

光空間通信技術の研究開発
The R&D on Optical Free Space Communication Technologies

代表研究責任者 鈴木 良昭 日本電気株式会社

研究開発期間 平成 22 年度～平成 23 年度

【Abstract】

The purpose of this research and development is to establish the technology of high speed optical communication for observed data transmission from satellites/airplanes. In order to transmit the vast amounts of data, RF link is not sufficient to ensure the enough data transmission capacity. However, free space optical communication links through atmosphere usually suffers from the attenuation effect by clouds or precipitation and from atmospheric scintillations. Therefore, a communication system that combines free space optical communication system using plural receiving stations and terrestrial optical networks is proposed and developed.

The key technologies that have been developed in the R&D include novel collaboration protocol technology, digital coherent technology, high speed and highly efficient error correction code, atmospheric fluctuation effect compensation technologies and highly accurate acquisition/tracking control system for the FSO link. The performance and the quality of the total data transmission system were verified using 4km distance FSO link with the transmission capacity of 40Gbps.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 鈴木 良昭（日本電気株式会社 宇宙システム事業部）
- **研究分担者** 福知 清（日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所）
神谷 典史（日本電気株式会社 情報・メディアプロセッシング研究所）
青木 一彦（日本電気株式会社 システム実装研究所）
村田 茂（日本電気株式会社 誘導光電事業部）
- **研究開発期間** 平成 22 年度～平成 23 年度
- **研究開発予算** 総額 929 百万円

（内訳）

平成 22 年度	平成 23 年度 （平成 22 年度補正分）
510 百万円	419 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

近年、災害監視や地球観測への利用等、航空機や衛星等を用いた観測システムが日常生活において重要な役割を担うようになってきた。観測技術の進歩に伴い観測システムのセンサの分解能も向上してきており、また観測画像の分解能が向上すれば観測システムの利用範囲も拡大するためさらなる高分解能化が求められている。しかし、センサの分解能が向上すれば観測画像のデータ量も増大するため、観測データを地上へ迅速に伝送するためには大容量の通信が必要となる。

そこで、観測システムにおいて増大する通信需要に応えるために、電波よりも大容量の通信が可能となる光空間通信技術の研究開発を実施し、航空機や衛星等を用いた観測システムへ利用可能となる 40 ギガビット級の光空間通信技術の確立を目標とする。これにより、災害監視等において従来よりも詳細なデータを迅速に伝送することが可能となり、的確な災害対策等による国民生活の向上、安全で安心して暮らせる社会の実現を図るとともに、光通信分野における我が国の国際競争力の強化に資する。

3 研究開発成果

3.1 光空間通信プロトコルの研究開発

遮蔽物により通信が瞬断された場合には異なる通信路で伝送データを途中から再送信すること等により、エンドーエンドで高効率なデータ伝送を実現する通信プロトコルを確立する。
また大容量通信の瞬断等、光空間通信の特性を再現するエミュレータを開発し通信プロトコルの機能の検証を行う。

3.1.1 課題 1-ア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

光空間伝搬を用いた光空間通信では、雲や雨による光の散乱や吸収、光軸の照準調整による瞬間的な切断など、通信品質が大きく変化するため、既存のトランスポートプロトコルでは十分な性能が発揮できない。このため、光空間通信を利用した高速データ転送を実現するためのプロトコル技術を開発した。開発したプロトコルは以下の 3 つの技術から構成される。

- 1) 光空間通信用トランスポートプロトコル TCP-FSO
- 2) プロトコル中継技術 TCP-Booster・Model-Controller
- 3) プロトコル設定最適化技術 Auto-Tuner

以下、それぞれの成果を説明する。

1) 光空間通信用トランスポートプロトコル TCP-FSO

提案方式 TCP-FSO は、光空間通信の特性を考慮し図 3.1-1 に示す 5 つの機能を持つ。なお、TCP-FSO は一般的な TCP/IP と互換性を持ち、送信側か受信側いずれかが一般的な TCP/IP であっても通信できる。

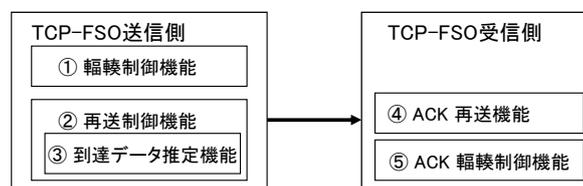


図 3.1-1 TCP-FSO の機能概要

提案機能により、TCP-FSO は光空間通信環境におけるデータ転送性能を大きく改善した。図 3.1-2 は、光空間伝搬エミュレータ（課題 1-イ）を使用し、光空間通信の信号強度（長野県飯田市での実験で取得）を再現し、各種 TCP のデータ転送スループットを比較した結果である。ここで、提案する TCP-FSO（fso）は理想的に転送可能なデータ量の 96.6% に相当するデータ転送に成功した。一方、比較した高速 TCP（illinois）では 31%、一般的な TCP（reno）ではわずか 7% しかデータ転送できなかった。

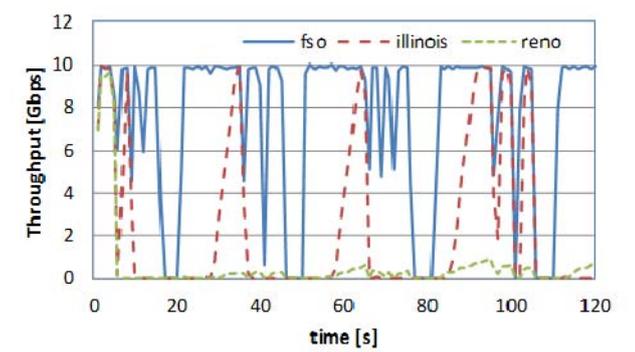


図 3.1-2 TCP-FSO と既存 TCP の通信例（光空間伝搬エミュレータ使用）

さらに、JAXA 大樹航空宇宙実験場における実験（課題 4）ではトラックに搭載した移動局と、地上に設置した地上局間での光空間通信にて、TCP-FSO の実証実験を行い、他の TCP ではデータ転送スループットがほぼ 0 となる場合であっても、TCP-FSO を用いると利用可能な回線帯域に近いデータ転送スループットが得られることを確認した。図 3.1-3 では、移動局を移動させつつ、地上局に向けてデータ転送した時のスループットと、パケットロス率の履歴である。時刻 0~300 では移動局と地上局の距離は約 30m であり、時刻 300 付近からトラックは移動を開始し約 400m の距離まで移動した。実験当時は風があったため、トラック移動前であってもパケットロスが発生しており、その分、スループットが低下した。トラックが移動を開始すると、振動が増加したため、パケットロスが増え、距離が長くなるにつれてパケットロスの発生頻度も上昇した。トラック移動中の平均パケットロス率は 10.2% であった。このように高いパケットロスでは、通常の TCP では通信ができなかったが、TCP-FSO はこの間も平均 6.66Gbps のスループットを達成した。

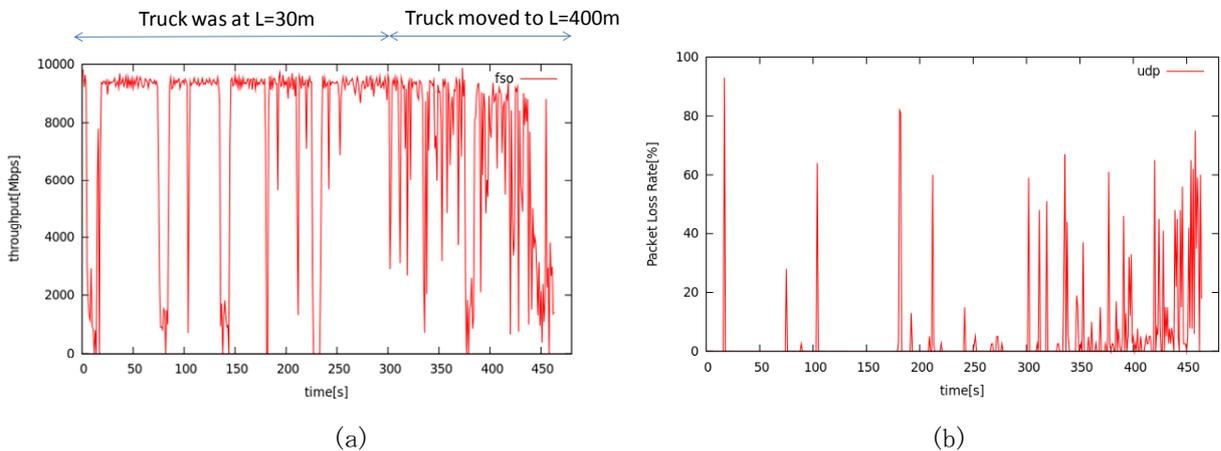


図 3.1-3 移動通信での計測 (a)スループット (b)パケットロス率

2) プロトコル中継技術 TCP-Booster・Model-Controller

光空間通信用のプロトコル中継器を TCP-Booster と呼ぶ。TCP-Booster は端末からの TCP コネクションを終端し、別の TCP コネクションにて後段の TCP-Booster もしくは端末にデータを転送する。TCP-Booster は使用するトランスポートプロトコルがノード間で性能モデルを交換しあい連携協調する機能 (Model-Controller) を有し、転送用のバッファ資源を適切な量に保つ。また、TCP-Booster はハンドオーバー機能を有し、使用中の経路でのデータ転送ができなくなった場合、もしくはスケジュールされた時刻にデータ転送パスを切り替えて通信を継続する。

