

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 06701
研究開発課題名 Beyond 5G 宇宙ネットワーク向け未利用周波数帯活用型の無線通信技術の研究開発
研究開発項目 1 Q 帯、V 帯における高機能デジタルビームフォーミング (DBF)
送受信システム技術の研究開発
研究開発項目 3 W 帯衛星搭載機器の基盤技術の研究開発
副 題 Beyond 5G 宇宙ネットワーク向け Q/V 帯高機能デジタルビームフォーミング
(DBF) 送受信システム技術および W 帯衛星搭載機器基盤技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

Q/V 帯での衛星通信への DBF 技術適用に向けた信号処理技術、送受信機構成、送受信モジュール開発、アンテナ技術を確立する。

W 帯の活用に向け GaN 高出力増幅器などの研究開発を行い、送受信機のキーデバイスとなる送受信増幅器の基盤技術を確立する。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 8 年度 (5 年間)

(3) 受託者

国立大学法人東北大学〈代表研究者〉
三菱電機株式会社
株式会社 Space Compass
スカパー J SAT 株式会社
国立大学法人鳥取大学
国立大学法人広島大学
独立行政法人国立高等専門学校機構 富山高等専門学校
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学
国立大学法人北海道大学
大熊ダイヤモンドデバイス株式会社

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 4 年度から令和 6 年度までの総額 4,883 百万円 (令和 6 年度 1,531 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 Q 帯、V 帯における高機能デジタルビームフォーミング (DBF)
送受信システム技術の研究開発

研究開発項目 1-a) Q 帯、V 帯に対応したデジタル信号処理技術及び送受信機構成の研究
開発 (東北大学)

研究開発項目 1-b) 超小型 Q 帯、V 帯 RF 送受信モジュールの研究開発

研究開発項目 1-b-1) 受信用集積回路の研究開発 (三菱電機)

研究開発項目 1-b-2) 送信用集積回路の研究開発 (東北大)

研究開発項目 1-b-3) 送受信 RF フィルタの研究開発 (鳥取大)

研究開発項目 1-b-4) 送受信モジュールの研究開発 (三菱電機)

研究開発項目 1-c) 大規模 DBF を実現するアンテナ技術の研究開発 (東北大)

研究開発項目 1-d) DBF 通信システムの検討・設計・評価

研究開発項目 1-d-1) 衛星搭載ペイロード・コンステの基本要求の検討
(Space Compass)

研究開発項目 1-d-2) Q 帯、V 帯の軌道位置ファイリング、国内免許用パラメータ取得、整理（スカパーJSAT）

研究開発項目 1-d-3) 地上局等を含めた衛星通信システム全体の検討とペイロード設計（三菱電機、Space Compass、広島大、富山高専、東北大）

研究開発項目 1-d-4) 1-a)～1-c)を統合した DBF 通信システムの評価、大規模 DBF アンテナ実現時の性能予測（三菱電機、東北大）

研究開発項目 3 W 帯衛星搭載機器の基盤技術の研究開発

研究開発項目 3-a) W 帯 GaN の研究開発

研究開発項目 3-a-1) GaN 増幅回路の研究開発（名大）

研究開発項目 3-a-2) 非線形モデリングの研究開発（三菱電機）

研究開発項目 3-b) ダイヤモンドトランジスタ増幅器の研究開発

研究開発項目 3-b-1) ミリ波ダイヤモンドトランジスタの研究開発（北大、大熊ダイヤモンドデバイス）

研究開発項目 3-b-2) ダイヤモンドトランジスタ増幅器回路の研究開発（東北大）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	11	7
	外国出願	6	2
外部発表等	研究論文	1	1
	その他研究発表	73	49
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	7	4
	受賞・表彰	2	2

(7) 具体的な実施内容と成果

1-a) Q/V 帯に対応した DPS 技術および送受信機構成

前年度試作した DSP 部の改良試作を行い、課題 1-b)と合わせた送受信系の動作確認、さらには、1-c)と合わせた 4 素子 DBF アンテナ試作、評価を行った。また、最終年度に向けて 64 素子対応送受信機の構成詳細設計を実施した。

