

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：54601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23464

研究課題名（和文）将来衛星多点観測ミッションを実現する小型・高性能な新型プラズマ波動観測器

研究課題名（英文）The new plasma wave instruments for future multiple-point observation missions

研究代表者

頭師 孝拓（Zushi, Takahiro）

奈良工業高等専門学校・電気工学科・助教

研究者番号：10846827

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：近年、観測対象の多様化による搭載機器の増加や超小型衛星の利用により衛星搭載機器の小型が求められており、プラズマ波動観測器についても同様である。本研究ではプラズマ波動観測器のさらなる小型化に向け、周波数特性を可変とした専用アナログ集積回路を用いた、波形・スペクトル両用の小型プラズマ波動観測器を提案し、その実現に必須である専用集積回路の開発を行った。専用集積回路は1成分あたり1.2 mm x 3.0 mmのサイズとなり、シミュレーションによる検証を行い、必要な性能が得られていることを確認した。これにより、従来大型であったプラズマ波動観測器を大幅に小型化することが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、研究代表者らが提案している新型プラズマ波動観測器の実現にあたって特に重要である専用集積回路の設計を完了することができた。新型プラズマ波動観測器は従来の観測器と比べ大幅に小型化が可能であり、今後より増えると考えられる多点同時観測ミッションの実現には不可欠なものである。これは、プラズマ波動の多点同時観測を実施し、これまでに解明できなかった宇宙における電磁現象を理解することに大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Recently, the miniaturization of the instruments onboard scientific satellites is required because of the diversification of observation targets and the use of microsatellites. In this study, we propose a miniaturized plasma wave instruments for both waveforms and spectrum using an Application-Specific Integrated Circuits (ASICs) with variable frequency characteristics to further reduce the size of the plasma wave instruments, and we developed the ASIC for the new plasma wave instruments. The size of the developed circuit is 1.2 mm x 3.0 mm per component, and the required performance has been verified by circuit simulation. This research will enable us to significantly reduce the size of plasma wave instruments, which were previously large.

研究分野：宇宙プラズマ物理

キーワード：プラズマ波動 プラズマ波動観測器 特定用途向け集積回路

1. 研究開始当初の背景

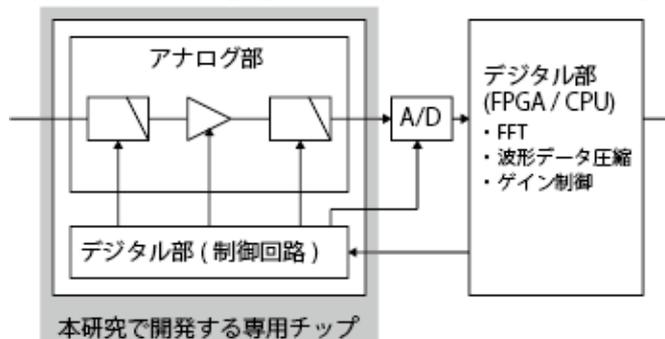
宇宙プラズマ波動は宇宙空間のプラズマ現象の解明にあたり重要な観測項目であり、多数の理学衛星にプラズマ波動観測器が搭載され観測が行われてきた。近年の重要と考えられている現象の一つとして地球電離大気の出流現象が挙げられる。地球上層の電離大気は極域において重力を振り切るだけのエネルギーを獲得し、宇宙空間に流出していることが知られている。これまでの観測結果から粒子の加速にはプラズマ波動が関わっていると考えられており、加速機構として波動-粒子相互作用によるエネルギーの授受が有望視されているが、具体的なメカニズムは明らかとなっていない。このメカニズムを特定するためには、加速領域においてエネルギー授受の定量的な議論が可能なデータを得る必要がある。しかし、従来から行われている単一衛星によるその場一点観測ではプラズマ波動の時間変動と空間変動を分離できずメカニズムの解明は困難であった。このような問題を解決するためには複数衛星による多点観測が必要となる。

