

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 06702
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 2 Q 帯、V 帯における高性能送受信システム技術の研究開発
副 題 Q/V 帯における高性能送受信機器技術とその適用

(1) 研究開発の目的

2030 年頃の Beyond5G 時代を支える宇宙ネットワークにおいて、Q 帯、V 帯の利用を可能とする衛星搭載用高性能送受信機器技術の確立及び当該技術を利用した高性能送受信システム(衛星システム)の検討を行う。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 5 年度 (2 年間)

(3) 受託者

NECスペーステクノロジー株式会社<代表研究者>
株式会社Space Compass
スカパーJSAT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 646 百万円 (令和 5 年度 473 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 2-a) Q 帯、V 帯に対応する受信系機器の高性能化に関する研究開発
(NECスペーステクノロジー)
- 研究開発項目 2-b) Q 帯に対応する送信系機器の研究開発
(NECスペーステクノロジー)
- 研究開発項目 2-c) Q 帯、V 帯における高性能送受信システムの検討・設計・評価
- ①ユースケース・ビジネスモデルの検討 (Space Compass)
 - ②ペイロード・コンステレーションの基本要求的整理 (Space Compass)
 - ③地上局を含めた衛星通信システム全体の検討 (Space Compass)
 - ④ファイリング手続や国際調整、国内における免許手続に必要な項目の整理 (スカパーJSAT)
 - ⑤衛星システムの検討・設計 (NECスペーステクノロジー)
 - ⑥実証モデルの製造評価 (NECスペーステクノロジー)

(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	2	2
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	1	1
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 2-a) Q 帯、V 帯に対応する受信系機器の高性能化に関する研究開発

低雑音増幅器(LNA)や周波数変換器(CONV)の開発を行い、宇宙実証モデル対し環境試験を実施し、衛星搭載可能であることを検証することを研究全体の最終目標として研究を実施した。

目標 1) 受信系機器の機器構成及び周波数構成の検討を実施し、概念設計を完了させる。

成果 1) 海外出張を含む情報収集を通じて、市場の需要と技術動向を調査し、最終目標に設定した機器 (V 帯 LNA、Q/V 帯 CONV) 仕様案の妥当性を確認した。その機器構成及び周波数構成検討結果から、構成デバイスそれぞれに求められる性能を定めた。主な項目として周波数範囲、雑音指数、線形利得(変換損失)および消費電力があげられる。

目標 2) 先行開発済みの MMIC の性能評価を行い、設計手法の妥当性の確認及び第 2 次試作へのフィードバックを得る。

成果 2) V-LNA MMIC の性能評価を行い、設計値と極めて近い雑音指数及び線形利得が得られた。これにより設計手法の妥当性が確認されたとともに、更なる雑音指数改善に向けてはより高い遮断周波数のプロセスを採用する必要があるというフィードバックを得た。

目標 3) 仕様を実現する為の MMIC の半導体プロセスや回路方式選定を実施し、第 2 次試作に向けた LNA, MIX MMIC の設計を完了させる。

成果 3) V-LNA については、低雑音指数に有利なプロセスを絞り込みトレードオフを実施し、初段アンプの雑音指数性能から採用プロセスを決定した。そのプロセスを前提に V-LNA を設計し、想定仕様を満足するシミュレーション結果を得た。

MIX については、周波数構成検討結果から中間周波数を使用する Double CONV 構成の MIX MMIC を開発した。採用プロセスのトレードオフも実施し、想定仕様を満足するシミュレーション結果を得た。また、LO 部の周波数通倍回路を取り込んだ MMIC 設計も実施し、機能複合による小型化の可能性を示した。

研究開発項目 2-b) Q 帯に対応する送信系機器の研究開発

SSPA の開発を行い、宇宙実証モデルの環境試験を実施し、衛星搭載可能であることを検証すること、並びに TWT の詳細設計を行い、Q 帯 TWTA が実現可能であることを試作モデルの特性評価等を実施し検証することを研究全体の最終目標として研究を実施した。

