

氏 名 林 大介

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2104 号

学位授与の日付 2019 年 9 月 27 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 高出力 GaN 増幅器を用いた民生用および惑星探査機再突  
入カプセル捕捉用 X 帯パルスレーダの研究

論文審査委員 主 査 教授 川崎 繁男  
教授 山本 善一  
准教授 津田 雄一  
教授 末松 憲治  
東北大学電気通信研究所  
教授 Ramesh Pokharel  
九州大学システム情報科学研究院

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名 林 大介

論文題目 高出力 GaN 増幅器を用いた民生用および惑星探査機再突入カプセル捕捉用 X 帯パルスレーダの研究

Sample return missions for planetary exploration require recovery of re-entry capsules bearing the returned samples. Such recovery requires a search system, because a capsule measuring tens of centimeters falls into a predicted arrival area spanning tens of kilometers. The Hayabusa mission—the first successful sample return from an astronomical body other than the moon—utilized a monitoring system for detecting a beacon mounted on the capsule along with a primary radar system operated by the Australian military. However, a similar system may be problematic in future exploration. One potential issue is failure of beacons or other capsule-borne equipment. Although a primary radar can be effective in such an event, the portability of the Australian radar system is limited and cannot flexibly adapt to sudden changes in arrival area. In addition, there is a desire to establish equipment for recovery without relying on other countries.

This research proposes the dual use system for space and civil-use utilizing X-band solid-state marine radar to solve above issues. Although marine radars have shorter maximum detection ranges compared with large radars developed for military, the proposed system combines multiple units capable of capsule search. Development of a solid-state radar realizing a pure spectrum through effective use of frequency bands is promising for future missions, but these types of radar are currently limited by their relatively small power output. Although they are currently commercially available for detection of small ships at short ranges, there is a strong need to develop high-power solid-state radars for large ships. The same applies to the recovery of re-entry capsules. Hence, this research aims at constructing technologies for high-power X-band solid-state marine radar as well as a radar system for re-entry capsule search.

First, feasibility studies were conducted focusing on detection range, which is the most important aspect of performance for the proposed system. The radar specification was set to obtain a longer detection range without violating technical conditions for solid-state marine radar. The transmission power was set to 400 W, the assumed maximum for marine use, and the pulse width and repetition frequency were respectively set to 22  $\mu$ s and 3000 Hz, the upper limits in the technical conditions. Marine radars generally have an antenna rotation speed of 24 rpm, but this was set to 6 rpm to improve the signal-to-noise ratio (SNR). To reduce ground-reflected waves and detect the capsule at higher altitudes, the antenna was assumed to tilt upward. Based on these conditions, the placement rules for multiple radars were defined, and the searchable area of the proposed system was estimated based on the achievements of Hayabusa, STARDUST, and GENESIS. The results confirmed that the proposed system can search for a capsule over at least 96.8 % of the predicted arrival area.

Next, high-power amplifiers were developed for the higher output power of X-band solid-state marine radar. Several X-band solid-state marine radar products are commercially available, but their transmission outputs are limited to around 40 W. This is not only because high-power X-band amplifying devices are more expensive than traditional electron tubes, but also because equipment size and price range hinder heat dissipation mechanisms capable of operating in severe environments. Therefore, in this study, amplifiers were fabricated using a bare gallium nitride (GaN) chip with excellent thermal conductivity, band gap, and breakdown voltage characteristics, allowing it to handle higher output power than a gallium arsenic (GaAs) chip of the same size. For miniaturization, a matching circuit was designed with the minimum specifications required by the system, and the efficiency of heat dissipation was improved by using fabrication methods proven for space use. As the result, a single-ended GaN amplifier with dimensions of 9 mm x 5 mm was fabricated using a single die and a printed circuit board, and it operated with maximum output power of 69.2 W, gain of 8.2 dB, and DC–RF efficiency of 39.3% at 9.4 GHz. Combining two amplifiers produced over 100 W output power, demonstrating the potential for even higher output.

In the pulse compression implemented in solid-state radars, the time waveform of the pulse signal is important for greater detection accuracy. Therefore, in this research, the amplifiers described above were evaluated with a focus on operating conditions and differences in input and output pulse waveforms. Evaluations of the pulse waveform showed that influences of nonlinear operation and transient response increased the temporal slope and the pulse width by 79.6 % and 1.5 %, respectively, as compared with the input waveform. Further, these influences degraded SNR after pulse compression. When assuming characteristic changes according to operating conditions, a feedback circuit is generally used to compensate for such distortion. Adding such a circuit, however, hinders miniaturization. This research proposes a method for reducing such influences by adding dummy signals before and after the desired signal. By the proposed method, shape difference of the pulse waveform was nearly eliminated, and the SNR after pulse compression improved by about 5 dB. Although this method involves a wider pulse, operation in electrically and thermally stable regions can be secured with no feedback circuit, contributing to miniaturization and cost reduction of the radar.

