

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	人工電波除去機能を有する地上型 0.5-1.5GHz 帯マイクロ波放射計デジタル処理部の研究
氏 名(Name)	野母 悠矢
近年，人工衛星搭載型マイクロ波放射計により北極海において海氷面積の減少が確認されている．減少過程の理解には海氷厚の測定が重要であるが，現在使用されている観測周波数帯では測定可能な海氷厚の範囲に限界がある．より低い周波数帯（例えば 0.5-1.5 GHz，以下，低周波数帯と呼ぶ）の使用により厚さの測定範囲の拡大が期待されるが，人工衛星搭載型マイクロ波放射計による低周波観測は未だ実現されていない．低周波観測の実現にあたり，解決すべき問題の 1 つは人工電波干渉（Radio-Frequency Interference, RFI）である．RFI は自然電波より遥かに強力な人工電波による観測データへの影響のことで，特に低周波数帯では地球観測への帯域未割当と過密な電波利用によりその影響は非常に深刻である．そのため，リアルタイム RFI 除去処理は低周波観測の実現に必要な不可欠な機能である．日本ではマイクロ波放射計開発の継続計画があるが，RFI の研究は非常に遅れており，低周波観測の研究は行われていない．ソフトウェア無線技術によるリアルタイム RFI 除去を行うためのデジタル処理部の研究は特に米国で進んでいるが，その開発例は限られており，低周波観測に関する例はごく少数である．そこで本研究では，低周波観測の実現を目指して，地上型 0.5-1.5 GHz 帯マイクロ波放射計（以下，低周波放射計と呼ぶ）において RFI 除去機能の要となるデジタル処理部の研究と性能評価を行った． 本研究では，書き換え可能な集積回路 FPGA 上に高速フーリエ変換処理，積算処理，および RFI 除去処理を実装した．RFI 除去手法として周波数間比較法と尖度検出法を使用した．周波数間比較法では，新たなしきい値計算法として，周波数特性を平坦化した後のパワー比の下位データから，切断正規分布の考え方を利用して母集団の平均値と標準偏差を推定し RFI 判定を行う Lower-Percentile Truncated-Normal (LPTN) 法を提案し，積算処理後の平均パワーに対して適用した．尖度検出法では不偏化スペクトル尖度推定値$\hat{SK}$を計算し，RFI 判定を行った．FPGA 実装時の消費リソース量結果から，本研究の機能を近年登場している宇宙用 FPGA へそのまま移植可能であることが分かった． 実装終了後，デューティー比を変更することで連続波とパルス波を表現できるパルス状正弦波を用い，デューティー比と振幅値が既知の疑似 RFI 信号を生成してデジタル処理部単体の RFI 除去評価試験を行った．評価の結果，尖度検出法はデューティー比dが小さい（大きい）RFI 信号に対しては検出性能が高く（低く）なる傾向を示した．また，$d=0.5$ の場合には理論通り全く機能しなかった．一方，周波数間比較法の検出性能はデューティー比dに依存しなかった．両手法は原理的に独立しているため検出性能に違いがあり，組み合わせた場合にはデューティー比dが小さい（大きい）RFI 信号に対しては尖度検出法（周波数間比較法）で検出することで全体として検出率が向上することが確認された． 室内におけるデジタル処理部単体での人工電波測定実験では，増幅器等を用いず RF スイッチを介してアンテナと参照雑音源を直接 ADC に接続して測定を行った．解析の結果，RFI 信号は常に除去され，RFI 除去手法は正常に機能していることが確認された．今回の結果では，周波数間比較法が尖度検出法	

より多くの RFI 信号を除去していた。周波数間比較法では除去されなかった信号が存在したが，これは尖度検出法で RFI 信号と判定されて除去された。これより，両手法を組み合わせることでより多くの RFI 信号を除去できることを実データで確認した。また，同データを使用して本研究で提案した LPTN 法と，中央絶対偏差（MAD）および標準誤差（SE）を用いた従来のしきい値計算方法を比較した。使用したパワー比に対し，尖度検出法と目視確認の結果から，RFI 信号と判定されたデータが約 40 % を占めた。比較した結果，LPTN 法が最も精度良くしきい値を設定できた。SE は，パワー比が小さく RFI 以外と考えられる信号も含めてほぼ全て除去していた。LPTN 法と MAD の除去率はそれぞれ 34 % と 22.6 % となり，LPTN 法の従来手法に対する優位性が確認された。