提案した Model-Controller による性能モデル交換の概要を図 3.1-4 に示す。図 3.1-4 では、複数の TCP-Booster (v_0 から v_n) を使用した例を示している。提案方式では、各 TCP-Booster 間の TCP 区間ごとに達成可能な性能モデル (ローカルモデル) を作成する。続いて、各 TCP-Booster はローカルモデルを交換しあい、データ転送経路全体で達成可能な性能モデル (E2E モデル) を決定する。各 TCP-Booster は隣接する後段の TCP-Booster が持つキュー長 (転送中のデータ量) によって、十分なキュー長がある場合には E2E モデルを使用し通信する。これにより、各区間のスループットが等しくなり、各ノードの平均キュー長を小さくできる。一方、隣接する後段の TCP-Booster が持つキュー長が十分ではない場合はローカルモデルに切り替えて通信する。

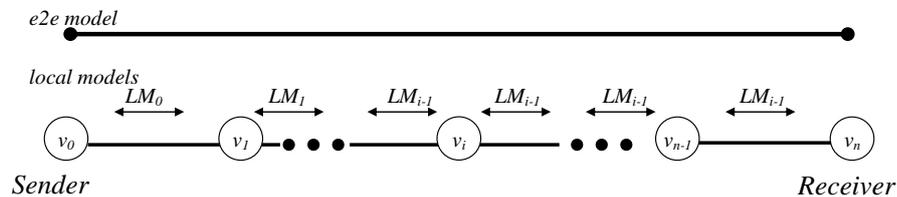


図 3.1-4 ローカルモデルと e2e モデル

提案方式の効果を検証するため、図 3.1-5 に示す構成で実験を行った。実験構成は、移動局から地上局へ光空間通信を用いてデータ転送し、これを陸上の長距離ネットワークを介して陸上拠点まで転送することを想定し、3 台の TCP-Booster と 2 台のネットワークエミュレータを配置した。



図 3.1-5 TCP-Booster・Model-Controller 評価環境

図 3.1-6 には、データ転送のスループット計測例を示す。ここでは、ネットワークエミュレータ 1 に光空間通信を想定したパケットロスを設定し、ネットワークエミュレータ 2 でスループットが 5Gbps に制

限されるよう設定した。図中 fso は TCP-FSO も含む提案方式による結果で、reno は従来方式による結果である。まず図 3.1-6 では TCP-FSO の効果により、スループットが大きく改善し、設定した回線速度とほぼ等しいスループットが得られたことがわかる。次に図 3.1-7 を参照すると、データ転送遅延でも提案方式の方が良い結果が得られたことがわかる。つまり、提案方式では回線帯域にほぼ等しいスループットを達成しつつも、Model-Controller による制御がなされたことで、TCP-Booster に長大なキューが発生することもなく、効率の良い高性能通信が実現できた。

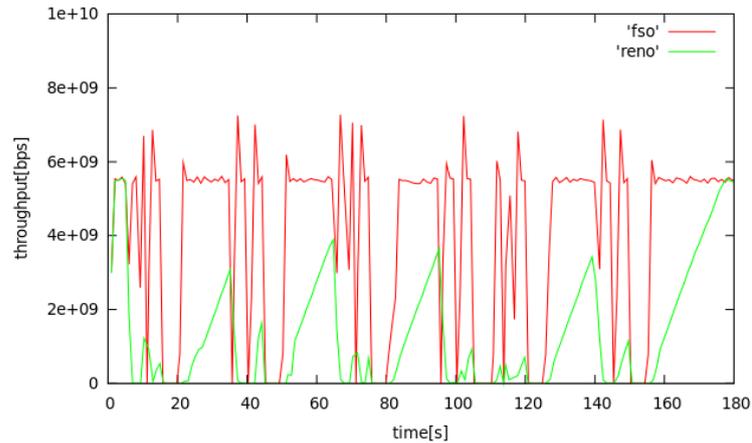


図 3.1-6 提案方式と従来方式のスループット比較

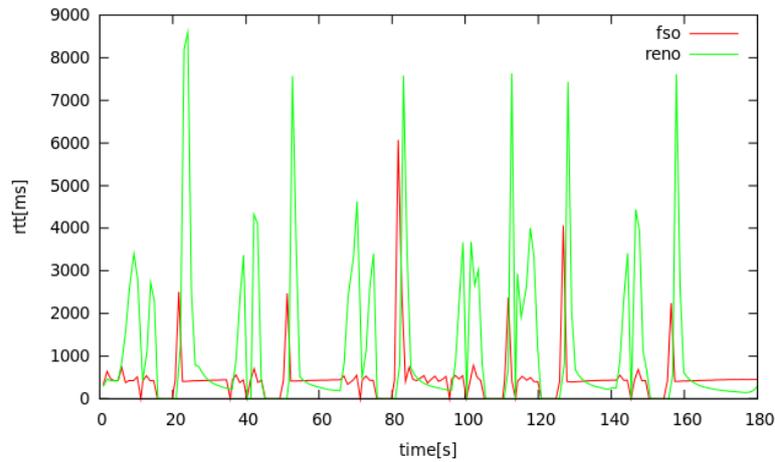


図 3.1-7 提案方式と従来方式のデータ転送遅延比較

TCP-Booster は、通信局が移動したことなどで、データ転送経路が変更になった場合にも通信を継続できるようにハンドオーバー機能を備える。TCP-Booster のハンドオーバーでは、図 3.1-8 に示すように、経由する TCP-Booster を変更することで、経由するネットワークを切り替える。TCP-Booster は設定よりも長く通信が不通となった場合、もしくは、設定時刻になった場合にハンドオーバーの処理を開始する。

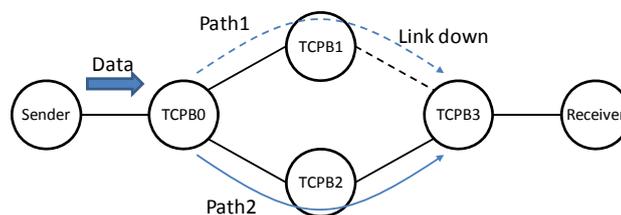


図 3.1-8 ハンドオーバーの概要

ハンドオーバー時の動作例を図 3.1-9 に示す。ここでは、図 3.1-8 に示すネットワーク構成にて、通信開始から 10 秒おきに利用可能な経路が切り替わるようにした。TCP-Booster は 1 秒間データ転送が不通となるとハンドオーバーするように設定されており、図 3.1-9 の結果は所望の動作が得られた。

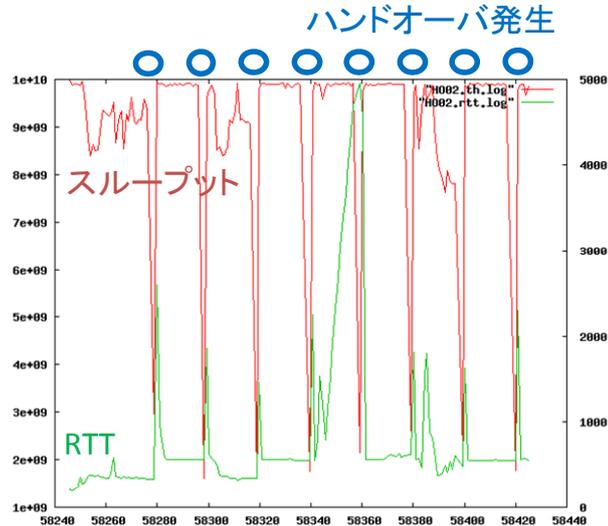


図 3.1-9 ハンドオーバー動作時のスループットと RTT

3) プロトコル設定最適化技術 Auto-Tuner

Auto-Tuner は TCP-Booster の TCP パラメタ設定を最適化する自動設定機能である。初期最適化と動的最適化の 2 つの最適化機能を有する。

初期最適化では TCP/IP データ転送をモデル化し、このモデルに基づき TCP/IP のバッファ資源を調整しつつ性能計測を繰り返し、高いスループットを発揮し、かつ転送遅延が小さくなる設定を発見する。提案方式では、2 つの探索方法を使用しており、まず 2 分探索にて大まかにパラメタ設定範囲を絞り込んだ後、山登り法にて微調整をする。これにより、全探索では $O(n^2)$ となるのに対し、提案方式は $O(n)$ の探索回数で最適なパラメタ組み合わせを発見する（ただし、 n はパラメタ設定の分解能）。

