

令和 5 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JSAT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  
国立大学法人東海国立大学機構  
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 5 年度までの総額 3,353 百万円 (令和 5 年度 1,528 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・コンステの基本要件の検討  
(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パイロード設計 (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	4	4
	外国出願	4	4
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	24	23
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	3	3
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

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

4 素子対応の送受信機構成についての詳細案を作成し、課題 1-b) にフィードバックをかけた。詳細案では、アンテナモジュール部は 4 アンテナ素子分を一体とする構成とし、DSP 部は 4 アンテナ素子分の DBF 演算部とダイレクトディジタル RF 送信機用 1bit バンドパス  $\Delta$ - $\Sigma$  変調部 (ただし、送信系のみ) を実装する FPGA 基板からなる構成とした。これらアンテナモジュール部と DSP 部は、100GbE 用の QSFP モジュールを用いたデジタル RoF (25 or 28Gbps $\times$ 4WDM) で接続する。さらに、衛星搭載 DBF アンテナの全体像を示し、256 素子を基本ユニットとする面分割 DBF アンテナ構成を提案した。面分割を行わない従来の 1 面構成の DBF アンテナに比べて、提案構成により、DBF および 1bit バンドパス  $\Delta$ - $\Sigma$  変調の DSP 演算量を、それぞれ約 1/64、約 1/20 に削減することができる。ダイレクトディジタル RF 送受信機におけるデジタル演算部の大規模化・消費電力増大の問題に対して、極めて有効な対策である (国内、海外特許出願済み)。DSP 技術については、4 ビーム 4 素子対応 DBF および 1 素子分の 1bit バンドパス  $\Delta$ - $\Sigma$  変調の FPGA 回路デザインを行い、市販の FPGA 1 個に約 400MHz で動作する 64 ビーム 64 素子 DBF または 4 素子分の 1bit バンドパス  $\Delta$ - $\Sigma$  変調回路が実装できる見通しを得た。

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) 及び送信系スプリアス除去用 RF フィルタ、受信系アンチエイリアシング用 RF フィルタ等の 1 次試作を行い、高周波動作の設計手法確立を実施した。また、2022 年度に策定した暫定仕様をベースに、4 素子 DBF 用モジュールの 1 次試作を実施し、1 素子分の RF 信号からデジタル信号への機能確認を行った。

### 1-c) 大規模 DBF を実現するアンテナ技術

課題 1-d)と連携して、アレーアンテナの諸元を明確にするとともに、その仕様をもとに、単素子アンテナの設計、試作、評価を行った。具体的には、周波数を送信系は 40GHz 帯で 2GHz 帯域、受信系は 50GHz 帯で 2GHz 帯域とし、送受信ともに偏波切り替え可能な円偏波パッチアンテナとした。課題 1-b)で開発しているアンテナモジュールとの一体化を可能とするため、給電を行うモジュール側の基板に対して、垂直にアンテナ基板を実装する、タイル構成を採用した。モジュール側の基板に 90° ハイブリッド回路を設け、その入力端子を選択することで、右旋、左旋の切り替えを行う構成とした。1 素子アンテナの試作の結果、偏波切り替え回路を含めた値として、送信 4.6 dBi、受信 3.1 dBi のアンテナ利得を得た。

### 1-d) DBF 通信システムの検討・設計・評価等

Q 帯、V 帯のユースケース・ビジネスモデル提案、地上局などを含めた衛星通信システム全体の提案（前年度より継続 2022～2023）、候補周波数帯における ITU ファイリング申請状況の整理や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等が規定された無線通信規則第 5 条、国内免許手続に必要な項目を整理するとともに、関連する WRC-23 議題の状況を把握すべく WRC-23 及び ITU-R WP 4A 会合に参加し、議論状況を調査/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、方式提案とともにシステムモデル開発に着手し、基礎特性評価のための信号解析システムの構築を完了した。

