

アプリケーションノート

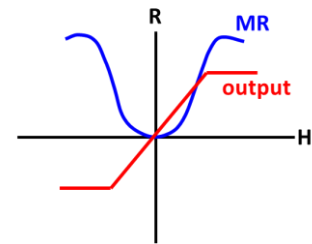
超高感度磁界センサ:ロックインアンプを利用した磁界検出

■概略

本超高感度磁界センサは、独自の磁界変調を行うことで、特に低周波領域における微弱な磁界を高感度に検出するものです。基本的な磁界検出は別ノートに記載の IoT モジュールを用いることができますが、本センサの原理に基づいて、磁界変調された出力信号をロックインアンプなどを用いて復調することで、より高感度な磁界検出、あるいは、独自の用途に応じた磁界検出が可能になります。本アプリケーションノートはそのような目的のための使用方法を説明します。

■検出原理

まず、磁界変調と復調に関わる基本的な検出原理を説明します。本センサで用いられているのは、巨大磁気抵抗効果(GMR: Giant Magneto-Resistance)素子です。GMR 素子は、磁界の強度に応じて電気抵抗値が変わります。右図に、本センサの磁気抵抗特性を 本センサの磁気抵抗特性 示します。Hは印加磁界、Rは抵抗値です。青曲線で「MR」と記されているのが磁気抵抗特性で、磁界の強度に応じて偶関数的に変化します。



この偶関数的な磁気抵抗特性に対して周波数 f の交流磁界 H_{AC} を印可します。このとき、検出する微弱磁界信号を H_{sig} とします。 H_{sig} は周波数が f よりも十分に小さければ交流でも良いのですが、ここでは簡単のために DC とします。この素子に定電流を流した時に観測される出力電圧 V は以下の式で

記述されます。

$$\begin{aligned} V &= AH^2 + V_0 \\ &= A(H_{AC} \sin \omega t + H_{sig})^2 + V_0 \\ &= -\frac{1}{2}AH_{AC}^2 \cos 2\omega t + 2AH_{AC}H_{sig} \sin \omega t + A\left(\frac{H_{AC}^2}{2} + H_{sig}^2\right) + V_0 \end{aligned}$$

記述されます。

ここで、 A は係数、 V_0 は磁気抵抗の最小値、 ω は角周波数です。第一項は出力の $2f$ 成分、第二項は $1f$ 成分、残りは DC 成分です。この式からわかるように、検出磁界 H_{sig} は $1f$ 成分の振幅から得られ、その大きさは交流変調磁界に比例します(すなわち、交流磁界振幅 H_{AC} が信号のゲインとなる)。一方、 $2f$ 成分は H_{AC} 成分のみの信号です。従って、出力信号から $1f$ 成分のみを復調すれば、その出力は、図中の「output」と記されているように、検出信号 H_{sig} に比例したものになります。

以上のように、変調磁界周波数の成分のみを抽出する検波をすることで、超高感度な磁界検出が可能になります。そのような検波は、位相検波(phase detection)と呼ばれ、ラジオの AM 波の復調に用いられています。また、そのような検波を行う装置として、ロックインアンプが知られています。別ノートの IoT モジュールでは FPGA でこの位相検波を行っていますが、本ノートでは、ロックインアンプを

用いる場合について説明します。

■仕様

【センサ】

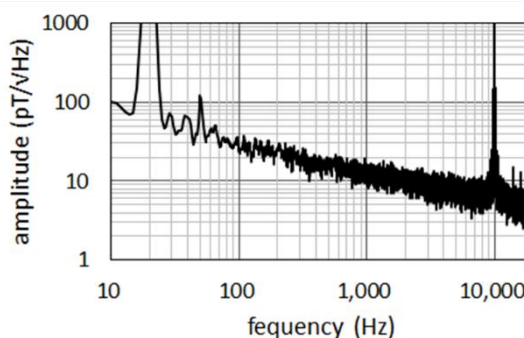
センサ仕様は右図のようになっています。センサのノイズレベルは $10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 kHz です。ただしこの数値は十分に磁気シールドされた場所での測定値です。一般の環境では、 $5\mu\text{T}$ 程度の地磁気、および、 $5\text{--}10\text{nT}$ の電源周波数 ($50/60\text{ Hz}$) のスイッチングノイズ磁界が存在します。このため、特段の処置を施さない場合、これらのレベル以下の磁界は測定できませんので、ご注意ください。

典型的なノイズスペクトルを右に示します。 20 Hz に大きく見えるピークは、縦軸校正のための測定磁界の信号です。このノイズレベルは、後述の V_{AC} 等のパラメータの設定により大きく変動します。

このセンサは、最大磁界 $20\mu\text{T}$ で飽和します。飽和しても、測定レンジの磁界に戻れば通常の測定ができます。ただし、強力磁石などからの大きな磁界が印加された場合には、動作の保証はできなくなりますのでご注意ください。

磁界センサ感度の直線性は、 $0\pm 10\text{ uT}$ の範囲内で、1%以下です。地磁気等の DC 磁界の影響で、測定原点磁界がずれている場合にはこの限りではありませんので、ご注意ください。

