

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 : HTSにおける電波と光のハイブリッド衛星通信技術のための研究開発
- ◆副題 : 電波と光の中継システムの交換効率の研究
- ◆実施機関 : 日本電気株式会社
- ◆研究開発期間 : 平成30年度～令和2年度(3年間)
- ◆研究開発予算 : 総額178百万円(令和2年度72百万円)

2. 研究開発の目標

本研究開発の目的を以下に示す。

- ・将来に必要となるRF光変換システムの目標とする機能性能を設定する。
- ・目標とする機能性能を満足するRF光変換方式を考案し、トレードオフ検討する。
- ・トレードオフ対象の中から代表的な方式を選定し、部分的な研究試作計画を策定する。伝送レートはRF側100Mbps相当、光側10Gbps相当とする。
- ・試作装置を利用し、想定される伝搬特性が目標機能性能に及ぼす影響を測定する。このうち、光回線側の影響は衛星搭載予定の機器を使用して、研究試作を評価するためのデータ取得を行い、影響評価に利用する。
- ・このための評価データ取得用の治具を作成すると共に、データ取得に利用する機材の整備を行う。影響評価の結果を反映し、RF光変換装置、システムに反映すべき内容を明確化し、仕様化する。

3. 研究開発の成果

項目1 RF光変換方式の検討 (平成30年度～令和元年度)

- 目的: RF光変換試作装置の要求仕様の設定、評価計画の策定
- アプローチ
 - ① RF光変換の研究動向を調査する。
 - ② 複数の方式を抽出し、比較検討を行い、試作する方式を決定する。
 - ③ 試作装置への機能・性能の要求仕様を設定し、評価計画を策定する。
 - ④ ①～③は同時並行で歩調を合わせて実施する。
- 目標
試作品要求仕様書の作成、評価計画書の作成

・平成30年度の実施内容
RF光変換方式のトレードオフ検討、RF光変換の要求仕様の検討、試作装置の仕様検討、評価計画の検討を実施する。

・令和元年度の実施内容
平成30年度の成果を踏まえ、使用条件と対比したRF光変換方式のトレードオフ検討を継続し、試作する方式を選定し、試作品仕様を確定する。検討条件は前年度と同様とするが、適宜追加調査結果を反映する。

■ 評価計画の検討では、衛星搭載機器の利用可能なスケジュールを再度考慮し、代替品を含めて計画の見直しを適宜実施する。なお、試作品への蓄積伝送機能実装の有効性を検討し、実装有無を判断する。

研究開発成果:

・RF光変換方式のトレードオフ検討

RF光変換の調査を実施し、中継方式として再生・非再生交換中継方式を軸として複数方式を抽出。またRF信号100Mbps相当、光信号10Gbps相当を想定した伝送速度差が大きい場合の適否を中心にトレードオフ一次検討を実施した。

