

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18076

研究課題名(和文) アナログASICで拓く宇宙用磁界センサの放射線シールドレス化と電界誤検出の解明

研究課題名(英文) Development of a new spaceborne search coil magnetometer without a radiation shield using ASIC technology and improvement of its electric field sensitivity

研究代表者

尾崎 光紀(OZAKI, Mitsunori)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：70422649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、宇宙用サーチコイルを対象に、宇宙プラズマ中での高精度電磁界計測のため、サーチコイルの電界誤検出改善と放射線シールドに伴う重量増大の低減についてASIC(特定用途向け集積回路)技術を用いて検討を行った。金属よりも導電率の低い炭素繊維強化プラスチックを用いたスリット無の静電シールドを用いることで、渦電流損を低減しながら優れた電界シールド性能(従来より10 dB改善)を実現した。また、金属の塊と見なせるサーチコイルのセンサ自身を放射線シールドとして流用するため、極端に小型化を図ったASICプリアンプをセンサに内蔵し放射線シールドレス化を図り、新たな宇宙用サーチコイルの試作モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we studied a radiation shieldless technique and an improvement of electric field sensitivity for spaceborne search coil magnetometers to achieve high accuracy measurements of plasma waves in space plasmas. We improved the electric field sensitivity by using a slitless electrostatic shield made of carbon fiber reinforced plastic, which has a lower conductivity than that for a metal. We developed a prototype model of a search coil magnetometer with a built-in ASIC preamplifier to utilize the search coil sensor as a radiation shield.

研究分野：電波情報工学

キーワード：アナログASIC サーチコイル磁力計 放射線 プラズマ波動観測

1. 研究開始当初の背景

地球周辺宇宙(静止軌道まで)には放射線帯が形成され、商用衛星サービスなどの宇宙インフラストラクチャーへの影響が懸念されている。宇宙プラズマは密度が低いため無衝突プラズマであり、粒子のエネルギー交換過程でさまざまなプラズマ波動が生起する。プラズマ波動は宇宙電磁環境を知る重要な手がかりとなり、そのエネルギーと方向を高精度に知ることはきわめて重要になる。このため科学衛星に電磁波観測機を搭載し、放射線帯の電磁環境調査が行われている。科学衛星は移動しながらの観測となるため、現象の時間変動と空間変動の分離が難しい。しかし、2000年代より宇宙電磁環境調査は現象の時空間変動を切り分けるため、複数衛星による多点観測が主流となりつつある。高コストとなる複数衛星観測を実現するには、衛星搭載用電磁波観測機の観測性能を維持し、かつ観測機の小型・軽量化を図る技術開発研究が計測工学の分野で必須となる。また、単純な観測機の小型・軽量化ではなく、放射線帯で生起するプラズマ波動の高精度観測のため、電磁界センサのプラズマ特有の影響を加味し、かつ厳しい宇宙環境(温度、放射線)に適応した小型・軽量化を図った衛星搭載機器の開発が要求されている。

2. 研究の目的

科学衛星による交流磁界観測(数 Hz ~ 100 kHz 程度)には、誘導磁力計のサーチコイルが用いられる。サーチコイルは、センサとセンサが検出する微弱な(数十 nV オーダー)誘導電圧を増幅するための超低ノイズプリアンプから成る。センサ部は衛星本体からの干渉ノイズを避けるため、数 m 長のマストやブームの先端に取り付けられ、宇宙環境に暴露される。一方で、プリアンプは本来センサ直下に配置できることが望ましいが、マストやブーム先端の厳しい宇宙環境(温度、放射線)のため、衛星本体内に置き宇宙環境からの動作影響を軽減している。衛星本体に配置しているが、厚い金属で覆われた放射線シールドが施され、質量は地上観測機器に比べて大きい。さらにプラズマ波動には、静電波と電磁波モードが混在し、本来磁界成分のみを検出すべきサーチコイルの電界応答を考慮する必要がある。このように宇宙用サーチコイルの小型・軽量化には、宇宙プラズマ中の電界誤検出を考慮しながら、放射線耐性と広い動作温度範囲に対応する機能改善の問題を抱えている。

これらの問題に対し本研究は、宇宙プラズマ中の電磁波計測の信頼性向上のため、ロバスト性に優れかつ放射線シールドレス化を図った小型・軽量の宇宙用サーチコイルの実現を研究目的とする。特にアナログ ASIC(特定用途向け集積回路)技術を用いて、極端な