2. 研究の目的

多点観測を行うためには複数の衛星を同時に打ち上げる必要があり、そのためには衛星本体、搭載する観測器ともに大幅な小型軽量化が求められる。その一方で、従来のプラズマ波動観測器は(1)高性能なアナログ回路が必要となり、それらは通常ディスクリート部品で構成される(2)波形補足型・スペクトル型の2種類の観測器の搭載が求められ、それぞれに別のアナログ回路が必要となるという2点から特に大型となっていた。これまでに、特定用途向け集積回路によって専用アナログチップを開発することで(1)の課題の解決が図られてきた。本研究では、(2)の課題の解決のため、波形補足型・スペクトル型の双方の観測器に使用可能なアナログ回路を提案する。さらに、そのような観測器に必要なアナログ回路を専用集積回路として開発することで、(1)(2)双方の課題を解決し、プラズマ波動観測器の大幅な小型化を実現する。

図1に本研究で提案する新型観測器の概要を示す。波形補足型・スペクトル型の観測器において必要となるアナログ回路は主にその帯域に違いがある。波形観測を行うためには観測帯域全体を測定するために広帯域な回路が必要となる一方、スペクトル観測を行う際には帯域を分けて測定できる利点を生かすために狭帯域の回路が求められる。そこで、新型観測器においてはアナログ回路の周波数特性を切り替え可能な構造とし、広帯域・狭帯域を外部信号で制御できるような構成とする。また、スペクトル観測時には狭帯域にて波形を測定し、後段のデジタル部でFFTを実行することで周波数スペクトルを得ることを想定している。その際、広帯域で観測を行うために観測周波数のスイープを行う必要がある。専用アナログ回路は周波数応答の変更によりこのような動作も可能な構成とする。

以上のように、本研究で目的とする新型観測器はアナログ回路の構成を工夫することで2種類の観測器双方の機能を持たせ、切り替えて使用できるものである。本研究では、この専用集積回路の設計・開発を行う。



3. 研究の方法

目的とする観測器の実現に向け、以下の2点の事項について開発を行う。

(1) 新型観測器専用集積回路の設計・開発

本研究において、新型観測器専用集積回路の開発を行うにあたり、集積回路の設計プロセスにおける schematic レベルの設計及び layout レベルの設計を実施する。設計に当たって回路シミュレーションによる検証も行い、検証済みの専用集積回路レイアウトを完成させる。これにより、開発した回路は本研究終了後速やかに試作・検証の過程に入ることができる。

(2) 集積回路部品の広帯域化

先行研究により開発されたプラズマ波動観測器専用アナログ集積回路は、観測帯域が DC-100 kHz となっている。波形補足型観測器はデータ伝送帯域の制限からも観測周波数の上限を 100 kHz 程度に設定することが大半である一方、スペクトル型観測器では数 MHz までの観測帯域が求められる。そのため、先行研究で開発された回路ブロックの中で観測帯域の上限を上げる際に動作速度の不足する回路コンポーネントに対して改良を行う。

これらの開発を通して集積回路のプロセスとして TSMC 0.25 μm Mixed-Signal プロセスを使用し、schematic レベルの設計における回路シミュレーションには Tanner T-SPICE を使用した。また、layout レベルの設計においてはレイアウトの作成に cadence virtuoso を使用し、検証には Mentor Calibre を使用した。

4. 研究成果

(1) 新型観測器専用集積回路の schematic レベルでの設計

本研究で提案する新型観測器に必要なアナログ回路の設計を行った。図 2 に回路のブロック図を示す。新型観測器を実現するにあたり、観測帯域が可変となるアナログ集積回路の開発を行った。アナログ部は主に帯域制限フィルタ・メインアンプ・アンチエイリアシングフィルタの3つのブロックから構成される。これらのブロックについて、先行研究により開発された回路をベースに、新型観測器に必要な機能を実装、さらに性能の改良を行った。