Finally, a prototype radar was constructed using the above-mentioned 50 W and 100 W amplifiers and the newly developed transceiver, and the search performance of the proposed system was demonstrated based on actual measurement results. In the long-range detection experiment, the object with the radar cross section of 0.159 m<sup>2</sup> could be detected up to 17.5 km. And based on the results, the proposed system was confirmed to search with 100 % coverage of the achievements of Hayabusa, STARDUST and GENESIS. In searchable areas, the detection of the capsule was more than 37.5 times. Resolution in the distance direction to the radar was 150 m or less, and resolution in the azimuth direction was 230 m or less based on the experimental data. This level of performance can contribute to re-entry capsule recovery missions.

This research introduces new perspectives such as dual use for space and civil-use, and furthermore demonstrates a re-entry capsule tracking system based on actual measurements. In addition, this research developed technologies for high-power portable radar and to propose a

reduction method for pulse wave distortion, common problems for both space and civil-use radars. These results will contribute to future re-entry capsule recovery missions.

## 博士論文審査結果

氏名 林 大介

論文題目 高出力 GaN 増幅器を用いた民生用および惑星探査機再突入カプセル捕捉用 X 帯パルスレーダの研究

本論文では、宇宙用と民生用とのデュアルユースという観点でのレーダシステムを提案している。宇宙・民生共通の課題であるコンパクト・高出力な GaN 増幅器の構築およびパルス波形歪の低減手法を提唱し、船舶用レーダを試作し、この知見より捜索レーダの構築および実運用を想定した距離・高度における宇宙用サンプル回収レーダシステムを提案するものである。本論文は以下に示すように、全 6 章により構成されている。

第 1 章では、レーダ技術をコンポーネントとシステムの立場から紹介し、デュアルユースの宇宙用として再突入カプセル回収に関わる技術と民生用として船舶レーダの現状を説明している。続いて、本研究においては宇宙・民生共通の課題となる X 帯船舶用固体レーダの高出力化に向けた要素技術構築と、その成果を用いた再突入カプセル捕捉システムの実測ベースでの実証が目的であることを記述している。

第 2 章では、本研究において最も重要となる探知距離性能に着目をしたフィージビリティスタディを述べている。探知距離を最大化するようにシステムとその環境をモデル化し、レーダの仕様を設定し、レーダの配置ルールを定義している。これらの基礎となるはやぶさ等の捜索範囲実績に対し 9 割以上の範囲でカプセル捕捉が可能であることを示し、提案システムの有用性を示している。

第 3 章では、宇宙・民生共通の課題である可搬性を損なわないという条件のもとで、高出力化に対し、熱伝導率等に優れた GaN のベアチップを用いて増幅器を試作し、所定の仕様を満足する小型化・高出力化を果たした。また増幅器の入出力間で生じるパルス波形歪に対し、先行パイロット信号とパルス圧縮用信号を用いることで、フィードバック回路を使用しない低減手法を提案し、その手法が有効であることを実証している。

第 4 章では、試作した 100W 級ユニット GaN 増幅器に加え、送受信機も開発し、試作レーダを構築して、その実測結果を基に提案システムの捜索性能の実証を行った。小型飛翔体を用いた遠距離探知試験ではレーダ断面積  $0.159 \text{ m}^2$  の物標に対して直線距離で 17.5 km もの遠距離での探知に成功し、その結果に基づいた捜索範囲性能の実証では、提案システムがカプセル回収ミッションに貢献可能であることを示している。

第 5 章では、提案システムの将来に向けて、モデル化した理想的な捜索範囲を、実条件

を加味して、より広範な範囲に対応可能なレーダへの通信機能付加による利点や、フェーズドアレイ技術の導入によるシステムの更なる高度化に関する展望を記述している。

最後に、第6章では本論文を振り返り、提案内容とその新規性、有用性を改めて整理し、今後の課題と展望を述べている。

以上より、本論文はサンプルリターンの最終ミッションである再突入カプセル回収に貢献するデュアルユースシステムを構築し、その実現性を実測ベースで示している。このシステムでは民生用レーダの技術をベースとし、その利点を活かしつつ探知距離を最大化する試みを行っている。また信号の周波数的品質獲得のため固体レーダを適用し、その増幅器としては宇宙・民生共通の課題となる小型化・高出力化を解決する高出力 GaN 増幅器を実証している。さらに、パルス信号の波形歪低減手法の提案により、周波数的な信号品質に加え、時間的品質向上も得ることでシステムの新たな付加機能創造に寄与できることを示している。

本審査では、審査員5名出席のもと、論文内容に関するプレゼンテーションと質疑応答が実施され、本論文は上記内容に新規性を有し、質疑応答も適切であり、博士論文として十分な学術水準に達している事を確認した。また、原著論文2編、レター論文1編、国際会議（筆頭）3編の論文を発表しており、英語力において全く問題ないと結論できる。

以上の判断材料より、審査委員は全員一致で本論文が博士論文に相応しい優れたものであることを認め、合格であると判断する。