

令和 6 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
国立大学法人東京科学大学
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 6 年度までの総額 3,057 百万円 (令和 6 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、東京科学大学

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	0
外部発表等	研究論文	5	2
	その他研究発表	73	35
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	11	2
	展示会	9	2
	受賞・表彰	1	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

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

対向試験に使用する口径 $\Phi 88\text{mm}$ の光アンテナを有する 10Gbps 対応の光送受信器を 2 台製作し、光学性能評価を実施した。対向試験用としての性能を満たすとともに改善点を明確にした。

対向光アンテナ間で 10Gbps のエラーフリーの空間光伝送を行った。衛星搭載用モデムでは、誤り訂正機能の効果やリアルタイム動画伝送等の機能確認を実施した。

環境試験として光送受信器の振動試験を実施し、光学性能に問題無いことを確認した。温度試験の評価環境を整備して、試作した光送受信器の温度性能評価を実施した。放射線試験により、部品やユニットの使用可否の判断を行った。

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

- Azimuth, Elevation の各軸を計測・制御可能な二軸ジンバル機構の設計・試作・性能評価を実施し、駆動レート、駆動分解能等につき必要な性能を満たす設計であることを確認した。
- 更なる軽量化策について、試作・評価の結果得られた知見も踏まえて検討し、複数案を整理した。

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、東京科学大学

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

- 電波通信サブシステムとして Ka 帯無線機を設計・試作・評価し、宇宙環境耐性を確認すると共に、高速通信モデム部の性能として帯域幅 250MHz あたり 1Gbps の通信速度達成を確認した。

② 電波・光通信経路制御 (株)アクセルスペース

- 10GbitEthernet インターフェース、経路制御システム、通信機制御ソフトウェアが実装された電波・光通信経路制御基板の設計・製造・性能評価を実施し、目標としていた機能・性能を確認した。光通信モデムおよび Ka 帯通信機と接続し、Ethernet パケットの送受信に成功すると共に、4K30P 映像 (6Gbps 相当) の伝送にも成功した。

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
 - ✧ STT の星像抽出、星識別、姿勢推定のアルゴリズムを開発し、採用候補の SoC 上に実装して動作検証に成功した。また、フードについて迷光除去性能を向上させながら小型軽量化する設計が完了した。
- 姿勢・位置推定アルゴリズムの改善
 - ✧ 姿勢・位置推定アルゴリズムの改善・実装・検証を実施し、目標性能の達成を確認した。
- 高性能・倍精度マルチコア OBC の開発
 - ✧ 高性能・倍精度マルチコア OBC 上で動作する拡張性・メンテナンス性に優れた姿勢軌道制御フライトソフトウェア用のフレームワークを改良・実装・検証し、目標性能の達成を確認した。
- ジャイロのノイズ低減手法の開発
 - ✧ ノイズフィルタ特性の例として移動平均フィルタがジャイロの各ノイズ特性にどのように影響を与えるかについて詳細に分析し、フィルタ設計・実装を行った。また、光ファイバジャイロの性能評価を行い、MEMS ジャイロとの比較検討を実施した。
- RW (Reaction Wheel) の擾乱低減技術の開発
 - ✧ 候補となる複数の RW, CMG の擾乱特性を計測、解析し、光通信衛星に適する低擾乱 RW 製品を選定した。姿勢安定度への影響を解析し、目標とする姿勢安定度の達成を確認した。

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)

- 光 HPA (High Power Amplifier)、光 LNA (Low Noise Amplifier) などの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、および IP コアを実装し、噛合せ試験を通して実装機能の健全性を確認した。
- 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 内の他機器と連結させた、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た。
- 上記の試験系を用いて、光アンテナ開口部側から擾乱によるブレが加わった受信光を模擬した光を入力し、所望の精度で受信光をセンサ視野中心に保持できることを確認した。

⑤ RF 通信システム用アンテナ・RFIC (東京科学大学)