項目	センサ仕様
ノイズレベル	$10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @1 kHz*
最大印加磁界	$20\mu\text{T}$
直線性	$<1\%$ ($\pm 10\text{ uT}$)
	*シールドルーム内



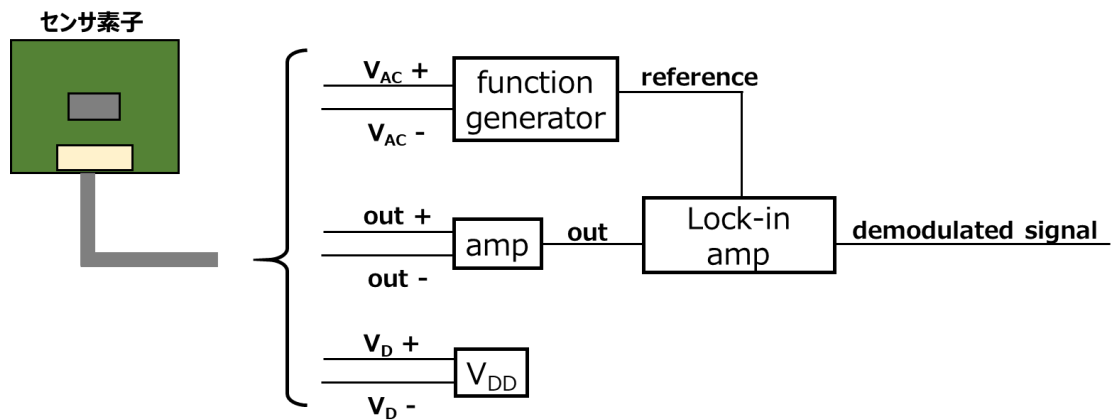
【動作パラメータ】

右の表に本センサの動作パラメータの仕様を示します。詳細は後述しますが、 V_{DD} は GMR 素子にブリッジ印加するドライブ電圧、 V_{AC} は変調交流磁界端子に印加する電圧、 f は変調交流磁界の周波数です。

項目	仕様	備考
V_{DD}	$<12\text{ V}$, typ.: 9V	電池推奨
V_{AC}	$<2\text{ V}_{\text{rms}}$	$i < 100\text{ mA}_{\text{rms}}$
f	$<100\text{ kHz}$, typ.: 20 kHz	

V_{DD} は GMR 素子に直接印加する電圧なので、なるべく低ノイズにして高感度測定したい場合には、電池による電圧印加を推奨します。典型値は 9V です。変調交流磁界端子には最大で $100\text{ mA}_{\text{rms}}$ くらい流れます。電流を流せる交流電源を用意してください。交流周波数は $10\text{--}20\text{ kHz}$ が典型値です。 100 kHz 程度にしても構いませんが、高周波にするほど、配線系・装置系のインピーダンスの影響が大きくなり、想定した電圧が印加できなくなる可能性があります。

センサ配線と測定器接続



■各ユニットと配線

上に、センサ素子と測定機器との配線の模式図を示します。各配線には、交流変調磁界用の「 V_{AC} 」、ブリッジ出力の「out」、VDD用の「 V_D 」と各々記されています。それぞれが正負あります。

「function generator」は交流電源です。電流容量があれば、いわゆる発生器、function generatorを用いることができます。波形はサイン波で良いです。それ以外の矩形波や三角波を用いても観察はできますが、位相検波をする都合上、サイン波からずれる分だけ SN 比が低下します。

「amp」はブリッジ出力用の差動アンプです。一般的な低ノイズの計装アンプを用いてください。アンプのゲインは 100 倍程度が良いです。

「 V_{DD} 」は GMR ブリッジ用電源です。上述のように電池を使うことを推奨しますが、一般的な安定化電源でも構いません。

「Lock-in amp」はロックインアンプです。市販のもので十分です。電圧入力端のビット数が(ビット分解能)が大きいほど大きな SN 比が期待できます。ロックインアンプには交流電源の発信源信号をリファレンスとして入力してください。この周波数と位相で位相検波することになります。ロックインアンプのアナログ出力をとれば、復調された磁界信号となります。この信号を所望の、オシロスコープなり、別の機器のアナログ入力なりに接続してください。センサ系、配線系の状況により多少の位相ずれが発生する可能性があります。そのような場合には、ロックインアンプで調整するか、符号付絶対値(R)出力を選んでください。観測したい磁界信号、およびそのノイズレの状況を勘案して適切な時定数を設定してください。

センサの磁界検出軸は図の左右方向です。センサの詳細は、IoT モジュールのアプリケーションノートを参照してください。

■参考文献

S. Shirotori et al.: IEEE Trans. Magn., 57, 4000305 (2021)

A. Kikitsu et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 62, SB1007 (2023)

- お問い合わせ

操作方法などお困りの場合には下記よりお問い合わせください

一般社団法人エッジプラットフォームコンソーシアム

<https://www.epfc.jp/contact/>