

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00601
研究開発課題名 Beyond 5G 次世代小型衛星コンステレーション向け電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発
研究開発項目 1 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発
研究開発項目 2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発
副 題 次世代 LEO 通信コンステレーション構築に向けた超小型・低コスト電波・光ハイブリッド通信システムおよび通信制御システムの研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、研究者らの 50-200kg 級超小型衛星および関連技術の開発・製造・運用経験を活用した以下の研究開発項目を実施し、本研究開発の成果と研究者の超小型衛星バス技術および量産製造・自動運用システムとを組み合わせることで、LEO 通信コンステレーションの早期構築を目指す。

- 100kg 級衛星に複数台搭載することを想定した低コスト量産性に優れた光通信機
- 電子的にビーム方向を制御することで、光通信と両立して電波通信を可能にする Ka 帯フェーズドアレイ通信機
- 電波・光経路制御を低遅延で行う通信経路制御システム
- 地球観測衛星での姿勢・軌道制御機能をベースに、光通信に求められる軌道・姿勢の推定・制御の高性能化
- 地上インフラ、ネットワーク構築に必要となる低コスト可搬光地上局
- 次世代高速光通信機のための基盤研究開発
- 通信コンステレーションのサービス安定化に資する自動運用システムの基盤研究

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

株式会社アクセルスペース<代表研究者>
国立大学法人東京大学
国立大学法人東京工業大学
株式会社清原光学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 2,393 百万円 (令和 5 年度 665 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 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発
研究開発項目 1-a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発
(株)清原光学、(株)アクセルスペース
研究開発項目 1-b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発
(株)アクセルスペース、東京大学、東京工業大学

研究開発項目 1-c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発
 ((株)清原光学、(株)アクセルスペース)

研究開発項目 2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

研究開発項目 2-a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発 ((株)清原光学)

研究開発項目 2-b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発 ((株)アクセルスペース、東京大学)

(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	0
	外国出願	2	2
外部発表等	研究論文	3	3
	その他研究発表	38	23
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	9	2
	展示会	7	1
	受賞・表彰	1	1

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 1 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

研究開発項目 1-a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発
 ((株)清原光学、(株)アクセルスペース)

① 衛星搭載光通信機器の開発 ((株)清原光学)

- ・ システム要求やこれまでの仕様変更を反映して LCT 設計を進め、各コンポーネントを開発した。
- ・ 部材単位で、放射線試験を実施した。
- ・ 光アンテナと内部光学系の組立調整を行い、光学性能の評価を実施した。

② ジンバル機構、衛星インタフェースなど ((株)アクセルスペース)

2022 年度に清原光学・東大とともに策定したインタフェース仕様を基に、ジンバル機構部の設計案を 2 案設計した。組立性等の観点も含め、それぞれの案のトレードオフ検討を実施し、加えて軽量化に関する議論を実施した。また、電気部(ドライバ回路、RD 変換回路)について検討を行い、デバイスの調査・選定や、それらを用いた際の制御精度の見積もりを実施した。

研究開発項目 1-b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発
 ((株)アクセルスペース、東京大学、東京工業大学)

① RF 通信システム統合/デジタル処理部 ((株)アクセルスペース)

- ・ RF 通信システム統合
 開発した基板を用いて環境試験を実施した。
- ・ デジタル処理部
 2022 年度に開発・評価した基板の知見をもとに改良基板の開発・性能評価を実施した。

