

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
- ◆受託者: 株式会社アクセルスペース、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
- ◆研究開発期間: 令和3年度～令和6年度(4年間)
- ◆研究開発予算(契約額): 令和3年度から令和6年度の総額3,057百万円(令和6年度665百万円)

2. 研究開発の目標

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各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。

研究開発成果

3. 研究開発の成果

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

研究開発目標

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

① 衛星搭載光通信機器の開発

- ・システム及び各要素の詳細設計を行う。
- ・環境試験、通信実験を行うEM相当モデルの試作および技術検討を行う。

② ジンバル機構、衛星インタフェース

- 捕捉追尾光学系を搭載してAzimuth, Elevationの各軸を0.05deg以下の角度分解能で計測・制御可能な二軸ジンバル機構を実現する。
- 光通信機全体としての宇宙環境試験(打ち上げ振動、衝撃、温度、真空)を行い、耐性を評価し、100kg級衛星に搭載可能なことを確認する。

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

① 衛星搭載光通信機器の開発

- ・対向試験に使用する口径Φ88mm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実施。
- ・衛星搭載用10Gbpsモデムを製作し、誤り訂正機能の効果を確認。
- ・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。
- ・温度試験の評価環境を整備し、試作した光送受信器の温度性能を評価を実施した。
- ・放射線試験を実施し、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

- ・地上評価用のモデルの設計・試作・性能評価を行った。
- ・駆動レート、駆動分解能について、目標値を達成。
- ・更なる軽量化に向けた対策箇所を特定。

3. 研究開発の成果

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

研究開発目標

研究開発成果

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

① RF通信システム統合/デジタル処理部開発

・試作した自作基板をベースに機能確認を行う。また、衛星搭載に近い動作状況での環境試験を行い、サブシステムレベルでの成立性確認を目標とする。上位システムとのコマンドのやり取り等システム接続を意識した開発も進める。

② 電波・光通信経路制御開発

- ・衛星内部での高速データ伝送
- ・光・RF無線などの異なる通信方式への相互データ変換技術
- ・通信経路選択技術

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

- ・1)低遅延・高出力レート・高精度 STT の開発
- ・2)姿勢・位置推定アルゴリズムの改善
- ・3)高性能・倍精度マルチコアOBCの開発
- ・4)ジャイロのノイズ低減手法の開発
- ・5)RWの擾乱低減技術の開発

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

- ・初期捕捉・協調制御アルゴリズムの詳細検討と検証
- ・制御系実ハードウェアの検証に向けた準備

⑤ RF通信システム用アンテナ・RFIC

- ・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(*中心周波数は国際周波数調整に応じて調整)
- ・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。

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

① RF通信システム統合/デジタル処理部開発

- ・電波通信サブシステムとしてKa帯無線機を開発し、高速通信モデム部の性能として、帯域幅500MHzあたり2Gbpsの通信速度、フェーズドアレイアンテナ部の性能としてビーム走査角 ± 66 degの性能達成が可能であることを確認した。これにより、小型衛星に搭載可能で、Gbps級の通信速度を持ち、広範囲のビーム走査機能を持つ通信機が実現可能である。

② 電波・光通信経路制御開発

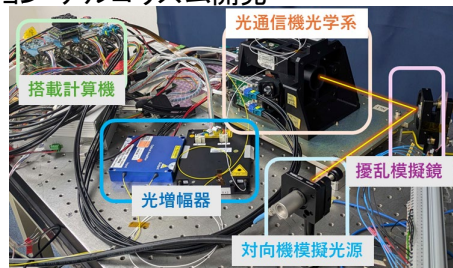
- ・電波・光通信経路制御基板(OptC-MC基板)の開発・評価を行い、目標としていた10Gbpsの高速データ通信、光・RF通信機との接続、経路切り替え機能の実装を確認した。

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

- ・(1)低遅延・高出力レート・高精度 STT の開発においては、地球観測衛星GRUSで採用した内製STTの性能向上技術の実証に成功した。
- ・(2)姿勢・位置推定アルゴリズムの高精度化および(3)OBCの姿勢制御計算能力向上につき、最終目標の性能値を達成した。
- ・(4)ジャイロのノイズへの影響を分析し、フィルタ設計・実装をおこなうと共に、最適なジャイロ選定を実施した。(5)姿勢安定度の目標を達成する低擾乱RW(Reaction Wheel)も計測・解析に基づき選定できた。