- 本開発項目では、RF 通信システム用のアンテナ・RFIC を開発し、B5G 次世代小型衛星コンステレーションの中核技術となるフェーズドアレイ送受信機を実現した。
- -フェーズドアレイ送受信機において、64 個の RFIC を用いて右旋・左旋円偏波の 2 偏波に対応する 256 素子フェーズドアレイを実現した。
- -送信機は 19GHz 帯において 2.5GHz 以上の動作帯域、受信機は 29GHz 帯

において 3.0GHz 以上の動作帯域を達成した。

- ・ 送信機、受信機ともに、ビーム走査角 ± 66 度以上、帯域幅 500MHz あたり 4Gbps 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)

- ・ 口径 350mm の光アンテナを設計製作し、波面収差は目標値をクリアした。内部光学系については、送受信分離方式として瞳分割を採用して設計・製作を行った。捕捉追尾光学系は、視野角 $\Phi 0.5\text{deg}$ を確保しセンサーは IR カメラを採用した。

② COTS 望遠鏡の自動追尾 (株)アクセルスペース)

- ・ 望遠鏡用の COTS 架台に LEO 衛星の自動追尾機能を持たせるソフトウェアを開発した。実装した追尾方式での COTS 架台の制御精度を屋内外での追尾検証試験を通じて確認した。

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

SmallSatelliteConference、PhotonicsWest、SATELLITE 等の各学会展示会を通じて、先行研究の動向調査を行った。又 100Gbps 級の実現のために波長多重方式の課題となる高出力な光ファイバー増幅器の検討を進め、VLMA-EDFA 方式の光ファイバー増幅器に対応した LCT 光学系についての検討を行い、製品化に伴う課題抽出を検討した。

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)

- ・ 光通信機内の監視・制御を担う基板を開発した。また不具合発生時の通信システム性能への影響について、東京大学による LEO コンステレーションシミュレータでもって評価した。

② LEO コンステレーションシミュレータ開発 (東京大学)

- ・ 軌道上端末同士、および軌道上・地上間の通信リンクについて、相対距離・相対角速度・大気擾乱を考慮した通信成立性および通信遅延の計算機能を実装した。
- ・ ネットワーク上のリンクが不具合により切断される故障模擬機能を実装し、そのシステム性能に与える影響評価の仕組みを構築した。
- ・ シミュレータの開発にあたってはモジュラー化されたライブラリとなるような事前設計を行い、多様なレイヤー・粒度の解析に利用可能な柔軟性を獲得した。
- ・ 開発したシミュレータを用いて、分散ルーティングアルゴリズムを提案し、その性能評価を行った。
- ・ 開発したシミュレータを用いて、コンステレーションへの衛星展開戦略の意思決定支援検討を行った。

(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

本事業の研究開発成果であるKa 帯フェーズドアレイ通信機、電波・光通信経路制御システム、高性能化された軌道・姿勢の推定・制御能力を活用して、開発中の小型の電波・光ハイブリッド通信衛星に搭載して、衛星通信コンステレーション・ネットワークの軌道上実証を行う計画である。

Ka 帯フェーズドアレイ通信機については、周波数の国際調整を経て割り当てられる中心周波数・帯域幅に対して最適化を行い、上述の軌道上実証ミッションに用いる予定である。

電波・光通信経路制御システムは、光通信機の標準インターフェースに対応することで、多様な光通信機および本研究成果のKa 帯フェーズドアレイ通信機と接続可能にする。

高性能化された軌道・姿勢の推定・制御能力については、光通信だけでなく、高度な軌道・姿勢制御技術を要する宇宙ミッションに対応した衛星バス技術に活かされる予定である。

光通信機システムについては、今後の実用化に向けて、本事業の研究開発成果を元に、CUBESAT 規格などに対応した機器開発など、各社が取り組んでいく関連の研究開発事業やサービスへ展開していく。

- 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

100Gbps 光通信機については、本事業の基礎研究の成果を、将来の国産光通信機の高速化に活かしていきたい。

本事業で開発された 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については、今後計画されている小型の電波・光ハイブリッド通信衛星で構成されるコンステレーションの運用で活用していく。