図 3.1-10 では、TCP 層のバッファ（ソケットバッファ）と IP 層のバッファ（Txqueue）を変化させつつスループットが最大化する設定を発見する様子を示している。図 3.1-10(a)を参照すると提案方式は、最初に大まかにパラメタの設定範囲を絞り込んでおり、狭い範囲を集中的に探索している様子がわかる。図 3.1-10(b)はスループットが縦軸となるよう回転させた図であるが、これを見ると、スループットが高い範囲を集中的に探索していることがわかる。このように提案方式は効果的に最適性の高いパラメタを発見できた。

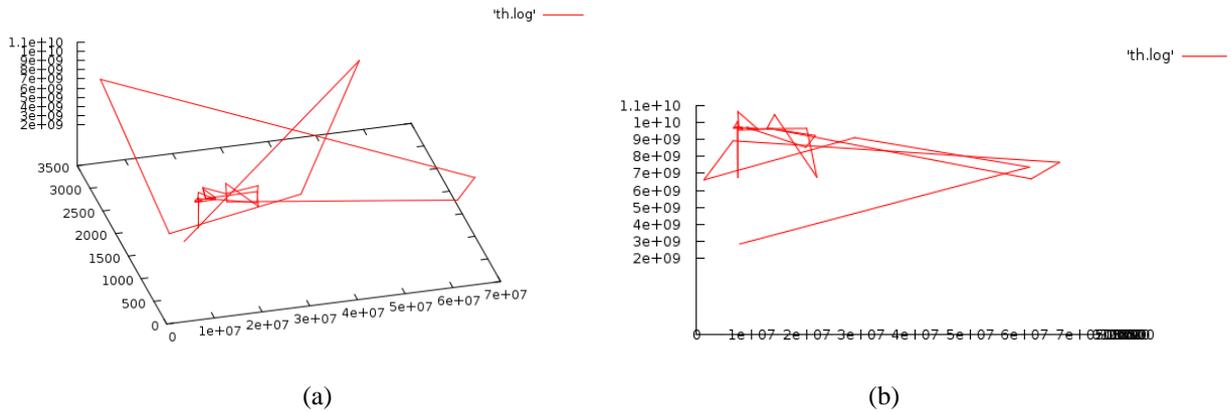


図 3.1-10 AutoTuner のパラメタ探索例

(a)ソケットバッファ、Txqueue とスループット(b)Y 軸方向から

動的最適化では、動作中にネットワークで使用できる回線帯域が変化した場合などにパラメタを調整し最適化を図る。提案方式はパラメタとスループットの関係性をモデル化しており、現状のスループットとターゲットとするスループットの差からパラメタの変更を決定する。図 3.1-11 には、最適値よりも小さなパラメタで通信を開始し、通信中に動的最適化によってスループットと RTT が調整される様子を示す。図 3.1-11(a)では、AutoTuner によるパラメタ調整によってスループットの上昇していき回線帯域にほぼ等しくなった様子がわかる。なお、使用した TCP-FSO は通常はパラメタ（バッファサイズ）が一定であればスループットも一定であり、スループットの上昇は AutoTuner によるものである。同様に図 3.1-11(b)では、バッファサイズが最適化されたことでスループットが上昇し、データ転送遅延も最適化された。

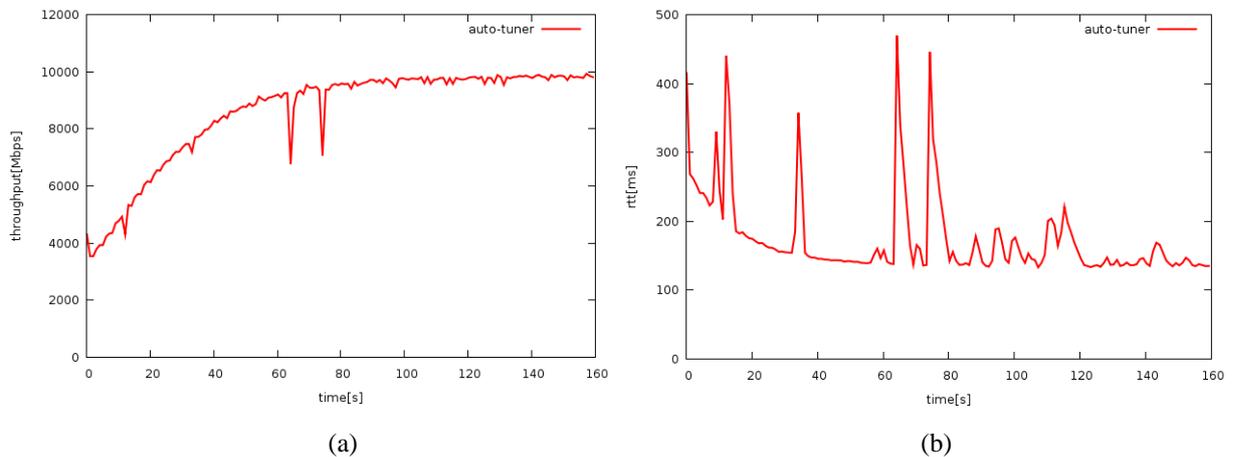


図 3.1-11 AutoTuner の動的パラメタ調整例 (a)スループット (b)RTT

3. 1. 2 課題 1-イ 光空間通信プロトコル検証向け伝搬エミュレーション技術の研究開発

大容量通信の瞬断等、光空間通信の特性を再現するための、光空間伝搬エミュレータを開発した。光空間伝搬エミュレータは、空間伝搬で生じる光強度の変動を、光通信システムの評価を容易とする光ファイバインターフェースを持つデバイスで実現するものである。

まず、この光空間伝搬エミュレータに必要な特性を調査し、強度の変動速度 100KHz、強度の変動再現精度 0.1dB を目標として定めた。続いて、目標の性能となる光ファイバインターフェースでの光強度

変動を与えるデバイスとして、可変アッテネータデバイスを用い、アッテネータデバイスの制御回路と合わせて、可搬筐体実装したものを開発した。レベル制御においては、入出力の光レベルを双方モニタし、ADコンバータでデジタル変換後、信号処理することにより、可変アッテネータの減衰量を高精度に制御し、0.1dBの精度を実現した。さらに、可変アッテネータデバイスの損失量の温度依存性により高速制御が困難になるという課題に対して、デバイスに対して温度補償制御を加えることで、動作の安定化と、レベル制御の高速化を可能としている。開発したデバイスを、空間伝搬を模擬する強度変化波形で駆動した結果、高速のレベル変動波形を0.1dB精度で再現することに成功した。(図3.1-12)

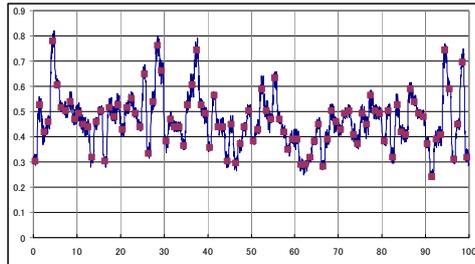


図 3.1-12 エミュレータにより再現した光レベル変動波形

このエミュレータを用いて、プロトコル装置間の通信実験システムにおける光送受信部間のレベルを所定の波形で変動させて、プロトコル装置間のフレーム伝達特性を評価した。評価の結果、光受信部の誤り訂正限界のレベル以下となる大きな減衰が生じたところで、大容量伝送に用いられるUDPフレームのエラーが生じるという、正常な動作を行った。以上の結果より、開発した光空間伝搬エミュレータによりプロトコル検証が可能であることが示された。

続いて、エミュレータにより、より高速のMHzクラスとなる強度変動速度を実現する手法を検討した。高速強度変動のためには、光ファイバ通信で用いられる高速変調器が必要であるが、偏光依存性により特定の変更信号にしか強度変換が与えられないという問題が生じる。加えて、高速のレベル変動をエミュレーションできたとしても、システム評価を行う場合レベル変動補償のための高速EDFAが必要であるという問題もある。これらの問題を解決する方法として、システムの特性を決定する光雑音のレベルを変動させる空間伝搬エミュレーション方式を提案し、系の構築と評価を行った。実験の結果、ASE光のレベルを矩形波、三角波、正弦波、ランプ波など様々に変え、変動周波数を最大1MHzまで変えながら特性を測定したところ、符号誤り率は理論通りの変動を行うことを確認し、システムエミュレーションが正常に動作することを確認した。この結果により、本エミュレーション方法を用いることで、MHzクラス以上で高速に変動する光空間伝搬エミュレーションが可能であることを示した。