低周波放射計全体システムによる屋外での人工電波測定試験では，天空方向と水平方向（北西 330 度）の 2 方向で測定を行った。この測定実験では校正によりアンテナ温度を算出し，尖度検出法のみを使用した。解析の結果，特に水平方向ではほぼ全域において $|\widehat{SK}| \gg 0$ となっており，一部の帯域では 10^5 K を超える高いアンテナ温度が確認された。これらの信号は尖度検出法により除去されたが， 10^5 K を超えるアンテナ温度の一部は除去されなかった。残った RFI 信号は周波数間比較法で除去できる可能性があるが，今回は放射計システムの周波数特性の影響により平坦化処理の実施は困難であったため，周波数間比較法は適用できなかった。しかしながら，尖度検出法はその影響を受けずに RFI 信号を検出できたことから，周波数間比較法に比べて実装しやすく，安定して RFI 除去処理ができることが分かった。

以上の通り，本研究では低周波放射計のデジタル処理部の構築と性能評価を行い，実データに対する良好な RFI 除去性能を確認するとともに，周波数間比較法の新たなしきい値設定法の優位性を確認した。本研究の成果は，人工衛星による低周波観測の実現に加え，RFI 対策の観点から日本のマイクロ波放射計の将来計画にも貢献できると考えられる。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Study of Digital Processor with RFI Removal Function for 0.5–1.5 GHz Ground-Based Microwave Radiometer
氏 名 (Name)	NOMO Yuya
In recent years, spaceborne microwave radiometers have revealed a decrease in Arctic sea-ice extent. While sea-ice thickness is essential parameter for understanding the processes behind this decrease, the existing frequency bands of microwave radiometers are less sensitive to sea-ice thickness. Although using lower frequencies (e.g., 0.5–1.5 GHz; hereafter “low-frequency band”) can extend the measurable range of sea-ice thickness, spaceborne microwave radiometers using low-frequency bands have not yet been realized. One of the reasons is the impact of man-made microwave signals or so-called radio-frequency interference (RFI). RFI signals are far stronger than natural radiation, and its impact in the low-frequency band will be more serious than in the existing measurement frequency bands due to no-frequency allocations for microwave radiometry and overcrowded man-made microwave signals. Therefore, real-time RFI removal capability is essential for realizing the low-frequency observations. In Japan, there are continuity plans for microwave radiometer development. However, RFI removal research has lagged far behind, and there is no research for low-frequency observations. In contrast, research on digital processor for real-time RFI removal using software-defined radio technology has been progressed, particularly in the United States, but demonstrated developments remain limited, and only a handful of reports address low-frequency observations. In this study, toward realizing low-frequency observations, I studied and evaluated a digital processor, which is key component for removing RFI signals in a ground-based 0.5–1.5 GHz microwave radiometer (hereafter “low-frequency radiometer”). Fast Fourier transform, integration, and RFI removal processing on the Field Programmable Gate Array (FPGA). As the RFI removal method, cross-frequency and kurtosis detection methods were used. In this study, for the cross-frequency method, I proposed a new thresholding approach, the Lower-Percentile Truncated-Normal (LPTN) method, which removes RFI signals by estimating the population mean and standard deviation from the lower-percentile samples of the power ratio based on truncated-normal theory. The LPTN method was applied to the averaged power spectrum after integration processing. The power ratio is output data after flattening the radiometer system’s frequency response. The kurtosis detection method computed the unbiased estimator of the spectral kurtosis $\widehat{SK}$ and then performed RFI detection. Based on the FPGA resource utilization results, the functions implemented in this study can be ported to recently introduced space-grade FPGAs without changing the functionality. After implementation, a stand-alone evaluation of RFI detection performance for the digital processor using pseudo-RFI signals with known amplitudes and duty cycles computed by pulsed	

sinusoid, which can generate continuous and pulsed wave by duty-cycle control was conducted. The kurtosis detection method tended to perform better for small duty cycles and worse for large duty cycles, and had no effect for 50 % duty cycle. On the other hand, the cross-frequency method showed comparable performance across all duty cycles. Because two methods are independent in principle, combining them improved overall detection performance.

