手法も用いられている。

また、ウクライナの Korepanov らによって報告されたデータが上述した第 3 の検出方式
での世界最高の性能を達成している。低周波タイプ（0.3 mHz ~ 200 Hz）では 1

10

20

30

40

50

H z において $100 \text{ fT} / \text{Hz}^{1/2}$ 、中間周波数タイプ ($1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$) では 10 kHz において $10 \text{ fT} / \text{Hz}^{1/2}$ 、高周波タイプ ($10 \text{ Hz} \sim 600 \text{ kHz}$) では 50 kHz で $2 \text{ fT} / \text{Hz}^{1/2}$ というノイズフロアレベルが示されている (非特許文献 2)。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献 1】田代晋久、垣内厚弥、森泉建一、脇若弘之著、マグネティックス研究会資料、社団法人電気学会、平成 21 年 3 月、MAG-09-32、p.1-6

【非特許文献 2】V. Korepanov, R. Berkman, L. Rakhlin, Y. Klymovych, A. Prystai, A. Marussenokov, and M. Afanassenko, "Advanced field magnetometers comparative study," Measurement, 2001, vol. 29, pp. 137-146

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、上述した第 1 の検出方式では、液体冷媒が不可欠であり大規模な構成になることや、 1 MHz 以上で動作可能な FLL 回路の開発が困難であるという問題がある。

また、上述した第 2 の検出方式では、装置構成が複雑であること、ハイパワーの光源が必要であること、および長い緩和時間が周波数応答を制限してしまうという問題がある。

また、上述した非特許文献 1 に開示された第 3 の検出方式では、コイルの巻数を増加させると、抵抗値上昇による熱雑音の増加や、コイルの寄生容量の増加により感度が悪化するため、好ましくない。さらに、磁性材料を用いた場合には、磁性体の磁気ノイズ、渦電流の影響により高周波において高い透磁率を付与することは容易では無いという問題がある。また、電圧波形を積分する積分器や電圧アンプで発生するノイズ、および電圧アンプの増幅率の限界が感度に影響するという問題もある。

20

【0008】

本発明は、上述した課題を解決すべくなされたものであり、その目的とするところは、簡易な構成にして、 MHz 帯域の微弱磁界を検出することの可能な磁気センサを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

30

【0009】

上記の目的を達成するべく、請求項 1 の磁気センサは、微弱な高周波磁界を検出する検出コイルと、該検出コイルに誘導される誘導電流をインピーダンス変換して電圧信号として出力するトランスインピーダンスアンプとを具備し、前記検出コイルは、寄生容量が所定値より小さい巻数であることを特徴とする。

請求項 2 の磁気センサでは、請求項 1 において、前記検出コイルの巻数は 1 であることを特徴とする。

【0010】

請求項 3 の磁気センサでは、請求項 1 または 2 において、前記トランスインピーダンスアンプは、入力された対象周波数の電流信号に対し可変のトランスインピーダンスゲインを選択する選択回路と、前記対象周波数の電流信号のみを電圧に変換するフィルタ回路とを備えることを特徴とする。

40

【発明の効果】

【0011】

請求項 1 の磁気センサによれば、微弱な高周波磁界を検出する検出コイルは寄生容量が所定値より小さい巻数であり、トランスインピーダンスアンプにより検出コイルに誘導される誘導電流をインピーダンス変換して電圧信号として出力するようにしている。

従って、検出コイルに積分器や層数の多い多層コイルを使用する必要が無く、検出コイル側の等価回路は単純な RL 回路となるため、検出コイルのインダクタンスと抵抗によってカットオフ周波数が決まる。カットオフ周波数以上の周波数領域では、インダクタンス

50

の定義により検出コイルに鎖交する総磁束 ϕ [Wb]とインダクタンス L [H]より誘導される電流 $I = \phi / L$ [A]が決まる。

【0012】

即ち、磁束に対し誘導電流が比例するため、積分器を用いることなく磁束に比例した波形を観測することができる。また、インダクタンス L を小さくすれば、微弱な磁界でも大きな誘導電流が流れるため、多層コイルにより巻数に比例した誘導電圧を得る手法に比べ、インダクタンスが小さい検出コイル、即ち寄生容量が小さい巻数の検出コイルでも高感度な磁気センサを実現することができる。

