

光ポンピング原子磁気センサにおける 差動計測の適用範囲の検討

The range of applicability for differential measurement on optically pumped atomic magnetometers

市原直⁽¹⁾, 鎌田啓吾⁽²⁾, 伊藤陽介⁽²⁾, 水谷夏彦⁽¹⁾, 小林哲生⁽²⁾

(1) キヤノン株式会社 (2) 京都大学 大学院工学研究科

Sunao Ichihara⁽¹⁾, Keigo Kamada⁽²⁾, Yosuke Ito⁽²⁾, Natsuhiko Mizutani⁽¹⁾, and Tetsuo Kobayashi⁽²⁾

(1) Canon Inc. (2) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract In the field of biomagnetic measurements, optically pumped atomic magnetometers are expected to be a key device. Differential measurements have been shown to suppress the magnetic noise under identical bias condition for the two sensors. Here, we propose a method for the differential measurement which takes into account the deviation caused by the transfer function for an uneven bias condition. The noise suppression with our method was experimentally verified even when the resonance frequency difference was as large as 4 Hz.

1. 初めに

光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)は超伝導量子干渉素子(SQUID)に匹敵する感度を有し[1], 液体ヘリウムによる冷却も不要なため, 生体磁気計測において有望な技術である. OPAMによる差動計測の試みとして, 複数の磁場測定領域におけるバイアス静磁場を等しく揃えたときには, 遠方からの磁場ノイズの影響を抑えて磁気計測のノイズレベルを低減できることが示されている[2]. バイアス静磁場についての制約条件は, OPAMの応答特性がSQUIDとは異なり, バイアス静磁場によって定まるラーモア周波数をピークとする共鳴型であるために生じるものである.

差動計測の適用条件を拓げる試みとして, 共鳴周波数 0.5 MHz から 1.3 MHz の RF 周波数帯の OPAM において, 磁場をセンサ出力に変換する係数がセンサ同士で異なっている際に, その場で測定した補正係数を乗じてキャリブレーションする

ことで, 差動計測によるノイズ低減性能が向上することが報告されている[3].

我々は, 生体磁気計測に適した低周波に共鳴周波数を有する原子磁気センサにおいて, 伝達関数が異なっている場合の差動計測を試みた. すなわち, バイアス静磁場に依存する伝達関数をその場計測で推定し, この伝達関数で各センサからの出力を補償したのち差動演算を行った. この方法を Compensated Differential Measurement (CDM) と呼ぶことにする. 2つのセンサのバイアス静磁場に差を与えた条件下で差動計測を行い, CDMの有効性を実験的に検討したので報告する.

2. 実験方法

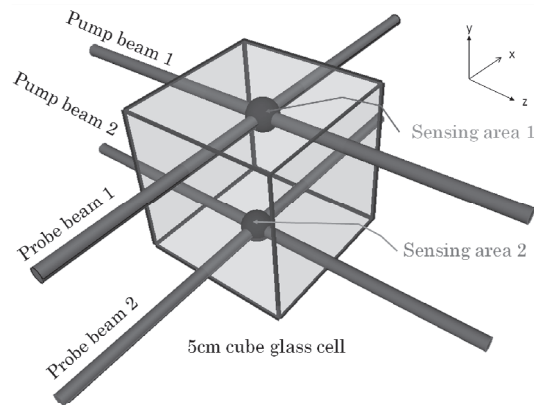


図1. 実験系配置図

差動計測の実験系として, 図1に示すよう2つのセンサを構成した. カリウム原子を封入した5cm角のガラスセルに, ポンプ光及びプローブ光のビームをそれぞれ2本ずつ照射し, セル内の上下3cm離れた2ヶ所でポンプ光とプローブ光が直交するように配置した. 磁気シールド内に3軸のへ

ルムホルツコイルと勾配磁場コイルを配置した。ポンプ光と平行である z 方向にバイアス磁場を印加し、上側のセンサ領域では、10 Hz の磁気信号に共鳴するような条件を維持し、一方、下側のセンサ領域に印加するバイアス磁場は実験パラメータとして、2つのセンサ領域における共鳴周波数に差を与えた。上側、下側のバイアス磁場を定めた後、まず各々のセンサの伝達関数を求めた。テスト信号として、 y 方向に振幅 10 pT_{rms}、2 Hz から 40 Hz まで 2 Hz 間隔の正弦波を重ね合わせた磁場を印加し、センサの応答の周波数スペクトルに対してフィッティングを行うことで伝達関数を推定した。次に、この伝達関数を用いて差動計測を行った。外部からの磁場ノイズの遮蔽が十分ではない状況を想定し、ファンクションジェネレータでホワイトスペクトルのノイズ電流信号を生成し、ヘルムホルツコイルに印加することで、振幅 20 fT_{rms}/Hz^{1/2} の磁場ノイズを生成してセンサに印加した。また比較例として、センサ出力に対して伝達関数の補償を行わない単純な差動計測を行った。これを Simple Differential Measurement (SDM) と呼ぶこととする。

