

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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
- ◆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開発
- ◆受託者 : 国立大学法人東北大学、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
- ◆研究開発期間 : 令和4年度～令和8年度 (5年間)
- ◆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)

2. 研究開発の目標

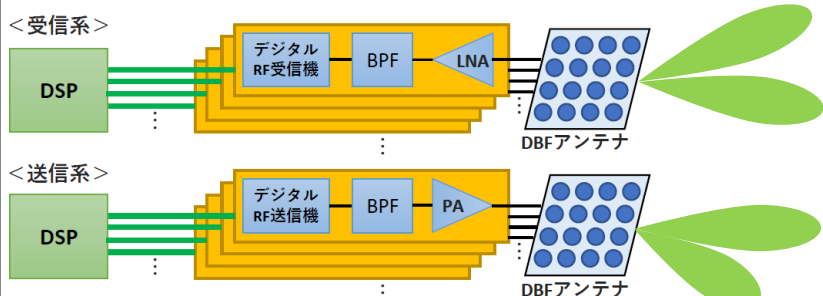
- ・ Q/V帯での衛星通信へのDBF技術適用に向けた信号処理技術、送受信機構成、送受信モジュール開発、アンテナ技術を確立する。
- ・ W帯の活用に向けGaN高出力増幅器などの研究開発を行い、送受信機のキーデバイスとなる送受信増幅器の基盤技術を確立する。

3. 研究開発の成果

研究開発目標

研究開発成果

研究開発項目1: Q帯、V帯における高機能DBF送受信システム技術の研究開発



- 研究開発項目1-a) Q/V帯に対応したDPS技術および送受信機構成
- 研究開発項目1-b) 超小型Q/V帯RF送受信モジュール
- 研究開発項目1-c) 大規模DBFを実現するアンテナ技術
- 研究開発項目1-d) DBF通信システムの検討・設計・評価等

研究開発項目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。

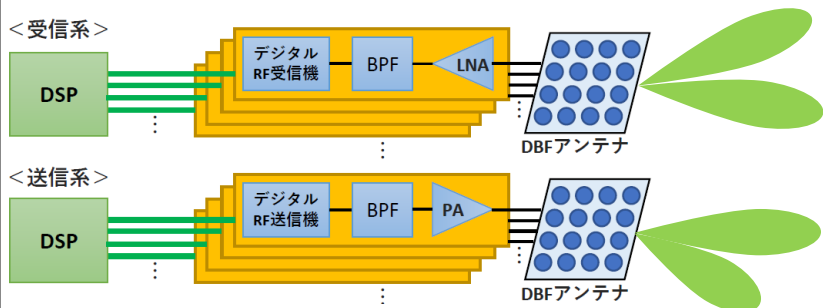
研究開発項目1-b) 超小型Q/V帯RF送受信モジュール

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。

3. 研究開発の成果

研究開発目標

研究開発項目1: Q帯、V帯における高機能DBF送受信システム技術の研究開発



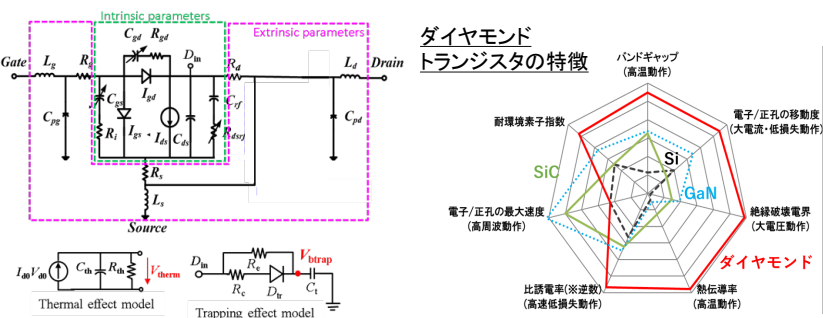
研究開発項目1-a) Q/V帯に対応したDPS技術および送受信機構成

研究開発項目1-b) 超小型Q/V帯RF送受信モジュール

研究開発項目1-c) 大規模DBFを実現するアンテナ技術

研究開発項目1-d) DBF通信システムの検討・設計・評価等

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



GaNトランジスタモデル

研究開発項目3-a) W帯GaN増幅器

研究開発項目3-b) ダイヤモンドトランジスタ増幅器

研究開発成果

研究開発項目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。

研究開発項目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-a) W帯GaN増幅器

単位セルの設計、試作を実施し、今年度導入立上げたW帯までの小信号特性評価装置を用いての評価を完了した。また、非線形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。

研究開発項目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。

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
4 (4)	4 (4)	0 (0)	24 (23)	0 (0)	0 (0)	3 (3)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 課題横断の定例会議の開催

課題単位での関係組織間での議論は当然ながら、研究開発項目1及び研究開発項目3の全事業者が参加する定例会議を毎月開催し、各課題の進捗状況等を報告し議論している。課題間や組織間の連携を密にとることにより、仕様の相互確認や性能未達防止等を図っている。

5. 今後の研究開発計画

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

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

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

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

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衛星のペイロード基本要素(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、ファイリング手続き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、申請項目を衛星ペ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 W帯衛星搭載機器の基盤技術の研究開発

3-a) W帯GaN増幅器

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

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。