【0013】

また、本発明に係る磁気センサは、常温での作動が可能である。そのため、上記第1の検出方式の磁気センサとは異なり、液体冷媒を必要とせず、検出コイルを冷却するためのデュワーや冷凍機等も不要であるため、センサシステムを小型化することができる。また、液体冷媒のメンテナンスも不要となるため、メンテナンスに掛かるコストを大幅に低減することができる。

【0014】

また、第2の検出方式の磁気センサとは異なり、高周波磁界発生装置、および光源の校正が不要であるため、システム構成を簡単にすることができる。

そして、上述した第3の検出方式の磁気センサと比べて検出コイル側のインピーダンスが極めて低いため、磁気センサの測定限界を決める熱雑音が極めて低いので、感度を良好に維持することができる。さらに、磁性材料を必要としないため、磁性体のノイズの問題が発生せず、測定したい磁気分布を乱さないため、検査精度を向上させることが可能である。

【0015】

また、市販されている低ノイズ電圧アンプのゲインは、1 MHzで60 dB程度であるのに比べ、トランスインピーダンスアンプは、1 MHzで140 dBのゲインを有するものが市販されているので、極めて高感度な磁気センサを実現することができる。

【0016】

請求項2の磁気センサによれば、検出コイルの巻数は1であるので、ワンターンコイルは多層コイルと比較して寄生容量が極めて小さく十分無視できるため、MHz帯域に不本意な共振周波数を生み出さずに磁気センサの周波数特性を制御することができる。即ち、ワンターンコイルに制御可能な容量を有するキャパシタを接続することで、意図的に測定対象周波数と共振周波数を一致させることが可能であり、極めて高い感度を実現することができる。

【0017】

請求項3の磁気センサによれば、可変のトランスインピーダンスゲインを選択する選択回路とフィルタ回路とを備えることにより、極めて微弱な磁界を検出することが可能となる。

これは、周囲に存在する環境磁界が測定対象の微弱磁界に比べて大きい場合、測定対象磁界の周波数成分のみを増幅することで、トランスインピーダンスアンプの出力波形の飽和を抑制することができるからである。

【図面の簡単な説明】

【0018】

【図1】本発明に係る磁気センサのブロック構成図である。

【図2】ワンターンコイルの一例を示した概略図である。

【図3】ワンターンコイルを構成する同軸ケーブルの一例を示した概略図である。

【図4】トランスインピーダンスアンプの構成の一例を示す回路図である。

【図5】磁気センサの感度の周波数特性測定を行った実験装置を示す概略構成図である。

【図6】10 nTの磁束密度に対する磁気センサの感度の周波数特性を示すグラフである。

。

【図7】10 nTの磁束密度に対するワンターンコイルの出力電圧の周波数特性を示すグ

10

20

30

40

50

ラフである。

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照しながら説明する。

図1は、本発明に係る磁気センサの概略構成図である。

図1に示すように、磁気センサ1は、検出コイル2のコイル端子をトランスインピーダンスアンプ3の入力側に接続し、トランスインピーダンスアンプ3の出力波形を信号解析装置4にて観測するように構成される。

検出コイル2は、寄生容量が所定値より小さい巻数で構成される。

【0020】

トランスインピーダンスアンプ3は、測定対象磁束を検出コイル2に鎖交させた際に誘導される電流を、トランスインピーダンスゲインの値に比例した電圧として出力する。

信号解析装置4は、例えばオシロスコープやスペクトラムアナライザ等である。測定対象周波数の磁界がカットオフ周波数以上の周波数の場合は、鎖交磁束に比例した波形が観測される。測定対象周波数の磁界がカットオフ周波数以下の周波数では、周波数に比例した電圧信号として波形が観測される。

【0021】

ここで、検出コイル2を図2に示すようなワンターンコイル2aとすることで、インダクタンス L [H]および抵抗 R [Ω]により誘導電流の制御が容易である。ワンターンコイル2aは、ポリウレタン等の被覆付き銅線を用いてもよいが、この場合、コイル端5、5は被覆を剥き、トランスインピーダンスアンプ3の入力への接続を可能としておく。このようなワンターンコイル2aにより、検出コイル2の寄生容量をMHzオーダの周波数帯域に不本意な共振周波数を生み出さない程度に抑制することができる。

