

3. 研究開発の成果

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

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検討を行い、昨年度に考案した面分割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た。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、特性改良版の設計と試作を完了した。

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

移動衛星業務(MSS)のNGSOシステムにて利用可能なQV帯周波数にて考慮すべき事項の整理、FSS・MSSのファイリング状況及び関連するWRC-27議題の議論状況の整理/調査の他、ファイリング申請に関わる実務的な要点を整理した。また、衛星ペイロードパラメータとコンステレーションパラメータの複数パターンの組み合わせを分析するための仕組みを構築し、合計75パターンの分析を実施するとともに、ペイロード及びコンステレーション基本要求整理について、有望なユースケースであるHAPS利用を対象として動的な回線シミュレーションを実施し、ユースケースを実現するためのペイロード及びコンステレーションの諸元を検討することで、基本要求の初期整理を完了した。高効率・高信頼無線アクセス制御方式については、変調方式にOTFSを適用したシステムモデルの開発に取り組み、LEOのドップラーシフトを考慮した適用可能性評価を実施した。また、課題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: 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

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>27dBm、効率>25%が実現可能であることがわかり、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、W帯の小信号利得と大信号利得に関して実測を±1dB以内の精度で高精度に再現するトランジスタモデルの作成を完了した。

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、fmax 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。

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	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
11 (7)	6 (2)	1 (1)	73 (49)	0 (0)	0 (0)	7 (4)	2 (2)

- (1) 課題横断の定例会議の開催や運営委員会の開催 ※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。
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。また、JAXAやNICT等の有識者を招いた研究開発運営委員会を複数回開催し、研究内容やアプローチ等のレビューを頂き研究開発にフィードバックしている。
- (2) 研究開発の対外発表進捗
国内外の出願や研究発表などについて、研究開発期間の経過率に対して目標を上回る成果を得られている。また、招待講演も複数受けており、対外的にも反響が広がっている。
- (3) 他研究開発との連携
HAPSやテラヘルツ帯に関する他の研究開発項目(採択番号:07702及び00302)との連携を進めており、本研究開発課題へのフィードバックを予定している。

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
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、ペイロード及びコンステレーション基本要素整理について、引き続きオペレータ観点での検討・整理を継続し、検討結果を開発サイドへフィードバックするとともに、ペイロード及びコンステレーションの基本要素をアップデート予定である。また、ITU-R WP 4A 会合における候補周波数帯のファイリング手続や国際調整に関連する議論状況調査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、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。そして、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。加えて、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 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
2025年度は、1W程度の出力を有するW帯でのアンプを設計、試作、評価を行う。評価結果を分析し、最終年度での目標値とするW帯で、P1dB 27dBm 以上、効率 25%以上のGaN 送信電力増幅器の実現可能性の明確化に向けた知見を得る。また、小信号動作からP1dBまで(ダイナミックレンジ10dB以上)にわたって利得特性(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作成する。
- 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する。また、2024年度までのRF測定の結果を踏まえてプロセスを改善し特性の向上を図る。加えて、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。