3. 2 課題2 光空間通信方式の研究開発

大気ゆらぎ存在下における光の伝搬特性についてデータ収集を行いモデル化した上で、大容量通信に適した誤り訂正方式や、変調方式等を選択し開発し、航空機等の移動体との40ギガビット以上の通信速度を実現できる光空間通信方式を確立する。

3つの研究課題である、課題2-ア 光空間通信用光伝送方式の研究開発、課題2-イ 光空間通信実証用光送受信機技術の研究開発、課題2-ウ 光空間通信の大気揺らぎモデル化技術の研究開発を進めることにより、上記目標を達成した。

大気揺らぎ存在下における光の伝搬特性のモデル化に関しては、OICETS 光通信実験のデータ収集および分析を行った。受光量（受信強度）のヒストグラム化により時間的な平均と分散を求め、シンチレーションインデックスの決定と大気ゆらぎの周波数応答を明らかにした。この分析結果に基づいて得られる揺らぎスペクトルを、von Karman spectrum 解析モデルに適用した。続いて、本モデルを用いた数値計算結果により得られる時系列データが、そのヒストグラム及び周波数特性が実際の光の伝搬特性データを忠実に再現できることを光通信エミュレータによる実験を通して確認し、大気揺らぎのモデル化の妥当性を示した。

大容量通信に適した誤り訂正方式として、ネットコーディングゲインの向上と高スループット化の両立を目指して、低密度パリティ検査符号をベースとした軟判定FEC方式を誤り訂正方式として採用した。採用方式のエンコーダ・デコーダを効率的にハードウェア上に実現するアーキテクチャを設計し、回路を開発した。開発回路を用いた実時間測定により、10dB超のネットコーディングゲインと40ギガビットのスループットが達成可能であることを確認した。

続いて、大容量通信に適した変調方式として、コヒーレント光受信技術とデジタル信号処理技術を組み合わせた単一偏波QPSK変調方式デジタルコヒーレント方式を採用した。本方式は、大きな損失を有する経路においても高い受信性能を実現し、高速信号の受信に適するものである。この変調方式による特性を検証するために、最大値20%の誤り訂正オーバーヘッドを考慮した50ギガビットの単一偏波QPSK光信号の光空間伝送システムを開発した。併せて、大気揺らぎによる変動振幅20dB以上、変動速度1kHz以上の光レベル変動を補償する光レベル変動制御技術を開発した。開発した技術を用い、50ギガビットの通信速度における平均受信感度を実測し、-44dBmという優れた値を得た。これは、航空機などの移動体との光空間通信に必要な40kmでの伝送を可能とする値である。また、開発した誤り訂正符号、変調方式を用いた光空間伝送システムを構築し、固定局-移動体間通信において、誤り訂正後エラーフリーとなる良好な特性を確認した。これにより、移動体との40ギガビット光空間通信が可能であることが示された。以上の成果により、光空間通信方式を確立した。以下に、成果の詳細を述べる。

3. 2. 1 課題2-ア 光空間通信用光伝送方式の研究開発

本研究課題では、航空機や衛星等を用いた観測システムと地上局間の光空間通信リンクにおいて、大気揺らぎ存在下における光波伝搬モデルに基づいた光空間通信リンクのロスバジェットを策定した。さらに、そのロスバジェットを実現する光変復調方式、および誤り訂正方式を明らかにし、その有効性を検証するために、静止、移動体を含めた光空間伝搬実証実験を行った。

(1) 光変復調方式の研究開発

光変復調方式の研究開発に関しては、大きな損失を有する経路においても高い受信性能を実現し、高速信号の受信に適するコヒーレント光受信技術とデジタル信号処理技術を組み合わせたデジタルコヒーレント方式を検討した。具体的には、40Gbps 超のスループットを実現するコヒーレント変調方式について、単一偏波による伝送方式が有利であることを示した。これは、光空間伝送が空間の上り・下りで空間を共有する際に問題となる送受信間のクロストークによる劣化を回避するのに有効なためである。また、変調方式としては、4 値位相変調方式 (QPSK) を選択した。その理由は、受信感度が各種変調方式の中で最も高いためである。さらに、同等の感度性能を有する 2 値位相変調方式 (BPSK) に比べて、アナログデバイスに必要な帯域が半分でよいことも理由である。QPSK の単一偏波信号伝送においては、偏波追尾された信号の出力に対して、QPSK 信号を高性能に復調するアルゴリズムを検討し、シミュレーションによりその動作を確認した。また、方式検証のために、誤り訂正での付加情報量の最大値 20% を考慮した単一偏波 QPSK 光信号の発生装置と、コヒーレント受信評価装置をそれぞれ構築した。これらを用いて、光送受信、並びに受信評価装置にて取得した波形に対して、最大比合成などを含むアルゴリズムをオフライン信号処理することによって、平均受信感度-44dBm 以下においてエラーフリーを実現できることを確認した。この性能は、7 photons/bit (@ 40Gbps) と極めて高感度な特性であった (図 3.2-1)。

一方、単一偏波 QPSK コヒーレント受信のリアルタイムデジタル信号処理に向けては、デジタル信号処理による偏波の再合成を安定化する最大比合成法 (MRC : Maximum Ratio Combining) アルゴリズムの新規提案と、それを実装したデジタルコヒーレント受信検証プラットフォームを開発し、従来の MRC 方式で課題であった偏光角 45° 近傍の入射信号光に対する安定な信号処理を、本提案アルゴリズムにより実現可能とした。これらのコヒーレント受信器の中心機能となるデジタル信号処理を有する評価システムを用いて、リアルタイムデジタルコヒーレント受信における感度-40dBm 以下を実現した。

さらに、実際の天気ゆらぎ条件下での伝搬実証実験として、光空間評価システムにおける QPSK 変調方式およびデジタルコヒーレント受信方式を用いた実証実験を実施した。実施においては、課題 3、4 との連携を図りながら、まず、室内 (4m) での光アンテナと組合せた伝送系で、光ファイバ系と同等の誤り率特性が得られることを確認し、光アンテナの光ファイバ結合による光学部での性能劣化がないことを確認した。続いて、3つの屋外実証実験、①50m固定局光空間伝送実証実験、②4,000m固定局間伝送実証実験、さらに、③移動体を用いた空間伝搬実証実験を実施した。実証実験①では、光空間伝送システムの受信感度よりも大きい平均受信光パワーが安定して得られることが確認でき、エラーフリー伝送が可能であることを示した。実証実験②では長い伝送距離であるため、天気ゆらぎにより 20dB を超える光レベル変動が存在することが確認された。このような天気揺らぎ存在下でも、最小受信感度よりも大きい平均受信光パワーを得ることができ、4,000m光空間伝送での通信遮断率 18%以下を確認した。実証実験③では、移動局を地上固定局から遠ざける方向に移動させて光空間伝送を行い、取得した受信データを誤り訂正処理することで、全データのエラーフリー伝送を確認した。以上の成果により、陸上移動体において 40 ギガビットの通信速度を実現できる光空間通信が可能であることを実証した。

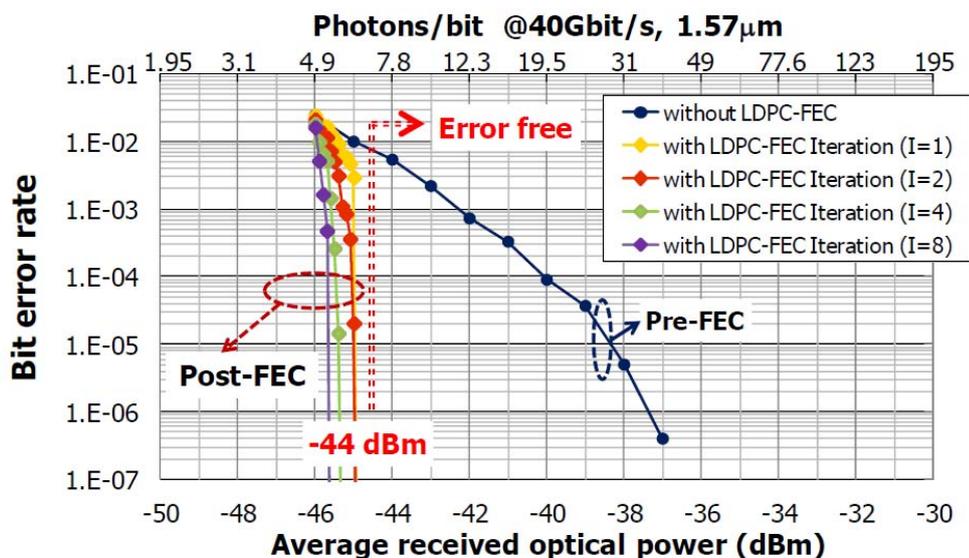


図 3.2-1 誤り符号を使用した場合の光空間評価システムの特性

(2) 高性能誤り訂正方式の研究開発

高性能誤り訂正方式の研究開発に関しては、ネットコーディングゲイン (Net Coding Gain ; NCG) の向上と高スループット化の両立を目指して、低密度パリティ検査符号 (Low-Density Parity-Check Code ; LDPC 符号) をベースとした軟判定 (Soft-Decision ; SD) FEC 方式の開発を行い、FPGA をターゲットとしたハードウェア実装及び、シミュレーションとオフライン光伝送実験による誤り率特性評価を通して、その有効性を検証した。