【0022】

また、図3に同軸ケーブルの概略図を示すように、内部導体6および外部導体7を有する同軸ケーブル2bを用いて、図2のようなワンターンコイル2aを構成してもよい。この場合、内部導体6の両端部をトランスインピーダンスアンプ3に接続する。ここで、外部導体7の両端部のうち、一端のみをトランスインピーダンスアンプ3の入力端子の接地点側に接続する、あるいは外部導体7の両端部をどこにも接続しない状態とすることができる。

【0023】

トランスインピーダンスアンプ3は、例えば図4に回路図を示すように、対象周波数の電流信号に対し可変のトランスインピーダンスゲインを選択できる可変抵抗（選択回路）8を具備し、対象周波数の電流信号のみを電圧に変換するフィルタ回路9を有して構成されるのがよい。このような構成により、周囲に存在する環境磁界に比べて測定対象となる磁界が小さく周波数が決まっている場合、測定対象となる磁界の周波数成分のみを増幅させることで測定対象磁界を高感度に検出することができる。

【0024】

図5は直径14cm、線径2mmのワンターンコイル2aを用いて製作した磁気センサ1の感度の周波数特性測定を行った際の実験装置である。測定は電波暗室内にて電磁界発生装置10を用いて行った。設置したワンターンコイル2aに10nTの磁束密度を鎖交させるため、校正済みの電界センサを用いて3V/mとなるように電磁界発生装置を調整した。

【0025】

上述した本発明の実施形態で、図6にグラフを示すように、10nTの磁界に対するトランスインピーダンスアンプ3を用いた磁気センサの周波数特性を測定した。トランスインピーダンスアンプ3のトランスインピーダンスゲインを10の3乗（60dB）とし、100Hz以下の周波数をカットするフィルタを用いた。トランスインピーダンスアンプ3の出力信号をスペクトラムアナライザにてバンド幅10kHz刻みで計測した。比較として、磁界が無入力状態の際の出力電圧も共に示す。

本測定によれば、300 kHz 付近から 5 MHz 程度まで、周波数によらず 76 dB μ V 程度の磁束密度に比例した出力信号が得られた。300 kHz 以下の周波数において、周波数に比例した出力信号が得られた。

【0026】

以上の結果より、上述した磁気センサ 1 の動作原理を確認できた。磁界が無入力状態の際の出力電圧から、バンド幅 10 kHz 刻みでも nT 以下の磁界、詳しくは pT オーダの磁界を十分検出可能であることを確認した。見積もられたノイズフロアレベルは 1 pT / Hz^{1/2}であった。また、バンド幅を狭めるとともに、トランスインピーダンスゲインを上げることで、fT オーダの磁界検出も十分行えることを確認した。トランスインピーダンスを 60 dB とした場合、磁気センサ 1 は 300 kHz ~ 5 MHz まで線形応答し、10 nT の磁界に対する出力電圧は 76 dB mV であった。

10

【0027】

また、10 MHz 付近からワンターンコイル 2a が有する寄生容量によると思われる共振周波数が確認できた。即ち、ワンターンコイル 2a のコイル端 5、5 とトランスインピーダンスアンプ 3 を繋ぐケーブルを短く接続すれば寄生容量を容易に低減できるため、磁束密度に比例した出力信号が得られる周波数帯域を広く取ることができる。また、制御可能な容量を有するキャパシタを接続することで、意図的に測定対象周波数と共振周波数を一致させることが可能であるため、極めて高い感度を実現することができる。

【0028】

比較例として、図 7 に 10 nT の磁界に対するワンターンコイル 2a の出力電圧の周波数特性を測定したグラフを示す。本結果は、上述した従来技術の 1 つである第 3 の検出方式の問題点を提起するために示した。スペクトラムアナライザにてバンド幅 10 kHz 刻みで計測した。比較として、磁界が無入力状態の際の出力電圧を共に示す。

20

【0029】

ファラデーの電磁誘導の法則に基づく誘導電圧を検出する方式では、周波数に比例した出力信号が得られる。検出コイルの巻数、および電圧アンプを用いれば出力電圧を上げることができる反面、抵抗増加に伴う熱雑音と電圧アンプから発生するノイズにより、磁界が無入力状態の際の出力電圧が上昇する。即ち、微弱磁界による誘導電圧がノイズに埋もれてしまい、磁気センサとしての最小磁界分解能が劣化する。また、磁束に比例した波形を観測するためには積分器が必要となるが、同様に磁気センサとしての最小磁界分解能が劣化する。