- ② 電波・光通信経路制御 (株)アクセルスペース
 FPGA 機能の実装は 2022 年度に引き続き評価基板を用いて継続し、また、この評価基板をベースにした基板の開発にも着手し、光通信機・Ka 通信機とも調整の上仕様を策定し、方式設計を完了した。
- ③ 光通信初期捕捉・姿勢協調制御/姿勢制御・軌道推定性能の高度化 (株)アクセルスペース
- ・ 低遅延・高出力レート・高精度 STT(Star Tracker) の開発
 選定したイメージセンサを搭載するための基板を開発した。その後、基板上の FPGA 実装に着手した。
 - ・ 姿勢・位置推定アルゴリズムの改善
 2022 年度までの成果 (STT/ジャイロのノイズフィルタ設計) を基に、フライトソフトウェアに統合していくための開発を行った。
 - ・ RW(Reaction Wheel) の擾乱低減技術の開発
 2022 年度に引き続き、選定・調達した RW の事前動作確認および擾乱測定二に向けた準備を進めた。
- ④ 初期捕捉・姿勢協調制御シミュレーション・アルゴリズム開発 (東京大学)
- ・ 制御系で用いる各センサ・アクチュエータの実機性能評価を行い、捕捉追尾制御アルゴリズムが前提としている各機器への要求性能を、各々の機器が実際に達成できることを確認した。
 - ・ シミュレータ上で検証したアルゴリズムのうち、ハードウェアロジックとして実装が必要な内容について、搭載計算機上で動作する搭載 FPGA ロジックとして実装した。
 - ・ 上記ハードウェアロジックを実装した搭載計算機と各センサ・アクチュエータを光学定盤上で連結したブレッドボードモデルとしての捕捉追尾制御系を構築し、Hardware-In-the-Loop シミュレーションにて、所望の性能が達成できることを確認した。
- ⑤ RF 通信システム用アンテナ・RFIC (東京工業大学)
 送信機および受信機用 RFIC の設計、試作評価を行い、目標の 40mW よりも大幅に低い 3mW の消費電力を達成した。29GHz 帯アンテナの改良設計・試作評価、19GHz 帯アンテナの試作評価・改良設計を行い、目標の 66 度に対してより広い 75 度のビーム角を達成した。RFIC とアンテナを搭載した 32 素子フェーズドアレイ送信機および 256 素子受信機を作成し、評価を行い、右旋・左旋円偏波双方で 256APSK 時に 8Gbps の通信速度を達成した。

研究開発項目 1-c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発
 (株)清原光学、(株)アクセルスペース

- ① 地上局光アンテナ・捕捉追尾部の開発 (株)清原光学
- ・ これまでの仕様の最終確認を行い、内部光学系の光学設計とメカ設計を完了し、各部材を製作した。内部光学部の組立、調整を実施した。
 - ・ 内部光学系は、波長分割ではなく瞳分割方式を採用した。また、衛星搭載型で使用する BDC は取り付けずビーコンを採用した。
- ② COTS 望遠鏡の自動追尾 (株)アクセルスペース
- 選定・調達した架台用のソフト開発を行い、自動追尾のための準備を進めた。

研究開発項目2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

研究開発項目2-a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発 (株)清原光学)

- ① 多波長光通信
 - ・ 100Gbps 級光通信を実現するひとつの方式である WDM について、他国を含めた他研究の調査を実施した。
 - ・ 波長多重を実現する LCT 光学系の検討を行った。

研究開発項目2-b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発 (株)アクセルスペース、東京大学)

- ① 光通信機の故障診断 (株)アクセルスペース)
光通信機内のデバイス・コンポーネントに対して電源分配や温度制御、テレメトリ取得をするための基板を開発・製造した。
- ② LEO コンステレーションシミュレータ開発 (東京大学)
 - ・ 昨年度に実装したシミュレータをもとにさらなる柔軟性、拡張性の向上を目指したモジュラー性の高いシミュレータ構成の設計を行い、改良版シミュレータの開発を行った。
 - ・ シミュレータモデルの精緻化のため、衛星軌道計算の高精度化および地上一衛星間通信の不確定性モデル実装を行った。また、コンステレーションのユーザー需要モデルとして、公開されている船舶密度データからユーザー分布を生成する機能を実装した。
 - ・ ロバストな分散通信経路ルーティングアルゴリズムの検討を行い、コンステレーション・地上局間の通信が切断された際に、短いダウンタイムで別経路へ切り替えることができることを確認した。
 - ・ シミュレータの正確性・再現性向上のための環境を整備した。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1-a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発 (株)清原光学、(株)アクセルスペース)

- ① 衛星搭載光通信機器の開発 (株)清原光学)
 - ・ 仕様変更に伴うモデムの新規開発を実施する。
 - ・ これまで試作したコンポーネントを試験、評価する。
 - ・ 真空及び熱環境試験にて光学性能を評価する試験機を製作する。
- ② ジンバル機構、衛星インタフェースなど (株)アクセルスペース)
 - ・ 機構部の仕様を期初の段階で Fix して、設計・製造へ移行し、その後、性能・環境試験を実施する。光学部とも組み合わせて統合試験を実施する。また、将来に向けた軽量化案も整理する。

研究開発項目1-b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発 (株)アクセルスペース、東京大学、東京工業大学)

