

京都大学	博士 (工 学)	氏名	福 原 始
論文題目	Miniaturization and Integration of Measurement Systems for Space Electromagnetic Environments (宇宙電磁環境計測システムの小型集積化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、宇宙電磁環境を計測する宇宙機搭載システムの小型集積化に関する研究成果について述べたものである。具体的には、宇宙空間で発生するプラズマ波動を観測する受信器の小型集積化、および、宇宙電磁環境を決定する「波動粒子相互作用」を直接計測する初めての計測アルゴリズムのハードウェア化を特定用途集積回路(ASIC)技術によって実現している。本論文は7章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景となる宇宙電磁環境とそれを観測するセンサーについて述べている。</p> <p>第2章では、本論文で用いるASIC技術について述べ、更に、小型集積化のターゲットとなる科学衛星搭載用プラズマ波動観測装置について説明を行っている。また、ASICによる小型集積化を図るにあたり、従来からある周波数掃引型プラズマ波動観測器の欠点である時間分解能の粗さを克服する新しい手法の提案も行っている。</p> <p>第3章では、ASICを用いて小型集積化を行ったプラズマ波動観測器のアナログ部についてその設計、および、試作結果の評価について述べている。波形捕捉タイプのプラズマ波動観測器で使用するコンポーネントとして、低域通過フィルタ、差動アンプ、そして波形サンプリングによるエリアシングを除くためのスイッチトキャパシタフィルタのASIC化に成功している。特に、フィルタ部では外付けの大きなインダクタやキャパシタンスを用いることなく所望の特性をチップ1つで実現した。また、温度ドリフトが大きいGm-Cフィルタには、トランジスタの温度特性を利用したカレントソースを用いて温度補償回路を実現させることに成功した。周波数掃引型プラズマ波動観測器で使用するコンポーネントとしては、観測周波数を掃引しながらダウンコンバージョンを行うためのミキサ、スイッチトキャパシタタイプの帯域通過フィルタ、およびPLL(Phase-Locked Loop)を構成するVCO(Voltage Controlled Oscillator)、ループフィルタのASIC化を実現させた。特に周波数掃引型プラズマ波動観測器では低周波VCOが必要となりオンチップのインダクタを用いることができないため、Gm(相互コンダクタンス)制御による発振周波数の制御を行うVCOを設計・試作し動作検証を行った上で、さらに性能を向上させるための改良点についても明らかにした。</p> <p>第4章では、第3章でASIC化に成功した各アナログコンポーネントをもとに波形捕捉型プラズマ波動観測器を組み込んだシステムチップを実現した。5mm角のチップ内に波形捕捉型プラズマ波動観測器アナログ部6チャンネルを組み込んだシステムチップを開発しその機能・性能評価を行い、実際の科学衛星搭載プラズマ波動観測器に匹敵する性能をもつ事を実証した。さらに、電源など、必要周辺デバイスとシステムチップをともに組み上げた受信器システムを設計し、基板サイズにして45mm x 50mmと、従来型受信器の基板に対して1チャンネルが占める面積が20分の1という大幅な小型化が可能なことを実証した。</p> <p>第5章では、小型化したプラズマ波動観測器の科学的観測へのアプリケーションとして、手のひらサイズの多数の小型センサーノードによるプラズマ波動モニターシステムと、ナノサットコンステレーション観測による地球プラズマ圏の微細構造観測に対する</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	福 原 始
<p>ミッションを考案した。プラズマ波動モニターシステムは、多数のセンサーノードを宇宙空間に無作為に配置し、それぞれの点で自然発生する、あるいは人類の宇宙活動により生じるプラズマ波動を同時に観測し、プラズマ波動現象の時間的・空間的な変化を時々刻々とモニターするシステムである。本章では、このシステムの概要とセンサーノードの構成、プラズマ波動センサーの感度について述べた。一方、プラズマ波動モニターシステムは、地球プラズマ圏の微細構造観測ミッションにおいて直線偏波の電波を放射する電波源衛星と小型プラズマ波動観測器を搭載するナノサット複数機で構成され、電波源衛星から送信した電波のファラデー回転を各ナノサット衛星でとらえることにより、伝搬途中でのプラズマ微細構造を捉える。本章では、この観測原理をレイトレーシングによるプラズマ圏内電波伝搬モデル計算により検証し、従来の衛星によるイメージングに比べ約 10 倍の空間分解能でプラズマ圏の密度微細構造を捉えることが可能であることを示した。そして、さらに、この考案したミッションの詳細設計も行い、構成する各衛星の軌道、電力リソースなどを評価した上でミッションのフェージビリティを示した。</p> <p>第 6 章では、宇宙プラズマ中でその電磁環境を決定する「波動粒子相互作用」を直接衛星機上で捉えることを目的とした新しい観測手法 WPIA(Wave-Particle Interaction Analyzer)を提案し、そのアルゴリズムを FPGA(Field Programmable Gate Array)内でハードウェア化して実現させた。この新しい観測手法では、波動-粒子間のエネルギー授受で本質となる、プラズマ波動電界ベクトルと粒子速度ベクトルの位相角を衛星機上で直接求める手法である。アルゴリズムではプラズマ波動観測装置のオンボード較正、座標変換など多くの計算プロセスが必要となるが、本論文で開発した FPGA によりこれらすべてのプロセスをリアルタイムで処理することが可能となることを示した。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文では、宇宙プラズマ中の電磁環境を知る上で重要となるプラズマ波動現象とそれによる粒子とのエネルギー交換を計測する観測装置の小型化を特定用途向け IC により実現したものである。また、その小型観測装置の利用によるナノサットコンステレーション観測を提案し、地球プラズマ圏の微細構造を捉えるミッション設計も行っている。本論文の主な成果は下記の通りである。