30

【0030】

なお、3 V/m 以下の電界強度を測定可能な電界センサはほとんど流通していないため、電磁界発生装置に入力する電力量の比から 1 nT の磁界を発生して実験も行った。バンド幅 10 kHz 刻みによる評価において、トランスインピーダンスゲインを、10 の 3 乗から 5 乗 (60 dB ~ 100 dB) まで変化させて計測を行った。トランスインピーダンスゲインを 10 倍するごとに 10 倍程度の出力電圧が得られることを確認した。

【0031】

トランスインピーダンスゲインを 100 dB 程度まで上げると、1 nT という微弱磁界に対してもトランスインピーダンスアンプ 3 の出力波形が飽和する程度という極めて大きな振幅波形となる。また、電波暗室内においても存在する微弱磁界も増幅するため、対象磁界の周波数と振幅に合わせてトランスインピーダンスゲインおよびフィルタを適宜調節することで、汎用性のある高感度の磁気センサを提供することができる。

40

【符号の説明】

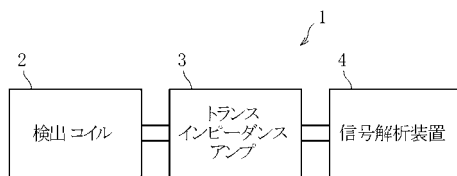
【0032】

- 1 磁気センサ
- 2 検出コイル
- 2a ワンターンコイル
- 3 トランスインピーダンスアンプ
- 4 信号解析装置

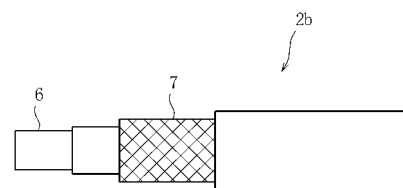
50

- 5 コイル端
- 6 内部導体
- 7 外部導体
- 8 可変抵抗（選択回路）
- 9 フィルタ回路
- 10 電磁界発生装置

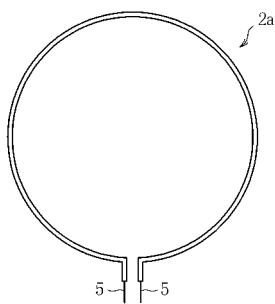
【図 1】



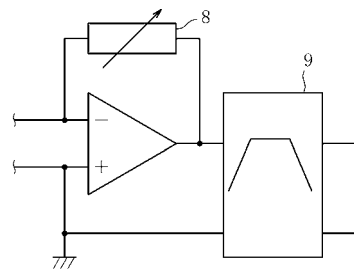
【図 3】



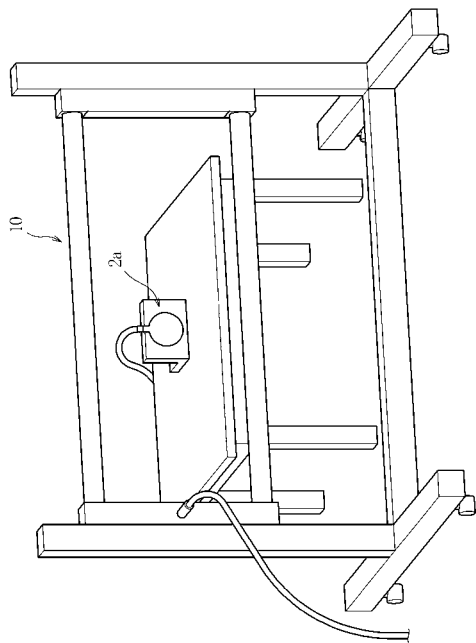
【図 2】



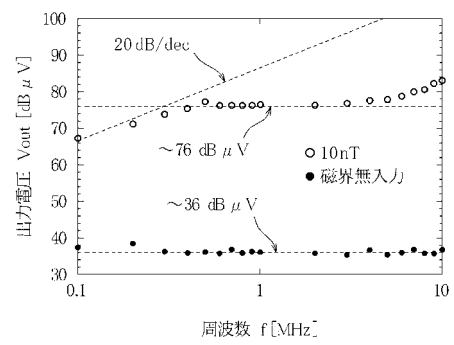
【図 4】



【図 5】



【図 6】



【図 7】