3. 実験結果及び考察

図2は、共鳴周波数差をつけて単領域計測 (Single) と SDM, CDM を比較した一例であり、上部センサ領域を 10 Hz、下部センサ領域を 8 Hz に共鳴させたときの単領域計測 (Single) と SDM, CDM のスペクトルを比較したものである。単領域計測には、上部センサ領域を用いた。また、SDM では、10 Hz のテスト磁気信号に対する単領域測定 of センサ応答で磁場単位に変換している。

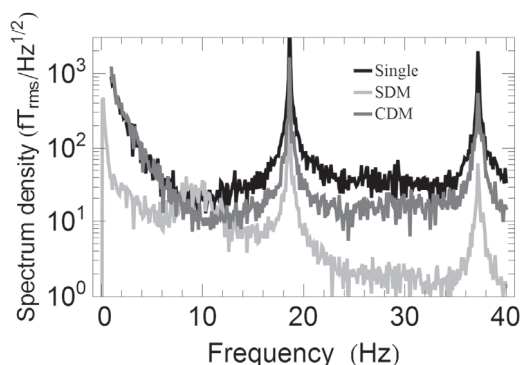


図2. 磁場ノイズスペクトルの比較

測定周波数である 10 Hz の磁場ノイズを比較す

ると、単領域計測では、19 fT_{rms}/Hz^{1/2} であり、SDM では 24 fT_{rms}/Hz^{1/2} と増加している。一方、CDM では 9.1 fT_{rms}/Hz^{1/2} まで低減されている。

図3は、両センサ領域間の共鳴周波数差に対する磁場ノイズレベルを示す。実線は、CDM の点に対する eye guide である。SDM ではバイアス磁場を一致させたときのみノイズが低減された。一方 CDM では、±4 Hz 以内の共鳴周波数差 (磁場換算で 1.1 nT 幅) ではノイズを低減できる。共鳴型の伝達関数は、共鳴周波数をピークとする関数であるため、共鳴周波数から離れた周波数帯では伝達関数で補償する際にポンプ光からのノイズなどセンサノイズなどが増幅される。この結果、CDM の適用範囲が制限されると考えられる。

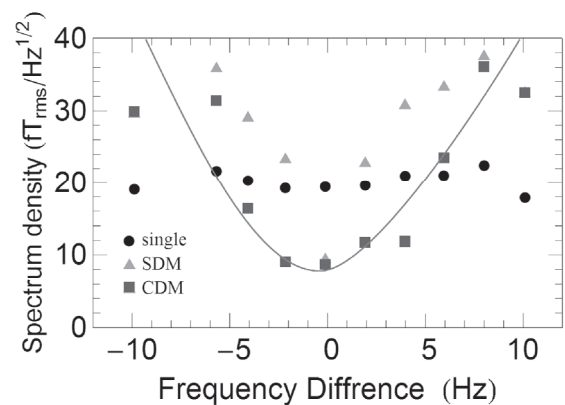


図3. 共鳴周波数差に対する磁場ノイズレベル

4. まとめ

本研究では、OPAM における差動計測の適用範囲に関して検討した。CDM を用いると磁場ノイズ低減の範囲を拡大できることが分かった。今後、この適用限界を決める要因を分析するとともに、CDM が可能な OPAM をモジュールとしてシステム化し、MEG 信号などの実際の生体磁気計測でも有用性を示す。

謝辞 本研究の一部は、先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム「高次生体イメージング先端テクノハブ」、文科省科研費挑戦的萌芽研究 (2650466)、基盤研究 A (15H01813) の補助を受けて行われたことを付記し謝意を表す。

参考文献

- [1] D. Budker, et al., Nat. Phys. **3**, 227(2007).
- [2] 市原 直, 他, 第 29 回日本生体磁気学会誌特別号 **27**, 68(2014).
- [3] D. A. Keder, et al., AIP Adv., **4**, 127159(2014).