

令和 3 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 18601
 研究開発課題名 衛星搭載光通信用デバイスの国産化及び信頼性確保に関する研究開発
 副 題 衛星搭載用超高速光通信コンポーネントの研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発は 3 年間（※）の活動期間にて、衛星搭載光通信用デバイスの選定及び信頼性確保、所要明確化、そして地上局と衛星間の通信方式（地球周回衛星(LEO)～地上伝送 40Gbps、静止衛星(GEO)～地上伝送 10Gbps）に関する光空間通信コンポーネントの設計を行い、最終目標である衛星搭載光送受信機プロトタイプの開発とそれを用いた光送受信器性能検証を行い、衛星搭載光通信技術の確立と標準化の構築を目指すものである。

（※ 当初計画では 3 年間、3 回の 1 年延長を経て最終的に 6 年間）

(2) 研究開発期間

平成 28 年度から令和 3 年度（6 年間）

(3) 受託者

日本電気株式会社<代表研究者>

(4) 研究開発予算（契約額）

平成 28 年度から令和 3 年度までの総額 1200 百万円（令和 3 年度 0 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 光空間通信コンポーネントの設計と衛星搭載光通信用デバイスの所要明確化
 （日本電気株式会社）

研究開発項目 2 衛星搭載光通信用デバイスの選定および信頼性確保
 （日本電気株式会社）

研究開発項目 3 衛星搭載光送受信器プロトタイプにおける性能検証
 （日本電気株式会社）

研究開発項目 4 パフォーマンスモニタリング
 （日本電気株式会社）

(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	9	0
	外国出願	6	0
外部発表等	研究論文	1	0
	その他研究発表	34	0
	標準化提案・採択	2	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	2	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究期間を通して得られた成果を研究開発項目ごとに説明する。

研究開発項目1：光空間通信コンポーネントの設計と衛星搭載光通信用デバイスの所要明確化

(1) 大気伝搬シミュレータ改良

プロジェクト開始前に整備済みの、スナップショット的大気揺らぎシミュレータ(大気揺らぎランダムフェーズスクリーン(RPS)の組み合わせで模擬した波面歪みシミュレータ)に対し、RPSの相対位置変化により時間変動を出力可能とする拡張を行った。同シミュレータ出力の時間変動情報の調整を既知のLEO-地上通信のデータを使用して補正・調整する技術を開発した。以上により、技術検討の素材として十分な精度を有する大気揺らぎ情報を保有することに成功した。

波面歪みを持つ信号光の受信端での光ファイバ結合効率の算出精度は大気揺らぎシミュレータの有用性に関する決定的な要素である。特に複数モード光ファイバへのモード毎の結合効率の推定精度は、モードダイバーシティ受信技術の検討の核である。6モード光ファイバへの空間結合系を構築し、光軸オフセット(管理可能な波面歪み)を与えた場合のモード毎の結合効率を実測と計算の両方で比較した。両者は精度よく一致し、波面歪みを持つ信号光の結合効率計算の精度が保証された。

(2) 伝送能力改善

大気ゆらぎ環境下における高速光空間通信でのダイバーシティ受信のような、受信機に入力する信号が厳しいフェージングを受ける状況に適用可能なデジタル合成処理について検討した。シミュレーション検討では、低軌道衛星-地上間光空間通信でのモードダイバーシティ受信で生じるフェージングのマイクロおよびマクロな時間変化を計算機により生成し、それに対処するデジタル合成方式として提案する適応カスケードフィルタ、およびSNR推定に基づく最大比合成の性能を詳細に比較した最適化を行った。実験的検討では、LEO-地上間の光空間通信でのFMF結合強度シミュレーション結果を任意波形発生器と可変光減衰器によって模擬した実験系を整備した上で100Gb/s QPSK信号3モード合成受信実験を行い、フェージングの特徴的な変化を十分に含む連続20msの受信データを取得したオフライン評価によってダイバーシティ合成DSPの性能を確認した。