小型化と設計パラメータの自由度を上げることで、問題の解決と環境耐性向上(放射線耐性と温度補償範囲拡大)を図る。

3. 研究の方法

宇宙プラズマ中では密度の粗密により強い静電波と電磁波が混在し、サーチコイルの電界誤検出を考慮する必要がある。サーチコイルによる電界誤検出の問題に対し、等価回路モデルの導入と電界シールド特性に優れた静電シールドをサーチコイルに施し、電界誤検出の改善を図る。また、従来のディスクリット部品によるプリアンプと同等の低ノイズ性能を維持しながら、アナログ ASIC 技術により放射線耐性と広い動作温度の改善を図りプリアンプの小型・軽量化を行う。宇宙環境では放射線による半導体素子の電気性能劣化を抑制するために厚み数 mm の金属で電子回路に放射線シールドを施す必要がある。この放射線シールドに対し、我々は金属の塊と見なせるサーチコイル内に ASIC プリアンプを挿入し、放射線シールドレス化を図る。これは放射線シールドの質量低減だけでなく、サーチコイルとプリアンプ間の距離を最短にでき、プラズマ中の電界誤検出を防ぐ上でも重要になる。また、従来のプリアンプ(10cm 角程度)を ASIC プリアンプという 1 チップ化(ベアチップ 5 mm 角)を図るといった極端な小型化によりセンサ内部にプリアンプを内蔵するという本提案ができ、従来にない新しい宇宙用サーチコイルとなる。これらは、宇宙プラズマという特殊環境下を想定した宇宙用サーチコイルとして従来にない高信頼計測技術の確立に貢献する。

4. 研究成果

研究の方法で示した宇宙用サーチコイルを取巻く問題とその解決に対し、研究成果を示す。

(1) 電界誤検出の改善

サーチコイルの電界誤検出に対し、電界誤検出の低減にはサーチコイルインピーダンスの低減が重要となることを等価回路モデルより明らかにした。この電界感度に対する等価回路モデルの構築により、電界感度改善に対するセンサ設計指針を示すことが可能となった。従来の静電シールドには、渦電流損を低減するためにスリットの入った金属でサーチコイルを覆い静電シールドを施していた。しかし、このスリットが電界シールドの性能劣化の要因になることを示した。この解決には、金属よりも低い導電率をもつ材料で渦電流損を低減しながら、スリットの無い静電シールド構造とすることが望ましい。我々は、金属よりも導電率が低く、優れた剛性をもちかつ軽量である炭素繊維強化プラスチックを静電シールド材として採用し、渦

電流損の低減と電界シールド性能向上を両立できることを明らかにした。

(2) ASIC プリアンプの改良

宇宙の過酷な温度環境への適用を図るため、デバイスの温度依存性をキャンセルするバンドギャップ回路の導入を検討した。その結果、ASIC プリアンプの動作温度は衛星搭載機器として使用可能である -60 度から +100 度まで拡大することに成功した。特に、クロードループゲインはチップ内に内蔵するパッシブ素子の相対比精度でゲインの温度感度が決まるが、オープンループゲインで動作する周波数領域では、プリアンプを構成するトランジスタのトランスコンダクタンスでゲインが決まるため、導入したバンドギャップ回路により動作温度範囲の拡大だけではなく、ゲインの温度感度も数十分の一まで低減できることを明らかにした。また、ASIC プリアンプには、放射線耐性を考慮したレイアウト技法を導入しており、実際に放射線試験(線、線)を行った。エネルギー200 MeVの線に対して、ラッチアップが生じることなくシングルイベント効果に対して良好な耐性を示した。また、線、線ともに宇宙用機器の目安となる 100 krad のトータルドーズ量に対して十分な耐性を示し、電気性能の劣化は生じなかった。さらに、周波数 100 Hz 以下には、電磁イオンサイクロトロン波などのイオンダイナミクスに関連した重要なプラズマ波動が存在する。このため、フリッカ雑音が支配的となる 100 Hz 以下における磁界感度向上の検討として変調技術を利用したチョッパアンプの評価も行った。チョッパアンプは従来の増幅器に比べて回路構成が複雑になるが、ASIC 技術により小型化を図りながら周波数 1 Hz で従来に比べて最小磁界感度 14 dB の改善を得た。