In a laboratory measurement of RFI signals using the stand-alone digital processor, an antenna and a reference-load were connected directly to the ADC through a RF switch without any amplification. Both methods performed well and consistently removed RFI signals. In this experiment, the performance of cross-frequency method was better than that of kurtosis detection method, while some signals missed by cross-frequency were removed by kurtosis detection method. The improvement of RFI removal performance by combining both methods was verified by actual measurement data. Using the same data, in which RFI signals were estimated to occupy approximately 40 % of the band based on kurtosis and visual inspection, I compared LPTN with conventional threshold estimators including median absolute deviation (MAD) and standard error (SE). SE removed nearly all samples including low power-ratio likely unrelated to RFI. The removal rates of LPTN and MAD were 34.0 % and 22.6 %, respectively. LPTN provided the most accurate threshold and proved to be superior to conventional ones.

Outdoor measurements with the low-frequency radiometer were conducted in two antenna directions: zenith and horizontal (northwest, 330°). Antenna temperatures were derived by calibration, and only the kurtosis detection method was used. For both directions, antenna temperatures exceeding 100,000 K were observed in parts of the band. In particular, for the horizontal direction, almost the entire band showed the condition of $|\widehat{SK}| \gg 0$. Although most of these signals were removed by kurtosis detection method, some high antenna temperatures remained. While cross-frequency method could remove the residual RFI signals, flattening processing was difficult in this experiment due to the frequency response of radiometer system. However, because kurtosis detection method performed well regardless of the frequency response, it was found to be easier to implement and to provide stable RFI removal compared to the cross-frequency method.

In this study, I developed the digital processor for the low-frequency radiometer and evaluated its RFI removal performance, and confirmed good performance for real measurement data and that superiority of the LPTN method. The outcomes of this study are expected to contribute not only to the realization of spaceborne low-frequency observations but also, in terms of RFI removal, to the microwave radiometer development in Japan.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	野母 悠矢
審 査 委 員	主 査： 今岡 啓治
	副 査： 望月 信介
	副 査： 大澤 高浩
	副 査： 新銀 秀徳
	副 査： 井田 悠太
論 文 題 目	人工電波除去機能を有する地上型 0.5-1.5GHz 帯マイクロ波放射計デジタル処理部の研究 (Study of Digital Processor with RFI Removal Function for 0.5-1.5 GHz Ground-Based Microwave Radiometer)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 近年の北極海氷面積の減少が示すように、海氷の挙動は地球温暖化に対して脆弱である。海氷面積の減少には、海洋に蓄積された熱だけでなく海氷の運動が重要な役割を果たしている。海氷運動や海洋大気間のエネルギー交換において海氷厚は重要な要素であり、海氷分布に加えて継続的な観測が必要である。従来の周波数帯では海氷厚の測定範囲が限定されるため、電波利用が過密な低周波帯を利用して測定範囲を拡張する上で、人工電波干渉（以下 RFI）は大きな問題である。本研究では、海氷厚測定実証用に開発した地上型 0.5-1.5GHz 帯マイクロ波放射計（以下、低周波放射計）において、RFI 除去の要となるデジタル処理部の構築と性能評価についてまとめた。 デジタル処理部は高速 ADC・DAC、FPGA、CPU 搭載評価ボード上に構築された。受信器部からの電波信号を AD 変換し、以降の高速フーリエ変換、積算、及び RFI 除去等の処理を書き換え可能な FPGA 上に構築することで、広帯域の電波信号に対して実時間の RFI 除去を実現した。RFI 除去手法として周波数間比較法と尖度検出法を実装した。周波数間比較法における従来のしきい値設定法は、電波利用が過密な低周波帯では適切でないことから、RFI の影響が少ない電力下位データから切断正規分布の考え方にに基づきしきい値を設定する LPTN 法を提案・実装した。尖度検出法については不偏化スペクトル尖度推定値を周波数ごとに算出し、RFI 混入による非ガウス性を検出した。最後にこれらの手法を組み合わせ RFI 検出を実施した。実装後の FPGA リソース消費量の観点から、近年市場で利用可能な宇宙用 FPGA に対しても、機能の大幅な変更なく実装できる見込みを得た。 続いて、デジタル処理部単体の RFI 除去性能について、ガウス雑音とパルス状正弦波の混合により擬似観測信号を生成して評価を実施した。尖度検出法は低デューティー比の信号に対して高い検出性能を示したが、周波数間比較法ではデューティー比によらずほぼ一定の検出性能を示すなど、手法毎の特徴を確認した。次に、室内実験により実際の人工電波を測	