・RF光変換方式の要求仕様検討

トレードオフ結果を踏まえ、技術の実現性、適用性、実現時期、利用形態、および適用範囲の拡張性を考慮し、候補となる方式の一次選定検討を完了した。

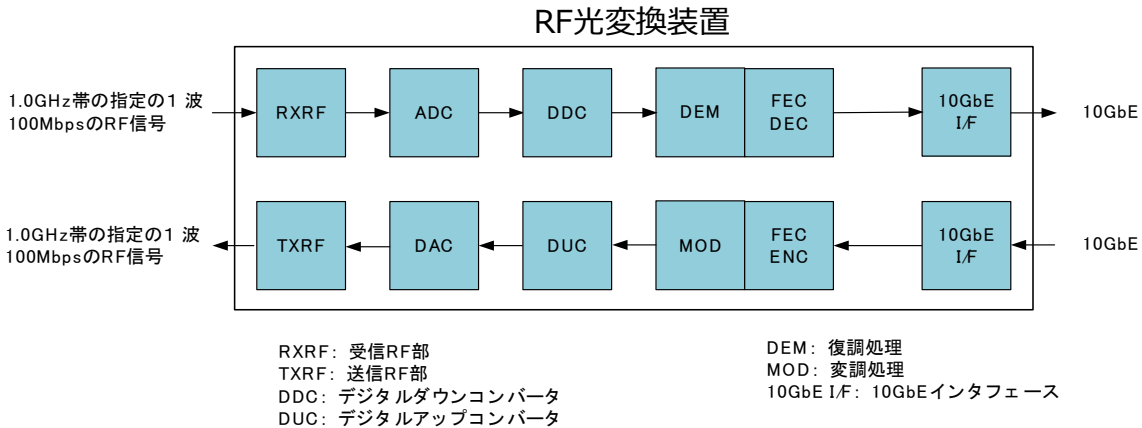
・RF光変換試作装置の基本仕様検討

選定候補の方式について、主信号処理機能を中心とした部分試作装置の基本仕様の一二次検討を完了した。

評価項目	再生交換中継方式	非再生交換中継方式	
1 適用する交換方式	ベースバンド方式	サンプリング方式	RoF方式
2 方式の概要	伝送データを搭載機器で再生	RF信号のサンプリング・再生	RF信号の光強度変調
3 機器構成(搭載側)	RF変復調, データFMT変換	RFサンプリング(ADC), RF再生(DAC), データFMT変換	EO/OE変換
4 RF回線との適合性	RF変復調方式の特定が必要	複数のRF変復調方式に対応できる可能性有り (RFスペクトラムとして処理)	
5 交換容量の制約	$R \times C \leq L$ 光伝送レート(L), RF伝送レート(R), RFビット数(C)	$R \times S \times B \leq L$ RFサンプリングレート(S), 光パルス幅(B)	EO/OE変換のHW性能に依存
6 光回線への収容効率	高	低	低
7 FPGA回路規模	中 (伝送データ再生機能)	低	-
8 費用	中 (伝送データ再生機能)	低	高(EO/OEデバイスが高価)
9 適用例	衛星内での信号交換中継	モバイル通信や地上波放送のギャップファイバー通信	CATV(旧方式)
10 HICALプロジェクトとの整合性	高 (10GbE-IF接続)	高 (10GbE-IF接続)	低 (OTRXとの接続不可)

RF光変換方式のトレードオフ検討結果

トレードオフ検討の結果、再生交換中継方式を試作方式に選定した。



3. 研究開発の成果

項目2 RF光変換装置の試作 (平成30年度～令和元年度)

- 目的: RF光変換装置の試作
- 課題・意義
試作品の構成・仕様検討、設計、製造・試験として実施する。期間に限られていることから、調達性を考慮した構成品の選定を早期に取りかかる必要があり、仕様検討と並行して実施することが必要となる。構成品はCOTS品前提である。
- 目標: 試作装置の完成

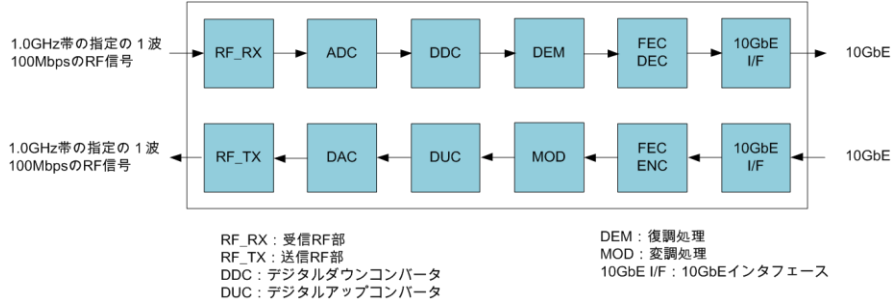
・平成30年度の実施内容
本項目では、研究開発項目1の結果を受けて、試作品の構成・仕様検討、設計、製造・試験を実施する。
平成30年度は試作品の構成・仕様検討と並行して、調達性を考慮した構成品の選定に早期に取り掛かりる。

・令和元年度の実施内容
平成30年度に引き続き、研究開発項目1の試作品仕様の検討結果に基づき、試作品の構成・仕様検討、設計、製造・試験を実施する。
調達に際しては、期間短縮を考慮し、市販のFPGA実装基板の有効利用を中心に、RF信号100Mbps相当、光信号10Gbps相当の処理が可能な構成品を選定する。なおFPGA、DAC、ADC、シリアルライザ、デシリアルライザの搭載化動向を調査し、試作品の構成品選定に際して考慮する。

研究開発成果:

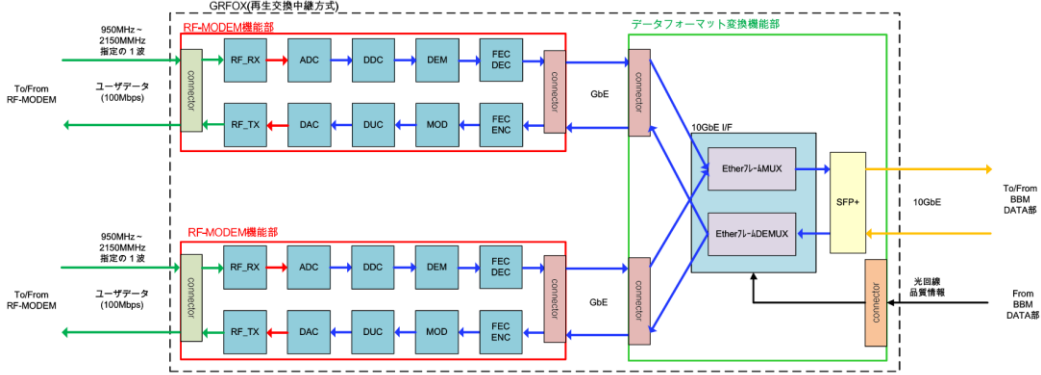
・RF光変換試作装置の構成・仕様検討

平成30年度の成果として、研究項目1における選定候補の方式について、研究部分試作装置の基本構成、および搭載化動向・調達性を考慮したFPGA、ADC/DACを含むキーデバイス候補の一次選定検討を実施した。また主信号処理機能の中心を担うFPGAの基本仕様様の一次検討を完了した。



機能ブロック図 (選定候補の1つの再生交換中継方式の場合)

試作仕様を設定し、試作計画を具体化した。



- ・RF-MODEM機能部は購入
- ・データフォーマット変換機能部は試作

3. 研究開発の成果

項目3 衛星搭載機器を利用した評価データ取得 (平成30年度～令和2年度)

目的: 大気特性変化を与えた際の衛星搭載装置の動作ログの取得

課題・意義
 搭載機器を使用したデータ取得の機会は非常に貴重であり、実際の運用環境を可能な限り模擬するため、技術試験衛星9号機の搭載機器を借用し、実際のレイアウトに配置し、搭載模擬ハーネスで接続し、大気シミュレータで大気特性を模擬し、搭載機器の動作ログを取得する。

目標: レベル変化の大きさ、速度による動作ログの取得

・平成30年度の実施内容

- 搭載模擬ハーネスを制作し、衛星搭載機器を利用した大気揺らぎの影響のデータ取得を行う。
- 平成30年度は搭載模擬ハーネスの制作に必要な部材を洗い出し、単納期で入手可能な部材を調達する。

・令和元年度の実施内容

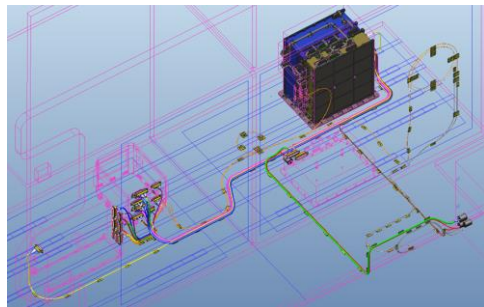
- データ取得計画の検討、データ取得用ハーネス(搭載模擬ハーネス)の部材調達、設計、製作を実施する。
 - データ取得計画の検討 (4月～9月)
 - 搭載模擬ハーネスの部材調達 (4月～12月)
 - 搭載模擬ハーネスの設計 (4月～12月)
 - 搭載模擬ハーネスの製造 (1月～3月)

・令和2年度の実施内容

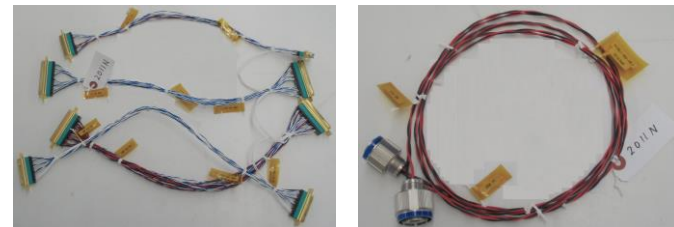
- 衛星搭載目的で開発された装置に大気特性変化を与えた際のデータ取得計画の検討、データ取得を実施する。
 - 評価データ取得 (11月～1月)
- 大気特性変化として、光空間シミュレータによる伝搬特性の影響下における評価データを取得する。
- 衛星搭載品: OTRX(PFM)の開発遅延に伴い、衛星搭載機器相当品: OTRX(BBM)を使用した評価コンフィギュレーションに変更して、特性評価を実施する。