(I) 特定用途向け IC(ASIC)内に組み込むプラズマ波動観測器に必要なアナログコンポーネントについて設計を行い実現させた。特に、プラズマ波動観測器では多用される各種フィルタについては外付けのインダクタンスやキャパシタンスを利用することなくチップ内に配置されるもののみで実現に成功した。また、温度ドリフトが大きい Gm-C フィルタに対しては、トランジスタの温度特性を利用したカレントソース回路とそれによる温度補償回路を考案し、チップ内にインプリメントされたフィルタの温度特性を安定させることに成功した。また、周波数掃引型受信器で用いられる PLL で必要となる低周波用 VCO についても Gm を制御することによって発振周波数を変更させる方式を考案し動作させることに成功した。

(II) ASIC として設計したアナログコンポーネントを基盤として、波形捕捉型の受信器 6 チャンネル分を組み込んだシステムチップの開発に成功した。そして、電源等必要周辺回路と組み合わせた小型基板の開発にも成功し、1 チャンネルが占める面積が従来の波形捕捉型受信器基板の 20 分の 1 以下という小型化を実現した。

(III) 開発した小型のプラズマ波動観測器の利用を想定したナノサットによるコンステレーションミッションを考案した。電波源をもつ衛星から放射された電波をナノサット複数機で受信し、そのファラデー回転を利用してプラズマ圏での微細な密度構造を観測する手法を提案し、レイトレーシングによりその計測原理の妥当性を確認した。また、軌道設計や電力リソースの評価も行い、衛星ミッションとしてのフェージビリティを示した。

(IV) プラズマ波動と粒子間でのエネルギー授受を定量的に観測する新しい手法 WPIA を提唱し、そのアルゴリズムを FPGA としてハードウェア化することに成功した。そしてそのワンチップによる小型化とハードウェアによる高速処理を実現し、小型でありながらリアルタイム観測を保証できるシステムを構築した。

以上要するに、本論文は、科学衛星に搭載され宇宙電磁環境を計測するプラズマ波動観測器を専用のチップを設計・開発することによって非常に小型化することに成功し、また、それを踏まえた新しい観点での衛星ミッションを提案したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 8 月 24 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。