モードダイバーシティ受信技術の核となるMIMO DSP技術の発展により開口多重に拡張させ、更に空間的に異なる位置に配置される開口での波面歪みの違いを大気揺らぎシミュレータで算出可能とする変更を加えることにより、開口&モードダイバーシティ受信におけるダイバーシティ利得の算出を可能とさせた。開口数1~4で変化させた場合のGEO-地上間通信のフェード発生率の計算を通じ、開口数毎の要求(送信側出力強度で表現)を明らかにした。

(3) 世界標準への対応

適応反復フレーム送信(ADFR)をはじめ本プロジェクトで開発した機能は、いわゆるデファクトとなっている通信技術と相互接続性を保ったままの改造により実現しているため、プロジェクト終了時点で世界標準との乖離は発生していないことを確認した。

(4) 高位通信レイヤとの連携

衛星-地上間の光空間通信システムでは、大気揺らぎ等に伴う伝送路不安定性への対応が鍵になる。良好な伝送路状態での高速通信性能と不良状態での通信接続耐性を送受信器間の協調不要で連続的に切り替えられる技術としてLayer-2/3の間に適応反復フレーム送信技術(ADFR)を挿入し、ADFRを含む3つのLayerを連携させることを提案した。(シミュレーションベースの検討は項目1-1で、実機ベースの検討は項目4で実施。)

大気揺らぎによるフェード伝送路における適応反復フレーム送信(ADFR、同技術については1-4で説明)による通信性能改善の様子を、大気揺らぎシミュレータの拡張により算出可能とした。シミュレータに機能追加を行い、通信可/不可の時間変化情報を出力、および任意のADFR設定(再送回数と再送間隔)とのマッチング、が可能となった。(本検討では「理論的な最善性能」を確認できるのみで、その最善性能を与えるADFR設定を定める仕組みは無い。この最適設定の実時間決定を可能とする仕組みの開発はじめそれ以降の機能実装は研究項目4にて実施した。)

研究開発項目 2：衛星搭載光通信用デバイスの選定および信頼性確保

(1) 協業デバイスメーカーの選定

衛星搭載利用を前提とした光学デバイスおよび 10Gbps 高周波デバイスの COTS 品につき、国産での「協力体制の構築」を模索した。LD 光源、光変調器などコアとなる光デバイスについては、宇宙事業への参入意図を示す会社も数社あったものの、地上光通信部品のコモディティ化に伴う部品事業縮小傾向もあり、国産での「協力体制の構築」の構想は変更せざるを得ない状況であることが分かった。原局と協議を重ねながら、国内メーカーでの部品供給が不可である COTS 部品については海外製品も候補として取り上げ、趣旨に沿うものについては選定の対象とした。

(2) 国内デバイスの耐環境性および信頼性確保

地上 COTS 品でも、放射線耐性/振動耐性/アウトガス量の確認やウイスカ対策の実施等の追加施策により、衛星搭載機器への適用可能な部品が存在することを示した。

(3) スクリーニングプロセスの確立

地上光通信用デバイスの信頼性については光通信業界標準である Telcordia を、宇宙環境に対する信頼性の確認手法については NEC で培ってきた EEE 部品のアップスクリーニング手法をそれぞれ参考にしながら、更に本研究開発を通じて行った評価手法結果の蓄積をもとに宇宙環境下利用に向けた光通信用デバイスのスクリーニングプロセスを確立した。部品ごとに有効な評価項目を調査し、機器の製造/検査フェーズで確認可能な評価項目を考慮することで、部品単体で実施すべき評価項目を識別した。本スクリーニングプロセスを適用することで、部品単体のスクリーニング費用を 85%程度削減できることを示した。