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

- 1)初期捕捉・協調制御則を机上検討し、PCシミュレーションにて目標性能達成を確認。
- 2)検討した制御則を搭載計算機用ソフトウェア/ハードウェアロジックとして実装し、光通信機搭載要素機器と接続した状態で実ハードウェア上での目標性能達成を確認。



⑤ RF通信システム用アンテナ・RFIC

- ・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: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(前頁からの続き)

研究開発目標

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

- ① 地上局光アンテナ・捕捉追尾部の開発
 - ・地上局用光アンテナ、捕捉追尾部の詳細設計を行う。
 - ・COTS望遠鏡の内部光学部の環境試験、通信実験を行うEM相当モデルの試作および技術検討を行う。
- ② COTS望遠鏡の自動追尾
 - ・TLE等の軌道情報に基づき、COTS望遠鏡の架台を制御して、追尾精度を検証できるLEO衛星(ISSなど)を用いて、実フィールド試験で光初期捕捉に必要な追尾精度(目標<0.1deg)を検証する。

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

- ① 地上局光アンテナ・捕捉追尾部の開発
 - ・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 Φ 0.5deg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
 - ・開発した制御ソフトウェアにより、ISS(国際宇宙ステーション)の軌道データを利用した屋内での追尾駆動検証において、最終目標値0.1deg以下(初期捕捉に必要な精度0.2deg以下)を満たす0.0002degの追尾精度を発揮できることを確認した。
 - ・実フィールド試験として実施したISS追尾においては、追尾時のISSを捉えた動画を取得することには成功したが、追尾精度に課題があることを確認しており、要因の解析に取り組んだ。

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

研究開発目標

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

- ① 多波長光通信
 - ・先行研究、他研究の動向調査を行う。
 - ・100Gbpsシステムの仕様検討、妥当性検証を行う。
 - ・仕様の製品化の課題抽出を行う。

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

- ① 光通信機の故障診断
 - 光通信機の劣化や故障のモードを分析し、光通信機でモニタしてテレメトリとして出力する情報を具体化する。
 - 光通信機不具合発生時の通信経路の再構成アルゴリズムを検討し、シミュレータ上でコンステレーション全体での通信システム性能(キャパシティ、遅延時間等)を評価し、通信システムとしてのロバスト性を検証する。
- ② LEOコンステレーションシミュレータ開発
 - ・基本検討
 - ・シミュレータ開発

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

- 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。
- ② 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、ファイバーカップリングシミュレーション実験を行った。
- ③ 製品化に伴う課題抽出を検討した。

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

- ① 故障診断
 - ・光通信機内の監視・制御を担う基板(電源基板およびLCT Controller基板)を開発した。
 - ・不具合発生時の通信システム性能への影響については、東京大学によりLEOコンステレーションシミュレータでもって検討が実施された。
- ② LEOコンステレーションシミュレータ開発:
 - LEO衛星コンステレーションのシステム設計支援を目的としたPythonライブラリCOSMICAを開発
 - シミュレータを用いて以下の検討・解析を実施
 - 分散型バックアップルーティング手法の提案
 - コンステレーション展開戦略支援手法の検討

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
2 (0)	2 (0)	5 (2)	73 (35)	0 (0)	11 (2)	9 (2)	1 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 特許出願
2件の国内特許が登録になった。
・ 小型低消費電力RFアレーアンテナ
・ 軌道情報を踏まえた地上局との通信最適化を行う情報処理装置

(2) 学会発表、他
・ 宇宙科学技術連合講演会、電子情報通信学会、IEEE、Small Satellite Conferenceなどにおいて積極的に論点発表を実施
・ 国内・海外展示会への光アンテナ等の成果の展示や、Ka帯フェーズドアレイアンテナ通信機のプレスリリースなど成果発表を実施
・ IEEE Microwave Theory and Techniques Society, MTT-SAT Challenge 1st Prize“を受賞した。(2023.06.15)

5. 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。