(様式 9 号)

定して性能評価を実施し、両手法の正常な機能と RFI 除去性能を確認した。それぞれの手法で除去される人工電波には違いがあり、両手法の併用による効果を実証した。周波数間比較法は電力スペクトルにおける外れ値、尖度検出法は周波数毎の時系列データの非ガウス性を検出するものであり、原理的な独立性が併用の効果をもたらしたと考えられる。また、帯域全体の標準誤差や中央絶対偏差を用いた従来のしきい値設定法に対して、提案した LPTN 法の検出性能における優位性を実データで確認した。

最後に低周波放射計に統合し、屋外測定時のアンテナ温度を算出してシステム全体評価を実施した。低周波放射計に統合した場合、アンテナ温度と参照雑音温度の経路差に起因する周波数特性の違いが増幅され、周波数間比較法における周波数特性の平坦化処理が機能しなかった。しかし、これらの事前処理を必要としない尖度検出法は良好な検出性能を示し、頑健な手法であることが確認された。今回の測定地では地上デジタル放送や携帯無線局の電波信号が強力であり、 10^5 K 以上のアンテナ温度でも除去されない信号があった。これらの帯域では不偏化スペクトル尖度推定値がゼロまたはやや負に偏っており、最終的には周波数間比較法を用いることが必要である。

以上から、本研究は世界的に研究例の少ない低周波放射計のデジタル処理部を構築し、評価実験により良好な機能・性能を示した。特に、周波数間比較法において新たなしきい値設定法を提案し、その優位性を実証した。この成果は、人工衛星からの低周波マイクロ波観測の実現、および日本の高性能マイクロ波放射計シリーズにおける RFI 対策に寄与すると考えられる。

公聴会における主な質問内容は、将来的に適用すべき他の RFI 検出方法、擬似信号評価で得られた RFI 検出性能の十分性、FPGA 処理の優位性、低周波観測の海氷厚以外への応用可能性、および周波数間比較法の平坦化処理の改善策などであった。いずれの質問に対しても、発表者自身が現段階で明確な研究結果や考察を有するかどうかを明らかにした上で、適切な回答がなされたと考える。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである（関連論文 3 編）。

- 1) Yuya NOMO, Keiji IMAOKA, Hidenori SHINGIN, Kakuji OGAWARA, Investigation of Methods for Removing Radio-Frequency Interference in Low-Frequency Microwave Bands, Journal of Evolving Space Activities, Vol. 2, Article No. 182, 2024.
- 2) Yuya NOMO, Keiji IMAOKA, Hidenori SHINGIN, Kakuji OGAWARA, Development of Digital Processor for 0.5–1.5 GHz Ground-Based Microwave Radiometer, Proceedings of the International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2025-n-3-3, 2025.
- 3) Yuya Nomo, Keiji Imaoka, Hidenori Shingin, Kakuji Ogawara, Digital Processor with RFI Removal Function for Ground-Based Low-Frequency Microwave Radiometer, Proceedings of 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing, pp. 8624-8627, 2025.