(4) 国内/グローバル標準の制定

民生光通信用デバイスの低コストな宇宙利活用を目的とした国内標準の制定を目標として、標準化提案文書を制定した。

研究開発項目 3：衛星搭載光送受信器プロトタイプにおける性能検証

(1) 耐環境設計

光送受信器において高データレートの信号伝送及び大規模高速処理を行うことにより、従来の衛星搭載機器と比較して発生熱量が増大する為、排熱のための対策を行った。本構造の機械環境に対する耐性に関しては、搭載機器の設計・製作の知見を活用し、耐振動・耐衝撃性を有する設計とし、宇宙空間の放射線環境 (TID、SEE) に対しても、光送受信器の先行試作で得られた知見を活用し、予測される影響毎に機能・性能を維持する為の対策を施した。衛星搭載機器として必要な耐放射線、耐温度環境、耐振動性の環境条件を定義し、その環境条件下で機能/性能を維持するために必要な耐性を有する光送受信器プロトタイプの仕様明確化を行った。

(2) 光送受信器の最適構成検討

光変復調方式 (10G・光送信側) として RZ-DPSK-DD 方式が実現性に富んでいると判断したが、RZ 化するために主信号に同期した 10GHz の CLK が必要になり、それを生成するために使用する EX-OR のデバイスを新規採用するというデバイスリスク、および CLK 部分の回路およびドライバ、変調器を NRZ 化にすることにより削減できるという小型化・省電力化の観点から NRZ-DPSK-DD による方式を第一候補とした。

(3) 通信速度可変の実現検討

ダウンリンク構成として 10Gbps×1 波長 ($\lambda 1$) の (N) RZ-DPSK 光送信器に波長 $\lambda 2$ の 2.5Gbps の (N) RZ-DPSK 光送信器を加え、波長多重フィルタで合波して WDM 信号を生成し、回線品質が比較的良好な状態では 10Gbps×1 波長 ($\lambda 1$) の (N) RZ-DPSK 光送信器を運用し、2.5Gbps の (N) RZ-DPSK 光送信器は光出力を停止する。回線品質が比較悪く状態では 10Gbps の (N) RZ-DPSK 光送信器の光出力を停止し、2.5Gbps の (N) RZ-DPSK 光送信器を運用する案を検討した。NRZ-DPSK は、RZ-DPSK からクロック信号で駆動する部分を削減した構成となり、小型化・省電力化に優れた構成となることから第 1 候補とした。アップリンク構成としては 3 つの構成を検討した。

(4) 送受信評価系の開発

開発する光送受信器（プロトタイプ）の機能・性能評価および通信方式の性能検証を行うために、評価系の開発が必要である。評価に必要な条件を定義し、光学系部の搭載模擬装置および対向通信の評価装置等の送受信評価系の開発を行った。

(a) 光通信データ処理装置（HDU：HICALIDATA UNIT）

想定する上位システムを「技術試験衛星 9 号機（ETS-IX）」とし、ETS-IXの規定を満足する 1553B 通信が可能なデータ処理装置の開発を行った。

(b) 光増幅部（OAMP：Optical Amplifier）

送受信で必要となる光アンプの開発を行った。先行するプロジェクトで開発する衛星搭載品を土台にし、信号光波長等のカスタマイズ部分が開発要素であった。パッケージ完成後に残留波長分散による受信感度への影響が、先行プロジェクト：なし、本プロジェクト：あり、であることが受信感度評価の過程で判明した。波長分散は線形・可換な現象であるため、受信感度劣化を解消する施策を地上局側に追加する対処とし、今回の光増幅部について改修は行わなかった。製造元と今後の製作時の対策方法を協議決定した。