- ① RF 通信システム統合/デジタル処理部 (株)アクセルスペース)
2024 年度は、これまで試作した基板を用いて電波・光通信経路制御と接続してのシステム評価を行う。

② 電波・光通信経路制御 ((株)アクセルスペース)

2023 年度に方式設計を行った基板の製造を行い、これまで評価基板で進めていた経路切替機能を移植したうえで、光通信機や Ka 通信機とも接続してシステム評価を行う。

③ 光通信初期捕捉・姿勢協調制御/姿勢制御・軌道推定性能の高度化
(株)アクセルスペース)

- ・ 低遅延・高出力レート・高精度 STT(Star Tracker) の開発
イメージセンサ基板への FPGA 実装を完了し、推定精度・遅延時間・出力レートといった測定を実施する。
- ・ 姿勢・位置推定アルゴリズムの改善
2023 年度で開発を完了したため 2024 年度の作業は発生しない。
- ・ RW(Reaction Wheel) の擾乱低減技術の開発
選定・調達した RW 全種類の擾乱測定および解析を完了する。

④ 初期捕捉・姿勢協調制御シミュレーション・アルゴリズム開発 (東京大学)

- ・ 通信系各機器や衛星バス側搭載計算機等とのインターフェースとなるソフトウェアを実装する。
- ・ 搭載計算機やセンサ・アクチュエータを光アンテナ等の LCT 内の他機器とも連結させ、軌道上の END-to-END に近い状態での性能評価試験系を構築し、性能評価を実施する。
- ・ 性能検証結果を踏まえつつ、制御アルゴリズム及び搭載ソフトウェア・ハードウェアロジックの性能向上や運用容易性向上のための改修を行う。

⑤ RF 通信システム用アンテナ・RFIC (東京工業大学)

2024 年度は、前年度のフェーズドアレイ送受信機の評価結果を基にさらなる高速化、低消費電力化を行い、フェーズドアレイ送信機および受信機において 256APSK 変調方式、2 偏波多重通信を実現する。RFIC においては、衛星システムの統合試験と並行して、さらなる低消費電力化および高速化可能な RFIC の開発を進めていく。アンテナにおいては、19GHz 帯アンテナの改良設計・試作評価を行い、さらなる高性能化を目指す。最終的に、フェーズドアレイ送受信機において、8つの RFIC を用いて右旋・左旋円偏波の2偏波に対応する 32 素子フェーズドアレイを実現する。送信機は 19GHz 帯において 1.0GHz 以上の動作帯域、受信機は 29GHz 帯において 2.0GHz 以上の動作帯域を達成する。送信機、受信機ともに、ビーム走査角 ± 66 度、帯域幅 500MHz あたり 2Gbps の通信速度、その際に 1 素子あたりの消費電力 40mW 以下を達成することを目指し、送受信機を作成していく。

研究開発項目 1-c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発
(株)清原光学、(株)アクセルスペース)

- ① 地上局光アンテナ・捕捉追尾部の開発 ((株)清原光学)
 - ・ 試作した地上局用コンポーネントの評価、測定を行う。
- ② COTS 望遠鏡の自動追尾 ((株)アクセルスペース)
 - ・ 架台を用いた追尾精度評価を行う。

研究開発項目2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

研究開発項目2-a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発 (株)清原光学)

① 多波長光通信

- 他国を含めた他研究の調査を WDM 方式以外も含め実施する。
- 他国を含めた COTS 品の情報収集を実施する。

研究開発項目2-b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発 (株)アクセルスペース、東京大学)

① 光通信機の故障診断 (株)アクセルスペース)

- LCT システム全体に対する FMEA や、今後 LCT 基板単体試験・光学部との統合試験の中で見つかるであろう不具合事象を洗い出し、さらなる具体化と、対処方法の整理を行う。また、そこで検討された不具合対処方法に対して、コンステ内で与える影響を評価する。

② LEO コンステレーションシミュレータ開発 (東京大学)

- システム性能に対して感度のあると思われるモデル・パラメータの精緻化を行う。具体的には、地上局・コンステレーション衛星間の光通信に対する雲・大気による通信遮断のより正確な確率的モデル化の検討を実施する。
- 分散ルーティングアルゴリズムの有効性を多様な解析シナリオにおいて評価し、アルゴリズムの改善を行う。
- 多様なユーザー需要シナリオに対して有効なコンステレーション展開戦略の最適化問題を検討し、その有効性をシミュレータによって確認する。