(3) 磁性体コア形状の検討

提案する ASIC プリアンプをサーチコイル内に配置するには、コイル内に物理的な空間が必要となる。しかし、従来のサーチコイルは、磁性体コアとして角柱を使用しており、ASIC プリアンプを配置するための空間が存在しない。同じ磁性材料であっても磁性体コアの実効透磁率はコア形状(断面、長さ)でその値は異なり、コアの実効透磁率はサーチコイルの電気性能を決める重要な設計パラメータの一つとなる。センサ内部に ASIC プリアンプを内蔵させるためにコア形状を変化させ、実効透磁率への影響を評価した。ここでは、従来の棒状コアを分割し、同じ体積だが ASIC プリアンプを配置する空間を備えた分割コアの使用を検討した。電磁界シミュレーションと実測ともに磁性体コアの体積は同じであるが、ASIC プリアンプを配置する空間を備えた分割コアの実効透磁率の劣化は確認されなかった。磁性材料パーマロイ(初透磁率 10,000)長さ 200 mm、断面 10 mm

角の磁性コア(従来)とその断面を4分割しASIC プリアンプの内蔵空間を備えた分割コアでは、従来に比べて 1.4 dB の実効透磁率向上が確認できた。これは、磁性体コアを分割することでコア断面が小さくなり、より周辺の磁束をコアに集中できたことが要因であると考えられる。本研究で提案するサーチコイル内に ASIC プリアンプを内蔵するためのコア形状変化により、サーチコイルの最小磁界感度の劣化は生じないことを明らかにした。

(4) 宇宙用サーチコイルの試作モデル開発



図1: ASIC プリアンプ内蔵サーチコイルの試作モデル

表1: 試作サーチコイルの諸元

項目	値
サイズ	42 x 100 mm
重量	180 g
消費電力	0.44 mW
動作温度	-60 ~ +100 度
コイル巻き数	12000 巻き
コア	フェライト (5x5x90 mm、4本)
静電シールド	CFRP 円筒(厚み 1 mm)

以上の検討を踏まえて、ASIC プリアンプをサーチコイル内に配置した宇宙用サーチコイルの試作モデルを開発した。図1に試作した ASIC プリアンプ内蔵サーチコイルの外観を示す。また表1にその諸元を示す。電界誤検出を防ぐ静電シールドには、従来の渦電流損を防ぐためのスリット入りの金属板から炭素繊維強化プラスチックのスリット無の円筒を採用している(従来に比べて電界シールド効果 10 dB 改善)。試作モデルのゲイン特性を図2に示す。ASIC プリアンプ内蔵に伴いセンサとプリアンプの電磁結合が生じゲイン特性劣化が懸念された。しかし、ASIC プリアンプ内蔵前後でゲイン特性に変化は見られず、シミュレーションに従った良好なゲイン特性が得られた。また、磁界感度特性を

図 3 に示す。周波数 1 kHz で 30 fT/ Hz の最小磁界感度が得られており、典型的なプラズマ波動を計測するのに十分な性能を有していることが確認できた。なお、周波数 100 Hz 以下でのシミュレーションと実測の磁界感度の差は、シミュレーションの雑音モデルの誤差に起因するものであることがわかっている。