研究開発成果:

搭載模擬ハーネスの部材調達/設計/製造を、実施した。



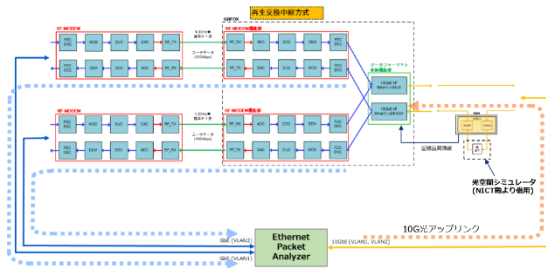
搭載模擬ハーネスの設計



代表写真
搭載模擬ハーネスの製造

評価系を構築し、大気特性変化を与えた際の動作ログを研究評価のために取得した。

- 光回線(Uplink)における回線品質のビットエラー評価
 - 光空間シミュレータによる大気揺らぎ擾乱有りの評価 治具のログ機能による OOF発生/誤り訂正 不能数/Bit Error数の時系列データを取得し、光受信レベルの変化に対する各取得パラメータの挙動を確認した。
- 光回線(Uplink)における回線品質のフレーム伝送評価
 - 光空間シミュレータの大気揺らぎパターンによる光受信レベル変化有り/無しそれぞれのフレームエラー数を測定
 - 大気揺らぎ無しの条件では、等間隔送信/バースト送信の比較において有意な差分は無く、大気揺らぎ有りの条件では、等間隔送信に若干であるが優位性を確認した。



評価コンフィギュレーションブロック図

評価結果サマリ

フレーム送信間隔	光受信レベル (dBm) ※光空間シミュレータOFF状態での光受信レベル			
	-12	-11	-10	-9
等間隔	×	△	△	△
	100%	16.2%	0.30%	<0.01%
バースト	×	△	△	△
	100%	70.4%	1.66%	0.02%

3. 研究開発の成果

項目4 試験装置によるRF光変換方式の評価 (平成30年度～令和2年度)

目的：大気の特性格化を与えた際の試作装置の動作評価、将来仕様設定

課題・意義

課題186で製作した試験治具の適用性、改修有無を検討し、試作品の動作評価のコンフィギュレーションを確定する。項目3の結果から試作品に反映するパラメータを抽出し、動作評価時に設定し、大気シミュレータで大気特性を模擬し、機器の動作評価を行い、結果から将来の搭載機器に向けた要求仕様を策定する。

目標：試作品の動作評価、将来への要求仕様書の策定

・平成30年度の実施内容

研究開発項目2で製作した試作装置を利用し、大気シミュレータによる伝搬特性の影響下での動作評価を目的とする中で、課題186で製作した試験治具の改修要否の検討を実施する。

・令和元年度の実施内容

平成30年度の検討結果を受けて、実験計画の検討を実施する。また、課題186で使用した試験治具の改修作業を実施する。

・令和2年度の実施内容

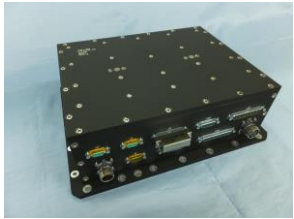
研究開発項目3で取得したデータを利用して試作品にパラメータ設定を行った上で、大気シミュレータによる伝搬特性の影響下での動作の評価を行い、将来の衛星搭載RF光変換装置への要求仕様を反映する。

研究開発成果：

課題186で製作した試験治具の改修要否検討を行い、改修を実施した。

ハードウェアの改修

- HICALIサブシステム構成の変更に伴い、不要なインターフェース回路の削除、関連する内部ケーブルの削除が必要と判断し、改修した。
- ソフトウェアの改修
- ハードウェア改修に伴い、FPGAの未使用I/Oピンの処理、関連する内部処理の変更が必要と判断し、改修した。