送受信機構成については、課題 1-d)にて議論されたユースケースを参考にして、LEO コンステレーション衛星搭載アンテナ構成を DSP 部の小型化、低消費電力化のための演算量削減を主目的に再検討し、昨年度考案した面分割 DBF アンテナをさらに発展させた DBF/PAA(フェーズドアレーアンテナ)混載アンテナを考案し、国内外特許出願を行った。さらに、これまでの成果を ITU-R WP4A にて改訂作業を行っている衛星通信技術ハンドブック “Handbook on Satellite Communications and Technologies” への寄書 “Q/V/W-band SAT-COM system and On-Board Antennas/RF Components for LEO Constellation Satellites” Tohoku University としてまとめ、提出準備中である。64 素子対応送受信機構成については、100GbE 用 O/E モジュール 1 個で送信系アンテナ 4 素子分の信号を伝送する従来構成と、上記 O/E モジュール 1 個でアンテナ 8 素子分の信号を伝送するハーフレート化構成の 2 案を示し、課題 1-b)でのモジュール開発に先立ち機能検証モデルにて動作検証を行った。

DSP 技術については、16 ビーム 64 素子対応 DBF および 4 素子分の 1bit バンドパス Δ - Σ 変調の FPGA 回路デザインを完了した。それぞれを市販の FPGA 評価ボードに実装し性能評価を行い所望の性能が得られていることを確認すると共に、課題 1-c)の 4 素子アンテナの評価にも使用して所望の動作をすることを確認した。

1-b) 超小型 Q/V 帯 RF 送受信モジュール

送信系・受信系の IC（集積回路）は、1 次試作(昨年度試作)でダイレクト RF 方式を用いた IC

で世界初となる 400MS/s の通信性能を達成した。2 次試作(今年度試作)は、DBF モジュール実装可能なサイズで、高ダイナミックレンジ化と S/N 改善のため、送信系においては 1bit-DAC-IC、受信系においては、RF 利得制御機能とクロックタイミング制御機能を内蔵した Si-RFIC(LNA-IC, SH-IC)の試作、評価を完了した。また、Si-RFIC(SH-IC)に対して LEO の運用を想定した放射線試験条件を検討の上、Single Event Effect (SEE)試験、Total Ionizing Dose (TID)試験を、Si-RFIC(1bit-DAC-IC)に対して TID 試験をそれぞれ実施し、放射線の被爆による破壊が無いことを確認した。DBF モジュールは、1 次試作(昨年度試作)で 1 素子機能確認評価を完了し、世界初の 400MS/s を達成した。2 次試作(今年度試作)は、4 素子サブアレーDBF 用モジュールの試作、また、課題 1-c)で試作したアンテナを実装した 4 素子 DBF アンテナモジュールを試作し、評価を完了、4 素子の協調動作(DBF 動作)を確認した。Q/V 帯送受信モジュール用 RF フィルタについて、特性改良版試作、評価を完了した。

1-c) 大規模 DBF を実現するアンテナ技術

課題 1-b)のモジュール 1 次試作結果と、前年度の単素子アンテナの試作結果をもとに、当初計画通り、偏波切り替え可能なタイル型の 4 素子アレーアンテナの試作を行い、課題 1-b)と連携して、アンテナモジュールとしての評価、さらには、課題 1-a)、1-d)と連携して、4 素子 DBF アンテナとしての特性評価を行った。

課題 1-a)での検討の結果、面分割 DBF アンテナ構成とすることで、アンテナの偏波切り替え機能を省き、右旋、あるいは左旋に偏波固定のアンテナとしてよいこととなり、ブリック型を含めた 4 素子アレーアンテナの改良設計、試作を、2024 年度下期に実施した。この改良試作は当初計画では 2025 年度上期に予定されていたものであり、計画を前倒して実施したことになる。この結果、偏波固定のブリック型アレーアンテナの方が、タイル型に比べて、約 2dB 高いアンテナ利得が実現できることが明らかになり、64 素子化に向けた検討においては、ブリック型を採用することに決定した。

1-d) DBF 通信システムの検討・設計・評価等

Q 帯、V 帯の LEO 衛星のペイロード基本要件、及び、コンステレーションの基本要件の初期整理を実施した。移動体を用いた衛星通信を考慮に入れ、移動衛星業務における周波数分配及び周波数利用の際に守るべき基本的な条件や、ITU ファイリング申請状況の整理を行った。あわせて、関連する WRC-27 議題の状況を把握すべく ITU-R WP 4A 会合に参加し、議論状況を調査/整理した。さらに、ファイリング申請に必要な手続きの明確化を目的とし、WRS-24 にて情報収集を行い、関連ソフトウェアの利用方法をはじめとするファイリング申請に関連した実務的な要点を整理した。

高効率・高信頼無線アクセス制御方式の実証については、2023 年度に実施したシステムモデル開発を完了させ、そのモデルを用いた無線アクセス制御方式のシミュレーション評価を実施した。

また、1-a)～c)の検証評価に関わり、開発した DSP ボード、試作した 4 素子 DBF アンテナモジュールの DBF アンテナ評価を完了、4 素子の協調動作(DBF 動作)を確認した。