誤り訂正処理の単位となる伝送フレームのフォーマットは、陸上の光通信系で標準的に採用されている OTU (Optical channel Transport Unit) フレームとの整合を考慮し、ペイロード 3824 バイト (制御用ヘッダ信号 16 バイトを含む) を単位として、符号化処理のための冗長データを付加する形とした。ペイロードに対する冗長データの比率であるオーバーヘッド (OH) に関しては、それを大きく設定することでコーディングゲインの向上を見込める一方で、必要伝送レートの増大及び、エンコード/デコード処理に要する計算量の増大を招くため、双方のバランスを考慮して設定した。誤り率 10^{-12} において 10 dB 超の NCG を達成するため、理論限界から 1.0~1.5 dB 程度のマージンをとって OH を 20% と設定するのが妥当と考え、この条件の下で開発を行った。今回開発した SD-FEC 方式は、LDPC 技術をベースとして新規に構成した符号と、それに加え、エラーフロア対策として BCH (Bose Chaudhuri Hocquenghem) 符号を使用した 2 段階の FEC 方式を採用している。下図に示したように、3824 バイトのペイロードに対して、BCH と LDPC による冗長データ数は各々 20 バイト (約 0.5%)、744 バイト (約 19.5%) とした。

基本方式の開発に加えて、エンコーダ・デコーダに関する効率的なハードウェアアーキテクチャについて検討を行い、FPGA デバイス上に実装することで実現可能性の検証を行うと共に、FPGA シミュレーションを通して誤り率特性の評価を行った。結果として、誤り率 10^{-12} において $NCG \geq 10.4\text{dB}$ の達成を確認できた。これは標準的な RS (255,239) と比較して 5dB 程度の改善であり、ITU-T G.975.1 中の代表的な FEC と比較しても 2dB 以上の改善を達成している。エラーフロアは観測されておらず、下図に示した通り、誤り率 10^{-15} では 11.3dB 以上の利得が期待できる。上記の達成可能な NCG の数値

は LDPC に関する最大復号繰り返し回数 (I_{\max}) に依存するが、当初目標であった誤り率 10^{-12} において $\text{NCG} \geq 10\text{dB}$ を達成するには $I_{\max} = 4$ 回で十分であった。尚、この場合のシミュレーション速度は約 10Gbps である。シミュレーション評価に加え、スループット 40Gbps (チャンネルレート 50Gbps) を達成する SD-FEC エンコーダ FPGA ボードを開発し、光送信器と合わせて、実際の光伝送路 (光ファイバ・光空間) を通したオフライン光伝送実験を実施し、シミュレーション評価とよく整合することを確認した。

以上のように、SD-FEC 方式開発を通して、 10dB 超のネットコーディングゲインとギガビット毎秒級のスループットを達成可能な誤り訂正符号化技術を確立した。

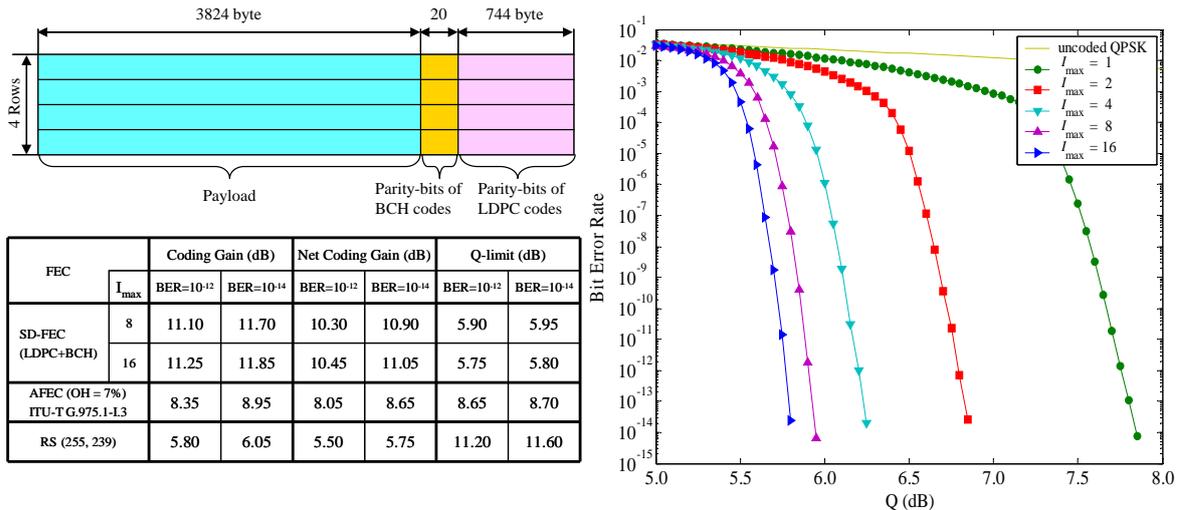


図 3.2-2 FEC フレームフォーマット及び誤り率特性評価シミュレーション結果

3. 2. 2 課題 2-イ 光空間通信実証用光送受信機技術の研究開発

本課題では、光空間通信方式の性能を実証するための光送受信機技術に関する 2 つの課題に関する研究開発を行った。具体的には、第 1 の課題として、通信実証実験環境に耐えうる光送受信部の実装技術の開発を行った。次に、第 2 の課題として、移動体-地上局間で問題となる光信号のレベル変動の影響に対応する、レベル変動制御技術の開発を行った。

(1) 通信実証実験環境に耐えうる光送受信部の実装技術の研究開発

実装技術に関する研究開発においては、主に熱/振動/衝撃関連のシミュレーション条件の確認とシミュレーションモデル化を実施した。具体的には、移動体としてガルフストリーム II 型級の航空機の室内温度、湿度環境を想定し、光送信器に搭載される光デバイスや電子デバイスの冷却条件について、熱抵抗に基づくシミュレーションを行い、デバイスの冷却実装条件を明らかにした。次に、航空機搭載時に印加される加速度、振動に関して、航空機の振動条件を想定したデータに基づいて、懸念される基板の撓みへの応力に耐える補強方式や、光ファイバのコネクタ部・電気回路部分の調整部分等への応力に耐える補強方式を明らかにした。

また、実証実現の加速を目的として、より加速度や移動条件の面で厳しい地上移動体に搭載した場合での実証を実現するために、軽量化の実装及び、耐振動実装を行った。小型軽量化という実装条件を踏まえて、光送受信部では、 10Gbps インターフェースを備えた 40Gbps 単一偏波 DQPSK 変調方式の光送受信部を開発を行った。理由は、プロトコル検証に必要な 10Gbps インターフェースの提供と、 40 ギガ

ビット以上の単一偏波 DQPSK 伝送が同時に実現できるためである。これにより、光通信部だけでなく、プロトコル部を含めた移動環境における評価を可能とした。

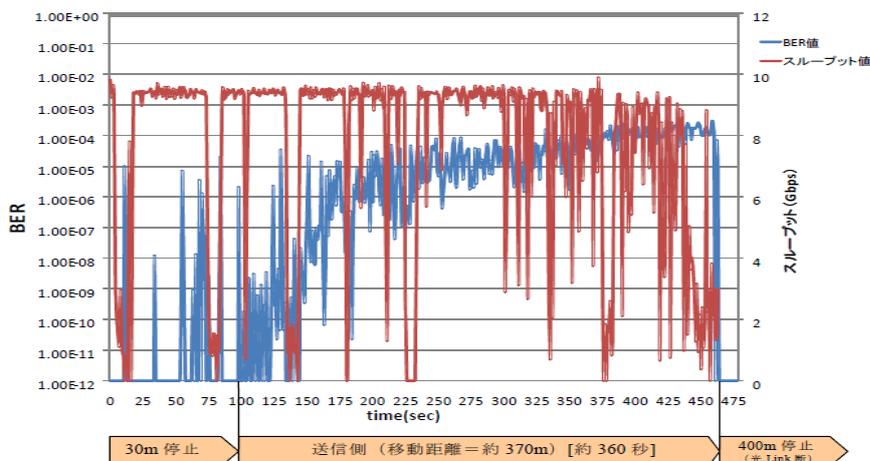


図 3.2-3 移動体での伝送実験における BER 変動およびスループット変動

次に、移動体-固定局間の移動伝送において、送信側を移動させてアンテナ間距離を徐々に延ばし、光リンクが切断されるまで送信側装置を移動させて BER を評価し、信号導通が可能であることを確認した (図 3.2-3)。一部、信号遮断となっている個所は、レベルの急激な低下に起因するが、所定のレベル以上の信号はすべて受信できている。この結果により、移動体に搭載可能な 40Gbps (誤り訂正用訂正領域を含めた伝送レート：43~50Gbps) スループット光送受信機の開発を示した。