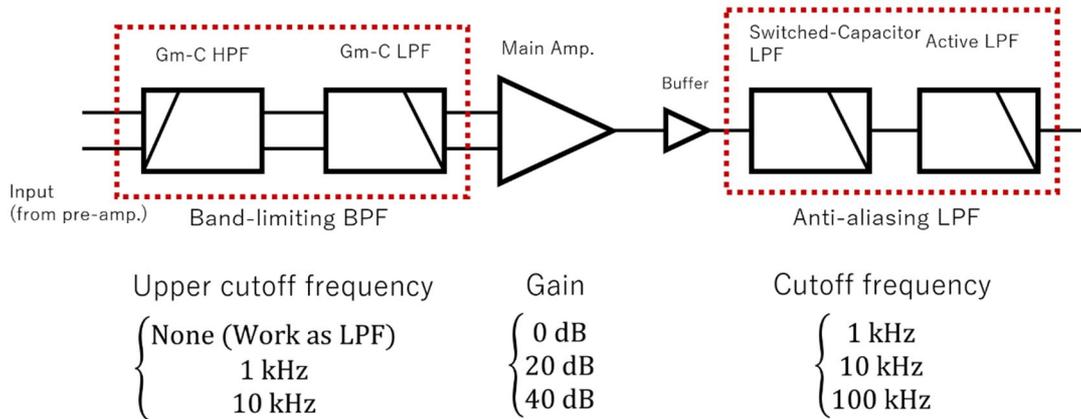


図 2. 新型観測器専用集積回路のブロック図

初段の帯域制限フィルタは、ハイパスフィルタ・ローパスフィルタを直列に接続した形で実現しており、ハイパスフィルタのカットオフ周波数を 1 kHz と 10 kHz から選択可能としている。さらに、波形捕捉型として動作する場合には低域のフィルタ処理が不要であるため、ハイパスフィルタをバイパスし、単にローパスフィルタとしての動作も選択可能としている。中段のメインアンプは外部の制御信号によりゲインを 0dB・20 dB・40 dB から選択可能な構成としている。先行研究で使用していたメインアンプに改良を加えることで、入力インピーダンスの増加及び回路面積の小型化に成功した。最終段のアンチエイリアシングフィルタは、集積回路に置いても精密にカットオフ周波数の決定が可能であるスイッチトキャパシタを用いたローパスフィルタと、スイッチトキャパシタフィルタからのクロックノイズを除去するローパスフィルタによって構成している。先行研究においてはノイズ除去フィルタにおいてダイナミックレンジが低下してしまう問題があったが、本研究では回路構成を変更し、アクティブフィルタを構成することで改善を行った。アンチエイリアシングフィルタはカットオフ周波数が 1 kHz・10 kHz・100 kHz から可変となっており、設定したカットオフ周波数に応じて内部の 2 種類のフィルタ双方のカットオフ周波数を変更する構成となっている。

これらの開発した回路についてシミュレーションによる検証を行った。図 3 に回路全体の周波数応答を示す。波形捕捉型・スペクトル型それぞれを想定した設定での周波数応答についてどちらの場合も望む特性が得られており、これにより新型観測器専用集積回路の schematic レベルでの設計が完了した。

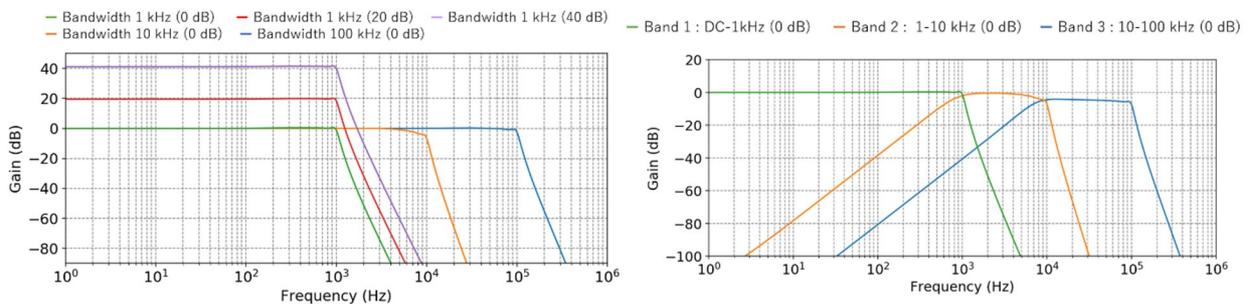


図 3. 開発した回路の周波数特性：(左) 波形捕捉型観測器を想定した設定での周波数特性 (右) スペクトル型観測器を想定した設定での周波数特性

(2) 新型観測器専用集積回路の layout レベルでの設計

(1) で設計した回路について、集積回路としての製造に必要な layout レベルでの設計を行った。図 4 に設計した回路レイアウトを示す。回路全体のサイズは 1.2 mm x 3.0 mm となった。これにより、5 mm x 5 mm のチップを想定した場合、4 チャンネル分の回路を搭載することができ、電場や磁場の 3 成分をカバーし、チャンネルによっては必要に応じて波形捕捉型・スペクトル型の両方で同時に観測ができると見込める。