目標 1) 送信系機器の概念検討を実施する。

成果 1) SSPA 及び TWTA について、先行開発を行っているメーカ等から発表されている学会報告資料等を用いてベンチマークを実施した。ベンチマークのアップデートは確認されておらず、策定した目標性能から変更はない。

SSPA については概念検討を実施し、目標に提示した各課題に対応するための要素技術検討を行い、詳細設計の方針を固めた。

目標 2) 先行開発中の SSPA 用 MMIC の評価を行う。

成果 2) 1 次試作の MMIC を搭載した HPA を設計し特性評価を実施した。特性評価結果から、概ね所望の小信号利得、出力電力が取得できていることを確認した。一部の未達項目については、第 2 次評価用の MMIC 設計へのフィードバックを行った。

目標 3) 上記の評価結果と設計時の解析結果の比較により両者の整合性を確認し解析モデルの見直し等を行い、第 2 次評価用の MMIC の設計開発を行う。

成果 3) 成果 2 に記載の通り一部未達項目を改善させるべく、使用半導体プロセスの見直しを含めて検討を行った。開発ツールでの FET 単体の性能比較を実施し、投入するプロセス選定を実施した。

目標 4) 先行開発中の SSPA 部分モデルの製造評価を実施する。
成果 4) 部分モデルを製造し製造性確認を実施した。LCAMP 部については、製造性の課題に対応するため MMIC の統合化の検討を実施した。また、HPA と LCAMP HIC を評価し、歪補償効果の確認を行った。

目標 5) TWT の概念設計を実施する。
成果 5) 概念設計を完了し目標性能を満足する結果を得た。また、従来手法である 2 次元モデルによる計算結果と 3 次元モデルの計算結果の比較、および理論値との比較から 3 次元モデルによる計算結果の妥当性を確認した。さらに、TWT の遅波回路および電子銃に対して 3 次元解析ソフトによる設計手法の検討を実施し、従来用いられていた解析ソフトでは得られなかった新たな設計指針を得た。

目標 6) TWT の部分試作（マイクロ波管部分）の実施と多段コレクタ部の検討を実施する。
成果 6) 先行研究での設計結果を反映した TWT の RF 回路部の部分試作モデルを製造し、TWT の RF I/F でのリターンロスの評価を実施することで目標とする周波数帯域において良好な特性を得られることを確認した。また、3 次元解析ソフトで計算する際の初期条件とするために従来の設計手法である軸対称 2 次元モデルを用いて多段コレクタ部の概略設計を完了した。

上記の結果として SSPA では 1 次試作モデル設計、製造により製造性の課題抽出、出力電力、歪補償動作の特性検証を実施し、良好な特性となることを確認した。また、新規回路/構造等の採用検討や要素技術検証を実施したことにより、高発熱かつ省スペースの両立が可能となり今後の詳細設計により、目標性能を満たす SSPA の開発が可能になると考えられる。TWT では先行研究で設計を実施した TWT の RF 回路におけるリターンロスが、目標性能に掲げた周波数帯域において良好な特性となることを部分試作によって確認した。また、遅波回路および電子銃の 3 次元モデルを用いた設計手法の検討により、従来の設計手法では得られなかった新たな設計指針を得た。今後の詳細設計に 3 次元モデルを用いた設計手法を適用することで TWT の高性能化が可能になると考えられる。

研究開発項目 2-c) Q 帯、V 帯における高性能送受信システムの検討・設計・評価

・研究開発項目 2-c)-1 ユースケース・ビジネスモデルの検討

本研究開発で想定されるペイロードの特徴を検討し、Q 帯、V 帯ユースケースの提案を完了した。また、それぞれのユースケースについて、概要、要求速度、市場規模等の主要項目を整理した。ビジネスモデル検討については、初期検討として売り上げやコストを基にした計算手法を検討した。