(2) レベル変動制御技術

大気揺らぎによる光信号の変動に強い光送受信機を実現するため、受信光パワーのレベル変動制御技術を開発した。光レベル変動振幅 20dB 以上、速度 1kHz 以上に対して、レベル補償可能であることを確認した。この条件は、「きらり」光地上局実験の結果として報告されている受光レベル変動量 (振幅：10 dBp-p~最大 15 dBp-p、周波数スペクトル：~1kHz) を参考に設定した値である。

高速変動する光レベルを補償するために、変動制御技術の方式として、EDFA (Erbium-Doped optical Fiber amplifier) をカスケード接続する方式を採用した。初段 EDFA は、利得 40dB 以上かつ雑音指数 4dB という特性を持たせ、広いダイナミックレンジを確保した。続いて、初段と 2 段目の EDFA 間に、狭帯域フィルタと高速レベル制御器を設けた。高速レベル制御器として、音響式可変アッテネータ (AO-VOA: Acousto-optic Variable optical Attenuator) と電気式 VOA のカスケード接続構成とした。AO-VOA をフィードフォワード制御することにより高速かつ広いダイナミックレンジの制御を可能とした。また、後段の電気 VOA をフィードバック制御する構成とし、精密な光レベル制御を実現した。

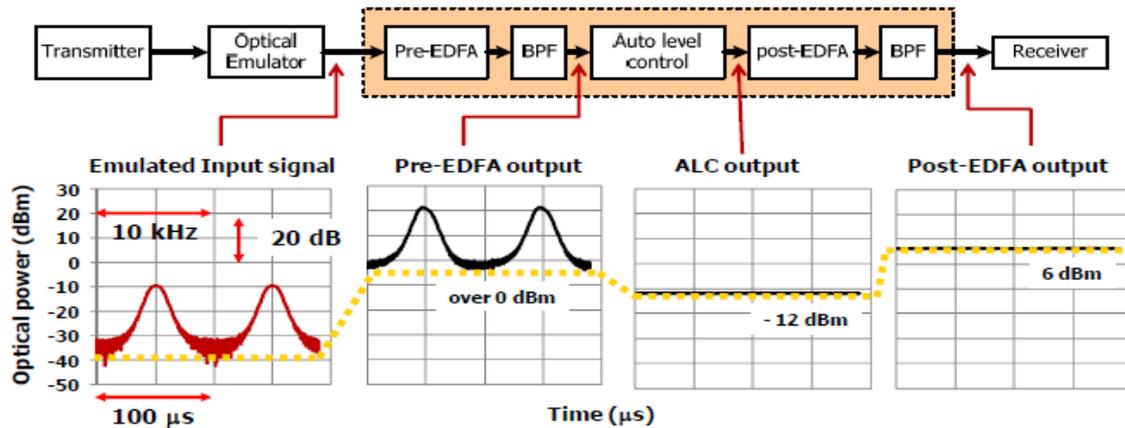


図 3.2-4 レベル変動制御の構成と動的評価結果

開発したレベル変動制御システムに、変動値 25dB かつ変動速度 10kHz の強度変動信号を入射したところ、システム出力（Post-EDFA output）において、出力が一定になっていることが確認できた（図 3.2-4）。さらに、出力信号をコヒーレント受信し、受信劣化が殆どないことも確認した。これらの結果により、本技術を適用することによって、強度レベル変動幅 20dB 以上、変動速度 10kHz 以上のレベル変動した光信号の安定受信を実現した。

3. 2. 3 課題 2-ウ 光空間通信の大気揺らぎモデル化技術の研究開発

本課題では、大気揺らぎ存在下における光の伝搬特性についてデータ収集を行い、モデル化を行った。航空機等の飛行体、周回衛星からの地上局への伝送においては、大気揺らぎによる地上局での受信強度の揺らぎなどの把握が通信方式を検討する上で重要である。モデル化により、方式検討に有効な通信回線シミュレーションのための大気揺らぎによる信号レベル変動の時系列データを生成することが可能となった。

まず、光の伝搬特性について、過去の実験データとして OICETS 光通信実験のデータを収集分析した。周回衛星である OICETS は静止衛星であるデータ中継衛星とのデータとともに、OICETS から地上局（光地上局）の光通信実験の地上局での光受光量データが所持されている。受光量（受信強度）のヒストグラム化により受光量の時間的な平均と分散を求め、シンチレーションインデックスを決定するとともにデータのスペクトルから揺らぎのカットオフ周波数を求めた（カットオフ周波数は約 1～3 kHz である）。

次に、求めたシンチレーションインデックスとカットオフ周波数を用いて、対数正規乱数時系データ列をボックス・ミュラ法により計算機上で発生させた。続いて、発生させたデータ列を光通信エミュレータで模擬することにより、大気揺らぎによる受信強度の変動を簡易に再現できることを確認した。光空間伝搬特性を模擬した光通信信号でエミュレーション実験が可能になることにより、光通信のデータ検出系、AGC 系、追尾系、空間伝送に適した変復調方式、データ構造、誤り訂正方式の研究への活用が可能となった。

さらに、上記大気揺らぎの周波数特性を単純なカットオフフィルタとせず、伝搬路での揺らぎのスペクトルを解析モデルによって生成する方法（von Karman spectrum）を用い、このスペクトル特性を使って上述の対数正規時系列をフィルタリングする方法を採用した。図 3.2-5 に解析モデルを用いた大気揺らぎのモデル化の概要とそれを用いた通信回線シミュレーションの構成を示す。この結果、ヒストグ

ラム及び周波数特性がより良く実際のデータを再現する時系列データの生成が可能な大気揺らぎのモデル化を行うことが可能となった。

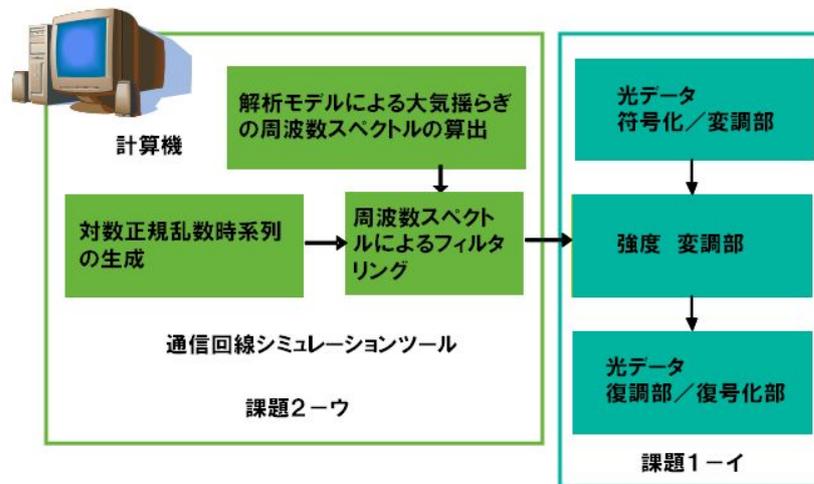


図 3.2-5 解析モデルを用いた大気揺らぎのモデル化と通信回線シミュレーション

今回の提案手法によるシミュレーションのために必要なパラメータは、シンチレーションインデックス、RMS 擬似風速、受信開口径及び、大気構造を示すインナースケール、アウトースケールである。

課題 4 で 4,000 m の伝搬距離での伝搬データから得られたパラメータ（受信開口径：10 cm、シンチレーションインデックス：0.15、RMS 擬似風速：5m/s、インナースケール：4 mm、アウトースケール：50cm）を用い、時系列データを生成した例を図 3.2-6 に示す。