(c) 試験ケーブル

試験コンフィギュレーションを定義し、試験ケーブルの開発を行った。

(d) 光送受信器（プロトタイプ）対向器

衛星側の光送受信部と対向させる対向器の開発を行った。

(5) 信頼性評価

光送受信器プロトタイプに対して、機械環境試験、熱環境試験、電磁適合性試験を実施し、環境耐性、信頼性を確認した。

(a) 機械環境試験

振動試験：衛星打ち上げ時の振動環境に対する耐性の確認

機器の剛性（固有振動数）の確認

製造上のワークマンシップエラーの確認

衝撃試験：衛星打ち上げ時の振動環境に対する耐性の確認

(b) 熱環境試験

熱真空試験：

軌道上を模擬した熱真空環境下においても機器の機能・性能が維持されることの確認

熱サイクル試験：

想定される温度変化における熱的なストレスに対しても機器の機能・性能が維持されることの確認

(c) 電磁適合性試験

想定される電磁的環境下においても機器の機能・性能が維持されることの確認

機器が放射する電磁的雑音が要求を満足していることの確認

研究開発項目 4：パフォーマンスモニタリング

(1) 光送受信機性能検証

誤り訂正回路の機能を使用して、光トランスポンダの機能として、最少時間単位 62.5us の BER(符号誤り率) モニタを実装した。実際に出力可能なデータは、(a) モニタ期間内の訂正 bit 数、(b) 訂正不能 bit のモニタ期間内の有無、(c) フレーム同期外れのモニタ期間内の有無、の 3 つ。BER は後者 2 つがともに無の場合に、モニタ期間から算出される受信 bit 数と (a) の比率として計算する。またこれらのモニタ出力は逆向きリンクのヘッダスペースを使用してはリアルタイムに対向局に送付する機能を実現した(衛星側で受信されるアップリンク信号の BER を地上局側で把握するため)。オペレータは最大 65,536 の連続出力を入手可能で、その単位は 62.5us の任意の整数倍である。

本機能を使用して開発した光送受信機の静特性および動特性を評価している。大気揺らぎを

想定した kHz オーダーの入力レベル変動にモニタとして追従可能であること、フェードによる信号断発生/回復におけるリカバリ時間がミリ秒レベルと高速であること、を確認した。

(2) パフォーマンスモニタ開発

安定な光伝送路における超高速通信と、不安定な伝送路において低速ながらも安定な通信を可能とする技術として適応反復フレーム送信(ADFR)を提案した。ADFRの2つの設定パラメータ(再送回数再送間隔)を適切に選択するには、フェードの継続時間及び発生確率に関する統計的性質のリアルタイム把握が必要である。それぞれヘッダ部分に細工を施したEthernet Frame, IP Packetの駆使によりFER(フレームエラー率)、PER(パケットエラー率)の実時間算出を実現し、これら情報を用いて伝送路のフェード特性の抽出に成功した。ADFR機能自体および伝送路フェード特性把握機能はオープンソースを使ってLinux PC上に実装した。両機能の連携による時変する伝送路特性(フェード特性)への最適ADFR設定に関する適応制御の実証を、プロトタイプと接続可能な10Gbps動作で行った。

静止軌道衛星(往復遅延500ms)の地上一衛星-地上の光空間通信システムにおけるTCP/IPデータ転送性能モデル、そこにADFR(適応反復フレーム送信)を適用した場合の得失を計算機シミュレーションで検討した。加えて試作したシステムを用い、大気伝搬シミュレータの出力データを用いて発生させたフェードも採用して、10Gbps動作でのスループットの改善を評価した。これらの結果、例えばフレーム誤り率30%の場合でも99%のパケット到達率をユーザ端末に対して提供できること、トータルのスループットとして720Mbpsのデータ転送速度が得られることを示した。これはデータ転送性能のモデルに従うものであったため、提案方式の有効性を示すとともに、高フェード率の光空間衛星通信伝送路でのデータ転送性能を適切に推測できること、効率的かつ最適な運用が提供可能であることを示した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

デファクト標準の獲得に向けた競争が激化する中で、フォーカスする市場に合致した技術のすり合わせ、標準化への関与を継続する。衛星コンステレーションの現実性向上にあわせて宇宙光通信の事業状況はプロジェクト開始時とは大きく様変わっている。ソリューション事業サービス事業の育成とともに、協業をはじめとした事業エコシステムの醸成を進めていく。

光通信への期待として、(a)スタンドアロン型(主にGEO衛星を使用するシステム)、(b)ネットワーク型(主に衛星コンステレーションシステム)の2つが存在している。今回の成果は主に(a)にフォーカスしたものであるが、(b)の重要性も日々増しているなかで、共通部分、差異部分を意識しながらの戦略的な技術開発、事業展開が重要である。ネットワーク型の研究ではなお地上システムとの連携を強く意識し、協業等を通じて技術領域を積極的に拡大させていく必要性が生じている。