

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
- ◆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、国立大学法人東京工業大学、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5年度までの総額2,393百万円(令和5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。

3. 研究開発の成果

研究開発成果

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

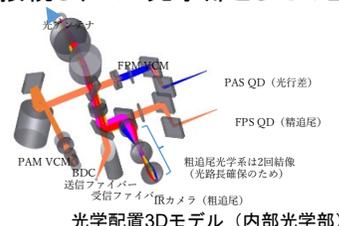
- ① 衛星搭載光通信機器の開発
 - ・システム及び各要素の詳細設計を行う。
 - ・環境試験、通信実験を行うEM相当モデルの試作および技術検討を行う。
- ② ジンバル機構、衛星インタフェース
 - ・ジンバル機構の試作モデル(BBM)の開発を行い、単体での性能を検証する(0.05 deg以下の角度分解能でのAzimuth, Elevationの角度検出と制御)
 - ・光通信システムレベルでの機能・性能検証を行い、PFM開発へフィードバックする。また対環境性能についても評価を実施する。

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

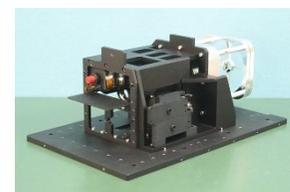
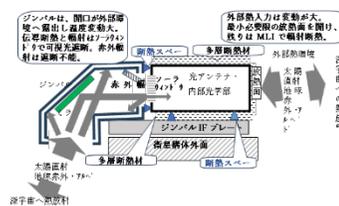
- ① 衛星搭載光通信機器の開発
 - ・システム全体の機能ブロック図を更新し、熱設計方針のもと
 - ・試作した内部光学系と光アンテナの接続し、LCT光学部としての全景を製作



熱設計方針のもと内部光学系を再配置



光学配置3Dモデル(内部光学部)



総アルミ製によるLCT全景配置

- ② ジンバル機構、衛星インタフェース
 - ・1鏡型ジンバル機構の設計検討を複数案実施した。軽量化に向けての課題が出たため、製造前に軽量化案を検討中
 - ・電気システム(ドライバ回路・RD変換回路)の検討を実施し、ジンバル制御分解能および検出精度の見通しを得た。

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

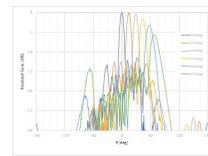
研究開発成果

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

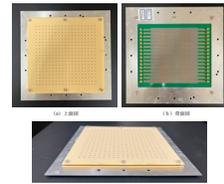
- ① RF通信システム統合/デジタル処理部開発
 - ・試作した自作基板をベースに機能確認を行う。また、衛星搭載に近い動作状況での環境試験を行い、サブシステムレベルでの成立性確認を目標とする。上位システムとのコマンドのやり取り等システム接続を意識した開発も進める。
- ② 電波・光通信経路制御開発
 - ・衛星搭載を想定した経路制御基板(BBM)の開発
 - ・開発した経路制御基板を用いての経路制御動作検証
 - ・経路制御システムレベルでの機能・性能検証
 - ・通信経路選択のための情報取得
 - ・衛星バス部との通信
 - ・光通信システムとの通信
- ③ 光通信初期捕捉・姿勢協調制御/姿勢制御・軌道推定性能の高度化
 - ・STT EMの開発。イメージセンサー基板・中継基板の設計・製造および、新規フードの設計・製造、低消費電力ソフトウェアの開発
 - ・STT・ジャイロの遅れ補償アルゴリズムの設計開発、およびOBC実装
 - ・姿勢制御アルゴリズムのOBC実装
 - ・ジャイロのノイズ低減フィルタの設計およびOBC実装
 - ・RW・CMGの擾乱測定環境構築、および擾乱測定。また、アクチュエータの搭載方法の検討
- 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
 - ・試作基板製作・試験と改良点出し、前年度評価ボードで開発したソフトの実装、周辺回路インターフェース策定
 - ・機械構造検討、熱真空試験・振動・放射線等環境試験準備・実施
- ② 電波・光通信経路制御開発
 - ・経路制御アルゴリズムの開発・評価
 - ・アルゴリズムを実装するための基板開発・製造準備
- ③ 開発光通信初期捕捉・姿勢協調制御/姿勢制御・軌道推定性能の高度化
 - ・ジャイロノイズ低減手法や遅れ補償を含む搭載用姿勢制御アルゴリズム開発の完了
 - ・STTイメージセンサ用基板開発・評価を実施
 - ・24年3月までにRW擾乱測定実施予定
- 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
 - ・擾乱モデル・要素機器実機性能評価結果を取り込んだシミュレーションにて捕捉追尾アルゴリズムの検証を行い、目標性能が達成可能なことを確認した。
 - ・検討した捕捉追尾アルゴリズムを搭載計算機に実装し、統合試験を開始
- ⑤ RF通信システム用アンテナ・RFIC
 - ・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。



Left-Hand Circular Pol.	Right-Hand Circular Pol.
29 GHz	29 GHz
256 APSK	256 APSK
1 GBaud	1 GBaud
-40 dBm	-40 dBm
8 Gbps	8 Gbps
-32.1 dB (2.49%)	-32.4 dB (2.41%)