また、1-a)～c)の検証評価に関わり、ミリ波帯アンテナ評価系構築を行った。

## 研究開発項目 3：

### 3-a) W 帯 GaN 増幅器

単位セル設計・試作・評価、及び、小信号特性評価系導入立上げを完了した。

非線形性モデル開発に必要な測定（アイドル電流依存性）を完了した。

### 3-b) ダイヤモンドトランジスタ増幅器

ダイヤモンド MOSFET 作製のための要素技術として、高精度 40～300 nm ゲートセルフアラインプロセスと T ゲートプロセスを開発した。

また、ダイヤモンドトランジスタの高周波特性の温度依存性を測定し、高温での動作確認を行った。さらに、ロードプル・ソースプルを行い、Q 帯(40GHz 帯)の出力増幅器(PA)としてのトランジスタ特性の評価を行った。

## (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

2024 年度は、前年度試作した DSP 部の改良試作を行い、課題 1-b)と組合わせた送受信系の動作確認、さらには、1-c)と組合わせた 4 素子 DBF アンテナ試作、評価を行う。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する。

#### 1-b) 超小型 Q/V 帯 RF 送受信モジュール

2024 年度は、RF 利得制御機能、クロックタイミング制御機能を内蔵した Si-RFIC の設計・試作を行い、目標とするダイナミックレンジ改善、S/N 比低下抑制を実現する。また、S/N(ACLR)改善のための高ダイナミックレンジ化、低ジッタ化のための回路を内蔵した Si-RFIC の設計・試作を行い、4 素子 DBF モジュールに IC チップを提供する。IC の耐放射線試験用測定系を立ち上げ、放射線源を確保できた場合、耐放射線試験を実施する。4 素子アレー用送受信 BPF の 2 次試作を行い、4 素子アレーへの実装を目標とする。サブアレー（4 素子程度）用の DBF 用モジュールを試作し、4 チャンネルが協調して動作することを確認する。

#### 1-c) 大規模 DBF を実現するアンテナ技術

2024 年度は、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、4素子アンテナの試作を行い、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、1-a)と連携して、4素子 DBF アンテナとしての特性評価を行う。

#### 1-d) DBF 通信システムの検討・設計・評価等

2024年度は、2023年度までに実施したQ/V帯の減衰等の影響、コンステレーションパラメータを加味し、回線設計のアップデートを行うことで、回線成立に必要な要求事項として、Q帯、V帯のLEO衛星のパイロード基本要素（衛星EIRP、衛星G/T）、および、コンステレーションの基本要素を検討する。また、ファイリング手続きに必要な項目や、国際調整に必要な情報は、本研究開発期間（令和4～8年度）の間にも変更する可能性があるため、ファイリング手続を実施する場合には、必要に応じて、最新状況を調査、および、申請項目を衛星パイロードシステム検討側にて解析によりアップデートし、最新状況に基づいた適切な情報を用いてファイリング申請を検討する。2023年度までに検討したユースケース、ビジネスモデル検討について、研究分担者、研究代表者と共にパラメータ等を精緻化し、検討のアップデートを行う。また、2023年度に実施した特定のユースケースを対象としたシミュレーションモデル開発を完了させ、1-a)/1-b)等で得られた送受信モジュール側の制約を加味し、そのモデルを用いた衛星システム全体の通信成立性のシミュレーション評価を実施する。4素子DBFアンテナ評価を行う。また、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する。

研究開発項目3：

#### 3-a) W帯 GaN 増幅器

2024年度は、前年度に得られた結果と3-a-2で開発する非線形特性モデルの成果を受けて、P1dB27dBm以上、効率25%以上の出力性能が可能なパワーセルの設計、試作を行い、開発したパワーセルに3年間の宇宙環境を模擬した放射線試験を実施する。また、前年度までに準備した測定器やW帯測定用部品に対して追加導入を行い、パワーセルの電力特性評価系も確立する。2023年度の測定結果をベースに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開発する。（実測値とモデル計算値の誤差±1dB以内）

#### 3-b) ダイヤモンドトランジスタ増幅器

2024年度は、2023年度までに開発した高精度狭SGプロセス（セルフアラインプロセス）、Tゲートプロセスといった要素技術を駆使して、40GHz帯ダイヤRF MOSFET 試作を実施する。また、MMIC化のための要素回路を試作・高周波モデリングを行い、MMIC設計環境を整備する。