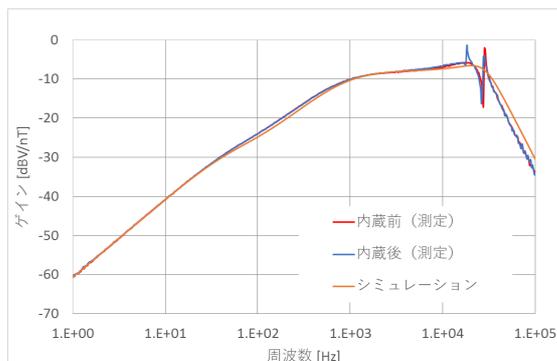


図 2：試作サーチコイルのゲイン特性

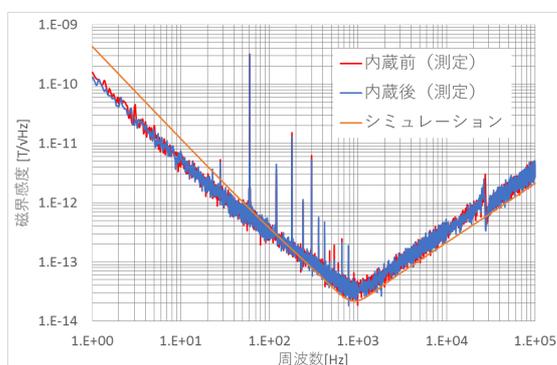


図 3：試作サーチコイルの磁界感度

放射線シールドレス化に対し、サーチコイル内での放射線環境を放射線シミュレーションにより解析を行った。線に対して約 240 MeV 以下のエネルギーに対してサーチコイルセンサがシールド可能であることがわかった。線は透過率が高いため、線のようなセンサのシールド効果は得られなかったが、ASIC プリアンプのトータルドーズ耐性より、宇宙環境を模擬しても十分なトータルドーズ耐性を有することがわかった。

これらの結果は、従来の宇宙用サーチコイルが抱える電界誤検出と小型・軽量化の問題に対し、アナログ ASIC 技術によりセンサ内部にプリアンプを内蔵した新たなセンサ構成を提供し、宇宙プラズマ環境における高精度電磁界計測において重要となる。今後、将来の科学衛星搭載用サーチコイルに電界誤検出低減などの重要な設計指針を与え、宇宙電磁環境の定量理解に貢献するものになると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Ozaki, M., S. Yagitani, H. Kojima, K. Takahashi, H. Koji, T. Zushi, and Y. Tokunaga, Development of an ASIC preamplifier for electromagnetic sensor probes for monitoring space electromagnetic environments, Earth, Planets and Space, 68:91, DOI: 10.1186/s40623-016-0470-9, 2016, 査読有.

〔学会発表〕(計 7 件)

Tokunaga, Y., M. Ozaki, S. Yagitani, T. Zushi, and H. Kojima, Development of a miniaturized search coil magnetometer for cube-satellite experiments, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, May 20 to 25, 2017, Makuhari Messe (Chiba) (発表確定).

徳永祐也, 尾崎光紀, 八木谷聡, 小嶋浩嗣, 放射線耐性に優れた小型サーチコイル磁力計の開発, 2017 年電子情報通信学会総合大会, 2017 年 3 月 22 ~ 25 日, 名城大学 (愛知県名古屋市).

Tokunaga, Y., T. Dejima, M. Ozaki, S. Yagitani, H. Kojima, Miniaturization and noise reduction techniques of search coil magnetometers for micro satellite experiments, 13th Annual Meeting, Asia Oceania Geosciences Society, July 1 to August 5, 2016, Beijing (China).

徳永祐也, 尾崎光紀, 八木谷聡, 小嶋浩嗣, ASIC プリアンプ内蔵型サーチコイルの基礎検討, Japan Geoscience Union Meeting 2016, 2016 年 5 月 22 ~ 26 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市).

糀宏樹, 尾崎光紀, 八木谷聡, 小嶋浩嗣, 頭師孝拓, プラズマ波動観測用チョッパ-ASIC プリアンプによるフリッカ雑音の低減, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会 2015 年 10 月 31 日 ~ 11 月 3 日, 東京大学 (東京都).

Ozaki, M., S. Yagitani, H. Kojima, H. Koji, and T. Zushi, Recent progress in developing search coil magnetometer using ASIC technology toward micro-satellite experiments, Japan Geoscience Union Meeting 2015, 2015 年 5 月 24 ~ 28 日, 幕張メッセ (千葉県千葉市).

Koji, H., M. Ozaki, S. Yagitani, H.

Kojima, T. Zushi, and A. Yoshida,
Improvement of dynamic range of ASIC
waveform receiver for plasma wave
observations, Japan Geoscience Union
Meeting 2015, 2015年5月24~28日,
幕張メッセ(千葉県千葉市).

〔その他〕

ホームページ等

<http://ridb.kanazawa-u.ac.jp/public/detail.php?id=3006>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 光紀 (OZAKI, Mitsunori)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号: 70422649

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

八木谷 聡 (YAGITANI, Satoshi)
金沢大学・電子情報学系・教授

小嶋 浩嗣 (KOJIMA, Hirotsugu)
京都大学・生存圏研究所・准教授