・研究開発項目 2-c)-2 ペイロード・コンステレーションの基本要求的整理

回線設計を実施するにあたり、ペイロード仕様パラメータとコンステレーションの基本パラメータについて検討を行い、他研究者と連携を実施した。

・研究開発項目 2-c)-3 地上局を含めた衛星通信システム全体の検討

研究開発に必要なソフトウェア・ハードウェアの調達を完了し、Q/V 帯の減衰特性の把握と、コンステレーションの基本検討を実施した。また、衛星システムの全体像と、地上局を含めた回線設計を実施し、システムとしての成立性について初期確認を実施した。

・研究開発項目 2-c)-4 ファイリング手続や国際調整、国内における免許手続に必要な項目の整理

Q 帯、V 帯を用いた LEO コンステレーションを構築する際に考慮すべき国際ルールのうち、関連する条項の一部については、WRC-23 にて更なる検討が行われた為、WRC-23 において見直しが行われた決議を中心に関連する議題の調査・整理を行った。

・WRC-23 議題 7 Topic A

NGSO システムの軌道パラメータに対して、軌道変動許容範囲を規定する事を検討

する議題について調査/整理し、報告書案の作成を行った。

• WRC-23 議題 7 Topic B

NGSOシステムに課される運用開始後のマイルストーンが規定された無線通信規則 決議35を改訂し、マイルストーン完了後のNGSOシステムに対する規定を検討する議題について調査/整理し、報告書案の作成を行った。

• WRC-23 議題 7 Topic G

Q帯、V帯を用いた単一NGSOシステムがGSO衛星網に与える干渉量の評価方法を規定した無線通信規則 決議770に対して、既存の決議のままでは、実装が不可能という問題に対処するための改訂を検討する議題について調査/整理し、報告書案の作成を行った。

また、他の研究者がQ帯、V帯でのNGSOシステムを利用したユースケースを検討する際に考慮に入れるべき事項についても整理を行った。

• 研究開発項目 2-c)-5 衛星システムの検討・設計

上述の項目 2-c)-2 においてビジネスモデル及びユースケースから衛星諸元が示されたため、本衛星諸元を元に衛星システムに関する検討を実施し、衛星バス候補を選定し、諸元を明確化した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

研究開発項目 2-a) Q帯、V帯に対応する受信系機器の高性能化に関する研究開発

今回の研究で得られた衛星搭載受信機に関わる検討結果や各種解析/評価結果の中から今後開発する製品に適用可能な部分を抽出し、実装していく。

現時点で想定される適用内容は以下の通り。

- 機器構成、周波数構成検討結果：他のQ/V帯受信機検討
- 各種半導体デバイス性能ベンチマーク、プロセス比較結果：高性能RFデバイス を必要とする衛星搭載機器全般

研究開発項目 2-b) Q帯に対応する送信系機器の研究開発

今回の研究で得られた衛星搭載送信機にかかわる検討結果や各種解析/評価結果の中から今後開発する製品に適用可能な部分を抽出し、実装していく。

現時点で想定される適用内容は以下の通り

- 機器概念検討結果：送信系機器開発
- 歪補償性能検討結果(LCAMP HIC)：今後のQ帯SSPA検討
- 3D電磁界解析モデル(TWT)：今後のQ帯TWT性能検討
- 1次試作MMIC結果、高廃熱構造検討、製造性検証：高性能・省スペース送信機を必要とする衛星搭載機器全般

研究開発項目 2-c) Q帯、V帯における高性能送受信システムの検討・設計・評価

検討した各ユースケースについては、本研究開発における衛星ペイロードを基にした衛星コンステレーションだけでなく、広く衛星通信ユースケースとして適用可能なものであり、将来的な展開が期待される。その他、技術観点では、回線設計、減衰特性の把握、コンステレーション検討なども、今後のQ/V帯LEO衛星通信サービスにおいて共通的な検討が多く、本研究開発で得られた技術や知見を基に、LEO衛星の将来的検討に繋げることが可能である。

また、ファイリング手続や国際調整、国内における免許手続に必要な項目の整理についても上記同様、本研究のみならず広く適用可能なものであり、将来のLEO衛星システム検討に資するものである。