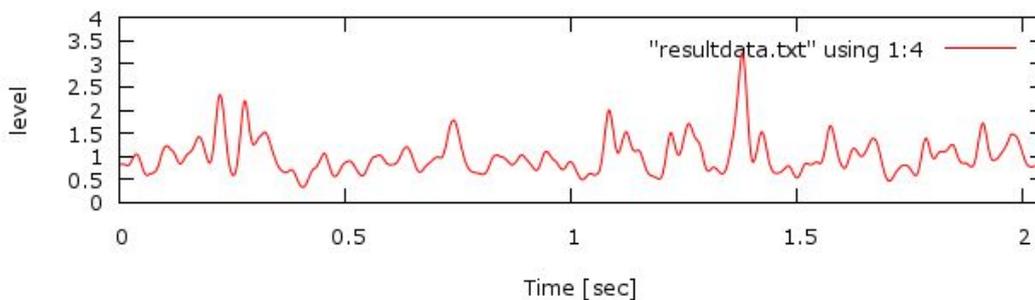


図 3.2-6 大気揺らぎを受けた受信信号のシミュレーション時系列の例

実際の伝搬データと比べて、制御系による揺らぎ成分である高い周波数成分が除かれているが、大気の揺らぎによる変動を十分再現することが確認できた。

3. 3 課題 3 移動体光通信技術の研究開発

航空機等の移動体との光空間通信においても、(2) で得られる光の伝搬特性のモデルに航空機等の飛行により発生する乱流等の影響を加えてモデルを修正した上で、光ビームを正確に制御し、安定な通信回線を形成・維持するために必要となる高精度な補足・追尾技術等を確立する。

3. 3. 1 課題 3-ア 広角小型精捕捉追尾技術の研究開発

移動体光空間通信システム向け精捕捉追尾機構（FPM）の研究開発を行った。FPM はレーザ光の指向方向を高精度に制御するデバイスであり、FPM の性能が光空間通信システム全体の性能を左右する。本研究開発プロジェクトでは、「駆動範囲 $\pm 4^\circ$ 」「制御帯域 300Hz」「移動体光空間通信実験機器への搭載」を開発の第1目標とした。さらに「光学式角度検出方式の確立と本方式による FPM 指向制御」を開発の第2目標とした。

それぞれの目標に対する開発成果は以下の通りである。

「駆動範囲 $\pm 4^\circ$ 」：まず、NEC 社内の R&D 成果をベースにしたムービングマグネットボイスコイル FPM を試作した。評価の結果、広角駆動の際に、コイルの温度上昇及び、発生トルクの低下が顕著であり、広角駆動を妨げていることが確認された。それぞれの課題に対して、対策を試み、コイルの発生熱はボビンの熱伝導の改善、発生トルクの低下が磁気回路の改良により改善した。改善後は、 $\pm 4.5^\circ$ の安定駆動が確認された。改善 FPM は、移動体光空間通信実験機器に搭載し、光通信実験に活用した。

「制御帯域 300 Hz」：測定結果を基にモデル化された FPM 伝達関数を取り込み、ロバスト型 PID 位相補償制御系を構築した。本制御系により、渦電流型変位センサ出力による角度制御で 300Hz 以上を確認した。

「移動体光空間通信実験機器への搭載」：FPM を航空機等に搭載した際、航空機自身の加速や乱気流による飛行乱れにより、FPM ミラーが光軸方向に振動する。FPM ミラーの振動は光軸の乱れを誘発し、指向安定性が低下する。そこで、FPM ドライバと制御系を、2 軸の角度制御だけでなく、1 軸の並進制御を加えるように改善した。並進制御の周波数帯域は 100Hz であり、航空機の飛行乱れに十分対応できる。改善 FPM ドライバと制御系は、移動体光空間通信実験機器に搭載し、光通信実験に活用した。

「光学式角度検出方式の確立と本方式による FPM 指向制御」：従来の FPM で採用の渦電流型変位センサに代わる光学式角度検出方式を設計し、試作評価した。本方式は、2 次元位置検出素子（PSD）、偏光ビームスプリッタ、レンズ、レーザを使用し、また、PSD アンプ・演算回路やレーザドライバ回路を要する。回路基板まで含めた FPM サイズは 48 mm × 48 mm × 50 mm である。光学式角度検出方式では、 $\pm 4.5^\circ$ 以上の角度を線形で検出可能であり、従来の渦電流型変位センサ（線形範囲 $\pm 1^\circ$ 以内）に比べて改善が見込まれる。さらに、本方式で角度制御系を構築し、制御帯域 300Hz 以上を確認した。

3. 3. 2 課題 3-イ 移動体光通信用波面補償技術の研究開発

乱流や大気揺らぎ等の外乱による光ビームの波面の乱れを抑制し、光空間通信リンクを安定化させる波面補償技術の確立に向けて研究開発を行った。大気揺らぎのもつ 1kHz 程度の周波数スペクトルの補償には、それと同等の制御帯域が必要となるため、応答周波数としては制御帯域の 10 倍にあたる 10kHz を、また波面精度としては $\lambda/10$ を目標とした。

まず、波面補償システムの要素技術の検討を行い、10kHz クラスの応答周波数を有する波面センサ、可変形鏡、波面補償コントローラを設計し、試作した各サブシステムを動作実証した。波面センサは、通信波長帯に受光感度を有する InGaAs エリアセンサにマイクロレンズアレイを組み合わせたシャックハルトマン方式の波面センサを試作した。可変形鏡は、静電容量型 MEMS 可変形鏡を採用し、波面補償コントローラは、FPGA とエンベデッドプロセッサを組み合わせた高速波面補償演算回路を試作した。

次に、試作したサブシステムを統合して波面補償システムを構築し、補正周波数 11.2kHz で波面データの取得と可変形鏡形状の更新が行えることを確認した。波面センサ受光から波面補償コントローラ出力までの時間遅れは約 1 サンプルである。また、波面誤差の減少に伴って光ファイバ結合効率が増加し、

波面精度 $\lambda/10$ を十分に達成していることを確認した。

さらに、統合した波面補償システムを地上局の捕捉追尾端末に組み込み、長距離対向実験と移動体実験の2つの屋外実験において、静的な波面補正を行い、光ファイバ結合効率が改善した結果、両実験とも平均受信パワーで7~8dBの向上を確認した。光ファイバ結合効率を最大化する波面を自動的に探索する手法を開発し、受信パワー変動の大きい屋外実験においても、最適波面の自動探索が収束し、手動による探索と同程度の平均受信パワーが得られることを確認した。また、波面補償の動的フィードバック制御による外乱の圧縮特性を評価し、500Hz以下の周波数領域において波面外乱を補正できることを確認した。

以上の成果により、大気揺らぎ等の外乱の影響下においても光空間通信を高安定に実現するための波面補償技術を確立できた。

3. 3. 3 課題3-U 協調制御を用いた高速捕捉追尾技術の研究開発

移動体光通信においては、航空機等の動揺による指向角変動に対して高精度に補償可能とする高速捕捉追尾技術の実現が必須となる。本課題では、制御対象の動特性や構造モデルなどを用いて互いの動きを予測し協調させるモデルベース協調制御による光アンテナの高速高精度制御技術を確立した。また、導出したモデルベース協調制御を実現するため、移動体への搭載が可能な2種類の高速2軸ジンバルを開発した。さらに、大気揺らぎによる受光レベル変動がある場合でも、安定したフィードバック制御の維持を可能とする光センサ技術を構築した。

(1) モデルベース協調制御方式

光ビームを正確に制御し、高精度捕捉追尾を達成するため、粗制御機構と精制御機構の組み合わせによるモデルベース協調制御方式を導入した。本システムにおいて、粗制御機構は新規に開発した高速2軸ジンバル(2軸ジンバル)であり、精制御機構はNECで独自開発したFine Pointing Mechanism(FPM)の改良版である。協調制御系では、この2軸ジンバルとFPMに対しそれぞれ同期化と制御帯域のオーバーラップという評価量で最適化した「2軸ジンバルコントローラ」と「FPMコントローラ」とを組み合わせ、「運動学的」ならびに「動力的」な干渉を補償可能としている。