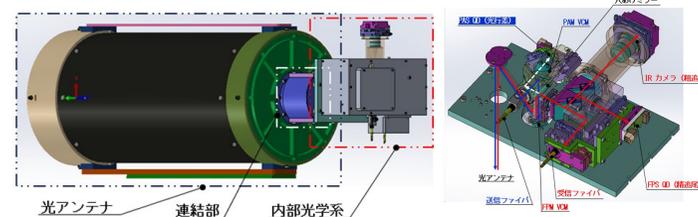
研究開発項目1:LEO星座レーション用
小型衛星搭載電波・光ハイブリッド
通信技術の研究開発(前頁からの続き)

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
 - ・前年度に検討した回線設計や誤差解析を基に衛星追尾ソフトの開発、フィールドでの追尾試験を行う。試験結果を基に改良仕様等を検討、衛星側とのインターフェース調整等を進める。

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
内部光学部・機構メカの開発
 - ・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行い製造に着手した。・可搬型地上局用の望遠鏡の設計を完了し、製作を行った。



内部光学部を含むCOTS望遠鏡の3D図

- ② COTS望遠鏡の自動追尾
 - ・COTS架台の制御ソフトを開発・評価し、光アンテナ・追尾系との接続に向けた準備を行った。

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

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。
- ② ・100Gbpsシステムの仕様検討、妥当性検証を行う。
- ③ ・仕様の製品化の課題抽出を行う。

2-b) LEO星座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

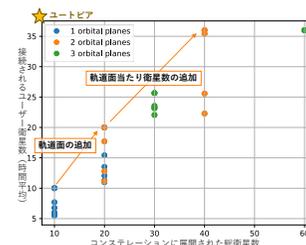
- ① 光通信機の故障診断
 - ・検討した、故障診断のために必要なテレメトリ情報を基に、機器上に実装されるアルゴリズムを検討し、シミュレータなどで検証を開始できる状態とする。
- ② LEO星座レーションシミュレータ開発
 - ・基本検討
 - ・シミュレータ開発

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
 - ・国内外における調査をSmall Satellite Conference、Photonics West等の学会および展示会にて調査を行った。
 - ・概念設計および仕様検討に必要な多波長光通信の構成部材の情報収集を行い、開発用の部材を入手した。

2-b) LEO星座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 故障検知アルゴリズムを搭載するLCT基板のIF策定・回路設計・AW設計を実施し、製造に着手した。実装ソフトも検討を行っており、一部着手。
- ② LEO星座レーションシミュレータ開発:
 - ・衛星軌道計算・ネットワークポロジ生成・通信性能計算・システムレベル通信シミュレーションなどの機能を持ち合わせた多様な解析が可能なツールボックスとしてのシミュレータを開発した。
 - ・シミュレータを用いて、段階的な衛星星座レーションの発展計画立案支援のための解析を行った。右図は地球観測衛星星座レーションをユーザーとした場合の解析出力の一例。
 - ・ロバストな通信経路ルーティングアルゴリズムの検討を行った。



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・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
2 (0)	2 (2)	3 (3)	38 (23)	0 (0)	9 (2)	7 (1)	1 (1)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 学会発表(2023年度)

- ・The 2023 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP 2023)にて、本プロジェクトについて招致講演を実施した。(大阪)(2023.06.29)
- ・IEEEにて3件の研究論文を発表した。(2023.06.01、2023.07.01、2023.12.01)
- ・IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)において、1件の収録論文を発表した。(2023.06.29)
- ・IEEE European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC)において、1件の収録論文を発表した。(2023.09.12)
- ・74th International Astronautical Congress 2023において1件の収録論文を発表した。(2023.10.02)
- ・第67回宇宙科学技術連合講演会において、本プロジェクトについて5件の収録論文を発表した。(2023.10.17)
- ・電子情報通信学会 ICD/CAS 学生・若手研究会において、3件の口頭発表をおこなった。(2023.12.04)

(2) 受賞(2023年度)

- ・IEEE Microwave Theory and Techniques Society, MTT-SAT Challenge 1st Prize“を受賞した。(2023.06.15)

5. 今後の研究開発計画

- 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
 - 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
 - ・ジンバルを含む光通信機の試作、性能評価および各種環境試験を進めていく。
 - 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
 - ・各開発要素で、試作機の開発、評価を継続するとともに、試作機を用いての統合試験を進めて行く。
 - 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
 - ・選定した地上局用望遠鏡に合わせて設計した内部光学系の製作を行う。あわせて、自動追尾のために選定した架台を使用した追尾成立性の検討を行う。
- 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
 - 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
 - ・多波長用に選定したCOTS品のHPAの評価や、他候補品の継続調査を行い、基礎開発や統合試験を行っていく。
 - 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
 - ・検討した故障診断手法のアルゴリズムにつき、実機での評価、統合試験を進めていく。
- ・LEOコンステレーションシミュレータ開発については、検討したロバストな通信経路ルーティングアルゴリズムの有効性をシミュレータによって確認する。また、シミュレータを用いて、より詳細な通信需要モデルでのシナリオの解析を行う。