研究開発項目 3：

3-a) W 帯 GaN 増幅器

現有装置で P1dB が測定可能な総ゲート幅 150um の基本パワーセルにおいて P1dB=25dBm、効率 26%を実測で確認できたため、2 並列化することで P1dB $\geq$ 27dBm、効率 $\geq$ 25%が実現可能で有ることが判り、令和 7 年度に予定する 1W クラスのアンプ設計に適用できる大きな知見が得られた。また、パワーセルへの 3 年間の宇宙環境を模擬した放射線試験を完了した。

小信号動作と大信号動作 (P1dB) の両方について利得特性を正確に表現することができる非線形トランジスタモデルを完成させた。

3-b) ダイヤモンドトランジスタ増幅器

2023 年度までの要素技術開発をベースに、40GHz 帯ダイヤ RF MOSFET を試作し RF 評価を行った。レイアウトパターンの改善によってゲート抵抗を低減し、 f_{max} 40 GHz を達成し、40GHz 帯ダイヤ RF MOSFET の試作に成功した。

また、MMIC 化のためのキャパシタや伝送線路などの要素回路の試作を行い、高周波モデリングおよび MMIC 設計環境の整備が完了した。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目 1：

1-a) Q/V 帯に対応した DPS 技術および送受信機構成

2025 年度は、64 素子対応の DSP 部の試作を行うとともに、2024 年度の 4 素子 DBF アンテナ試作結果をフィードバックした 64 素子対応送受信機構成の設計見直しを実施する。

送受信機構成については、送信系 64 素子対応のための小型化検討を、O/E 変換部を中心に行うとともに、より革新的な送信機構成としてハーフレート化についても、実現性検討を進める。

DSP 技術については、演算精度等のパラメータ最適化や回路の工夫による FPGA 回路規模削減および使用個数削減など、消費電力低減に向けた研究開発を実施する。また、64 素子対応送受信機試作に向けて FPGA を搭載した DSP 部基板を試作する。

1-b) 超小型 Q/V 帯 RF 送受信モジュール

2025 年度は、2024 年度に実施した、送信系・受信系の IC 及び送信系スプリアス除去用 RF フィルタ、受信系アンチエリアシング用 RF フィルタ等の課題抽出の結果を反映して改良試作を行い、64 素子程度のフルアレーへの適用が可能なデバイスの設計・試作を実施する。また、フルアレーの実現に向けて 12 素子程度のモジュール設計を実施し、2 次元配列を前提とした構造設計および放熱特性も考慮した設計を完了する。また、1-d) での 2024 年度までの検討結果を用いてモジュールの最終仕様を決定する。

1-c) 大規模 DBF を実現するアンテナ技術

2025 年度は、2024 年度に行った 4 素子 アレーアンテナの試作結果をもとに、64 素子 アレーアンテナの試作を行う。なお、2024 年度後半に、2025 年度に予定していた、4 素子 アレーアンテナの改良試作に対応するブリック型アンテナ試作を計画を前倒して行い、良好な特性を得ているので、2025 年度には、当初計画にある 4 素子アレーアンテナの改良試作を行わず、64 素子アレーアンテナ試作を 2025 年度の上期から行う。

1-d) DBF 通信システムの検討・設計・評価等

2025 年度は、ペイロード基本要件及びコンステレーションの基本要件のアップデートを行う。また、NGSO 衛星システムファイリングの申請に必要なパラメータ及び ITU-BR による審査内容の整理を行う。尚これらのファイリング申請に必要な項目等は、研究開発期間中においても、変更される可能性があるため、ITU-R WP4A への参加を通して、引き続き、関連する議論状況のアップデートを行う。高効率・高信頼無線アクセス制御方式の実証については、2024 年度に実施したシミュレーションを拡張した無線アクセス制御方式の大規模システムシミュレーション評価を行う。その結果を踏まえ提案方式を実測評価するための模擬システムの設計を行い、実装に着手する。また、1-a)～c) の検証評価に関わり、64 素子対応小型化の検討を行う。

研究開発項目 3：

3-a) W 帯 GaN 増幅器

2025 年度は、パワーアンプ 1 次設計・試作・評価を完了する。

また、AM-AM 特性を正確に表現することができる非線形トランジスタモデルを完成する。

3-b) ダイヤモンドトランジスタ増幅器

2025 年度は、RF MOSFET 素子の耐放射線試験を実施し、40GHz 帯ダイヤ RF MOSFET の改良試作を行う。

また、2024 年度までに開発した MMIC 設計環境を用いて、40GHz 帯 MMIC 増幅器を試作する。