課題186で製作した試験治具

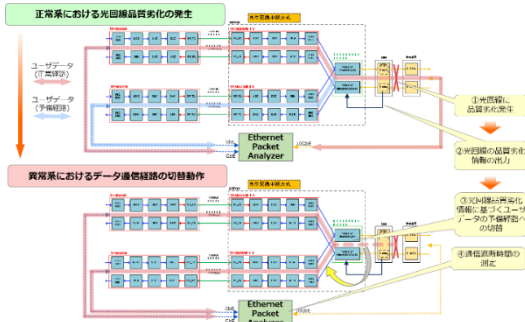
将来のユースケースを想定し、評価項目の検討を実施した。また、衛星搭載品：OTRX(PFM)の開発遅延に伴い、衛星搭載機器相当品：OTRX(BBM)を使用した評価コンフィギュレーションに変更して、特性評価を行った。将来のユースケースを想定し、評価項目の検討を実施した。

経路切替機能評価

光空間シミュレータにより、評価治具の光受信レベルを大気揺らぎパターンにより変化させてデータフォーマット変換機能部の光回線品質情報(OOF:Out of Frame)の切替を発生させ、送出フレーム総数と受信フレーム総数から経路切替動作に伴うフレーム損失量を確認した。

経路切替機能(う回路への切り替え)によりフレーム損失数を大きく低減できることを確認できた。

実装した経路切替機能ではフレーム長が最大の場合、等間隔送信に優位性が見られた。



評価コンフィギュレーションブロック図

得られた知見をもとに、将来の衛星搭載RF 光変換装置への要求仕様を策定した。

評価結果サマリ

フレーム送信間隔		光受信レベル (dBm)※			
		-12	-11	-10	-9
等間隔	経路切替		有り		無し
	フレーム損失率	0.004%	<0.001%	0%	0%
バースト	経路切替		有り		無し
	フレーム損失率	0.003%	0.001%	0%	0%
フレーム送信間隔		光受信レベル (dBm)※			
		-12	-11	-10	-9
等間隔	経路切替		有り		無し
	フレーム損失率	0.003%	0.001%	0%	0%
バースト	経路切替		有り		無し
	フレーム損失率	0.004%	0.002%	0%	0%

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
0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

成果内容

(1) 国内出願

- ・発明の名称 光空間通信システム (出願手続き中)

(2) その他研究発表

- ・37th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC) (那覇(沖縄)、日本/市町村自治会館、発表日2019年9月26日)
An Experimental Study of RF Optical Transformation Function
- ・電子情報通信学会総合大会(オンライン開催)(オンライン開催、発表日2021年3月9日)
RF-光ハイブリッド衛星通信の実現に向けた要素技術の検討

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

NECとしては、静止衛星搭載への活用と観測・通信用低軌道衛星搭載への活用と2つの実証機会を柱に展開を考えている。静止衛星搭載の活用の場合、GEO-GEO間通信とGEO-地上間通信の適用が考えられる。観測・通信用低軌道衛星搭載の活用の場合、データ中継サービスやコンステレーションサービスへの適用が考えられる。

将来的な光通信、RF光変換へのユーザの期待、研究動向を調査した結果、衛星通信ネットワークにおける光通信の伝送レートとしては、以下をターゲットとすることが妥当と判断した。

- ・LEO~GEO通信: 10Gbps × n (複数チャネル化)
- ・GEO~GEO通信: 100Gbps~ (フィードリンクも同様)

これらのターゲットに対しては、今回の研究をベースとして複数チャネル化や高速化などの更なる研究が必要であり、実証機会としては、研究終了後から10年程度先になると想定している。ただし、今回試作するデータフォーマット変換機能部のコアとなる回線品質情報に基づく回線切り替えの方式は基本的な考え方を維持して適用が可能と考える。

GEO-地上間通信については、本研究の成果をベースに、次々期技術試験衛星(10号機)での搭載検証に有効活用できるよう提案活動を行う。

- ・10号機の開発検討 : 2021年度~2025年度
- ・実証機会 : 2031年度以降

観測・通信用低軌道衛星搭載への活用の場合、2022年度以降に複数チャネルで通信速度の異なるサービスの中継サービスや、2022年度以降に商用ベースでコンステレーションの検討を開始する見込みである。速度や遅延時間の異なるサービスの統合システムへの普及や、開始当初は数機でのコンステレーション特有の検証がほとんどと思われるが、これらの衛星の増設過程において、本研究成果を普及させていく予定である。

- ・コンステレーションなどへの適用検討 : 2022年度以降
- ・実証機会 : 2030年度以降