(3) オペアンプの広帯域化

先行研究により開発された回路を調査したところ、広帯域化にあたってはスイッチトキャパシタフィルタの改良が必要であることが判明した。特に、スイッチトキャパシタフィルタに用いられているオペアンプの動作周波数が不足しているため、オペアンプの広帯域化を行った。現在用いている構成のスイッチトキャパシタフィルタにおいてカットオフ周波数を 1MHz とするためには数百 MHz 程度の帯域が必要だと考えられる。

図 5 に開発したオペアンプのオープンループ特性を示す。オペアンプの動作帯域であるユニティゲイン周波数が先行研究のものより高く、200 MHz 程度となった。これにより、スイッチトキャパシタフィルタをカットオフ周波数 1 MHz で動作させるに足りるオペアンプを開発することができた。今後、スイッチトキャパシタフィルタに組み込んでの検証などを行う予定である。

以上のように、本研究の目的である新型観測器専用集積回路の開発を完了することができ、また今後の高性能化に必要な回路部品の改善も行った。これにより、我々の提案している新型観測器を実現する上で特に大きな課題を解決したといえる。今後、開発した集積回路を試作・検証し、周辺回路の開発を行うことで新型観測器の試作を行う予定である。また、将来この構成の観測器を広帯域化することにより、従来の性能を保ったまま大幅な小型化が可能となり、プラズマ波動の多点同時観測に大きく近づくことが期待できる。

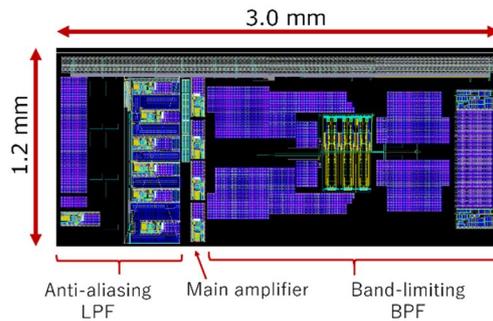


図 4. 開発した専用集積回路のレイアウト

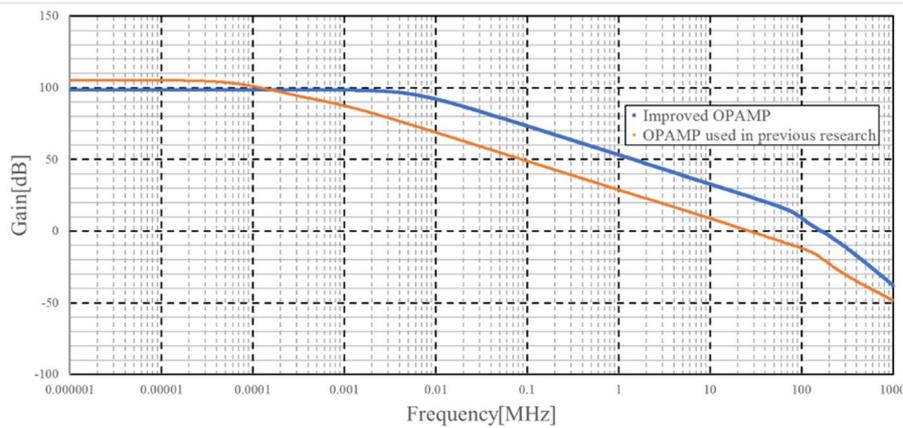


図 5. 開発したオペアンプと先行研究で使用されていたオペアンプのオープンループ特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 頭師 孝拓, 小嶋 浩嗣
2. 発表標題 波形・スペクトル双方の観測が可能な小型プラズマ波動観測器の開発
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Zushi, Hirotsugu Kojima
2. 発表標題 The new type of plasma wave instruments capable of both waveform and spectrum observation
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zushi Takahiro, Kojima Hirotsugu
2. 発表標題 Development of the analog integrated circuit for the new plasma wave receiver
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakao Shoya, Zushi Takahiro, Kojima Hirotsugu
2. 発表標題 Development of the wideband analog integrated circuit for plasma wave receivers
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------