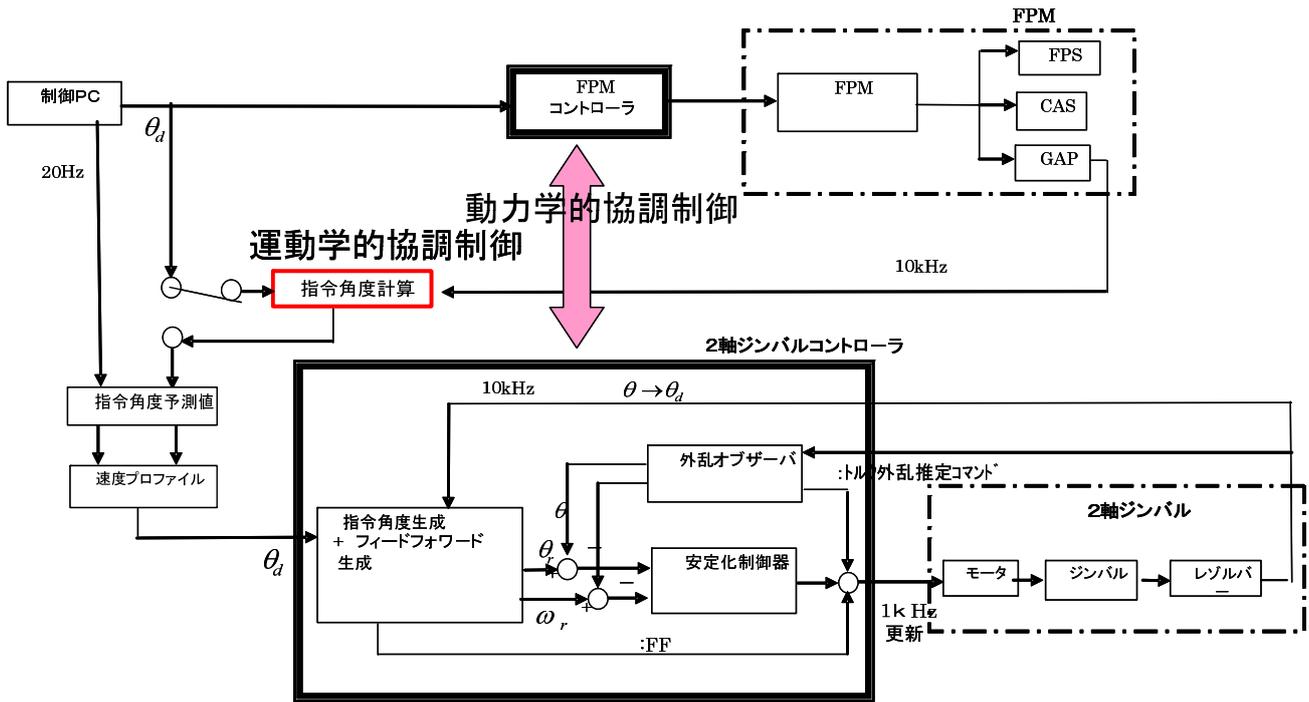


図 3.3-1 課題3 3-U (1) 成果の概要

最終的に実現した「2軸ジンバルコントローラ」の制御帯域は8~25Hz、「FPMコントローラ」の制御帯域は100~300Hzであり、移動体動揺として支配的な10Hz前後の挙動に対して両制御系の周波数特性を完全にオーバーラップさせることに成功した。

協調制御系の有効性に関しては、屋内において実施した簡易的な移動体光空間捕捉追尾試験により評価した結果、距離4km先の移動体が140km/h~336km/h程度で移動している場合でも、十分な追尾が達成可能であることが実証できた。

(2) 高速2軸ジンバル技術

移動体光空間通信において高速捕捉追尾を実現するため、2種類の高速2軸ジンバルシステムの試作を実施した。具体的には「ミラー駆動型2軸ジンバル」と「搭載2軸ジンバル」である。

まず「ミラー駆動型2軸ジンバル」では、衛星搭載を考慮に入れ小型軽量化を前提にできる限りの駆動範囲拡大を目標として試作した。このとき軽量化に伴う剛性低下は、ジンバル構造モデルベースの「2軸ジンバルコントローラ」によって積極的に補償する。今回の試作では費用と開発期間に制約があったものの、既設計品を優先的に活用することで駆動性能に関しては20Hz程度まで確保できることが確認され、2軸ジンバルの高速化という観点からは一定の成果が得られたと思われる。

一方、航空機への搭載が容易に可能となるよう、光空間通信で必要となる光学部全体を直接駆動する「搭載2軸ジンバル」を「ミラー駆動型2軸ジンバル」に引き続き試作した。当該ジンバルは航空機搭載を前提としているため、航空機振動や温度条件など航空機搭載環境を十分考慮した設計としており、さらに空間安定性能確保のため2軸ジャイロセンサを搭載している。また「搭載2軸ジンバル」では、光学部の指向方向を外部からモニターするため、小型CCDカメラもジンバル表面に付加した。

「搭載2軸ジンバル」に対しても、ジンバル構造モデルベースの「2軸ジンバルコントローラ」を適用することで、駆動性能は15Hz程度まで確保可能という結果が得られており、FPMとの協調制御実現の

ため必須となる 2 軸ジンバルの高速化は十分可能という結果が得られた。

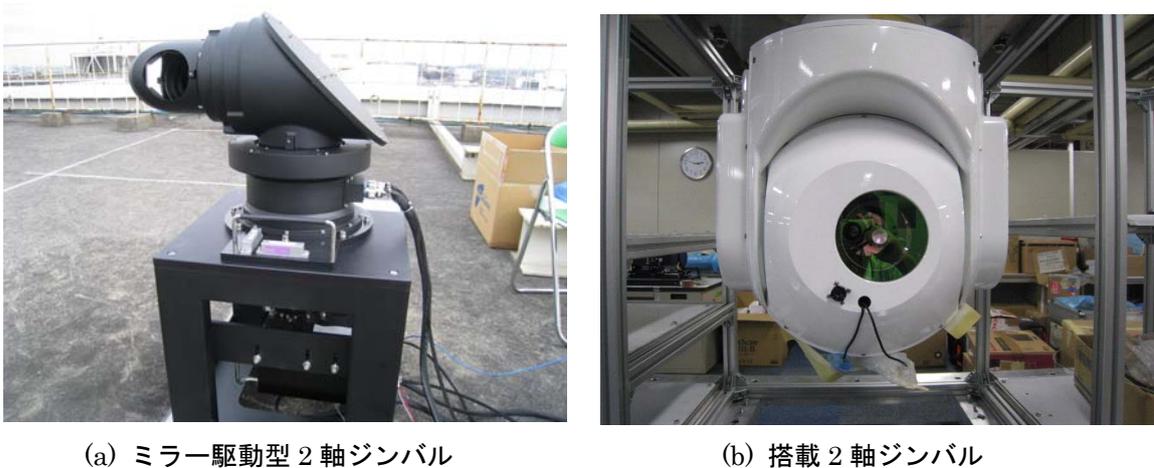


図 3.3-2 課題 3 3-ウ (2) 成果の概要

(3) 受光レベル変動に対して安定動作する光センサ技術

FPM による精捕捉追尾制御では、4 分割光センサ (QD センサ) が検出する捕捉追尾誤差信号に基づき、FPM ミラー角度をフィードバック駆動する光学制御方式を適用した。このとき大気揺らぎ等外乱の影響による大きな受光レベルの変動の影響を抑制するため、光 QD センサの高感度化とダイナミックレンジの拡大を達成し、「ミラー駆動型 2 軸ジンバル」向けとして「固定光学部」、「搭載 2 軸ジンバル」向けとして「搭載光学部」をそれぞれ試作後、「FPM コントローラ」により本方式の有効性を評価した。

さらに「固定光学部」には、波面センサと可変形鏡からなる「波面補償装置」を組み合わせることで、大気揺らぎの影響や高周波外乱による捕捉追尾精度への影響を「静的な波面補正」という形で定量的な補償を達成し、最適波面の自動探索など課題に対する技術的道筋を明確化できた。

また「搭載光学部」では、「固定光学部」の質量が 18.4kg であったのに対して 3.4kg と大幅な軽量化を達成することで、航空機搭載が十分可能となることを実証できた。

3. 3. 4 課題 3-エ 移動体光通信用高安定光リンク維持技術の研究開発

本課題では、「地上用捕捉追尾端末」と「搭載捕捉追尾端末」からなる移動体光空間通信向け捕捉追尾システムについて検討した。

ここで「地上用捕捉追尾端末」では、「固定光学部」に「波面補償装置」を組み合わせ、更に捕捉追尾制御部へ波面制御基板を組み込むことで、システム制御部、データ収集部、GPS/INS とを統合したシステムを構築し、性能評価を実施した。

一方「搭載捕捉追尾端末」では、「搭載光学部」をベースにシステム制御部、データ収集部、GPS/INS とを統合し、システムを構築した。

さらにシステム制御機能として、コーナーキューブによる初期捕捉、2 軸ジンバルと FPM を組み合わせた高速自動サーチ機能 (適用する光センサ毎に設定可能) などを盛り込むことで、実運用上の効率化を図った。

3. 4 課題 4 実証実験の実施

実証実験の実施に当たっては、最高で 40 ギガビット以上の通信速度を達成するとともに、災害監視に貢献する合成開口レーダー（SAR）画像やハイビジョン用高精細カメラ映像の伝送を想定し、ギガビットクラスのスループットを確保する。

3. 4. 1 概要

光空間通信の実証実験として捕捉追尾技術と課題 2 で開発した光空間通信技術（40Gbps デジタルコヒーレント及び、40Gbps DQPSK）の野外実証実験を実施した。本プロジェクトで実施した実証実験の実施状況を図 3.4-1 に示す。

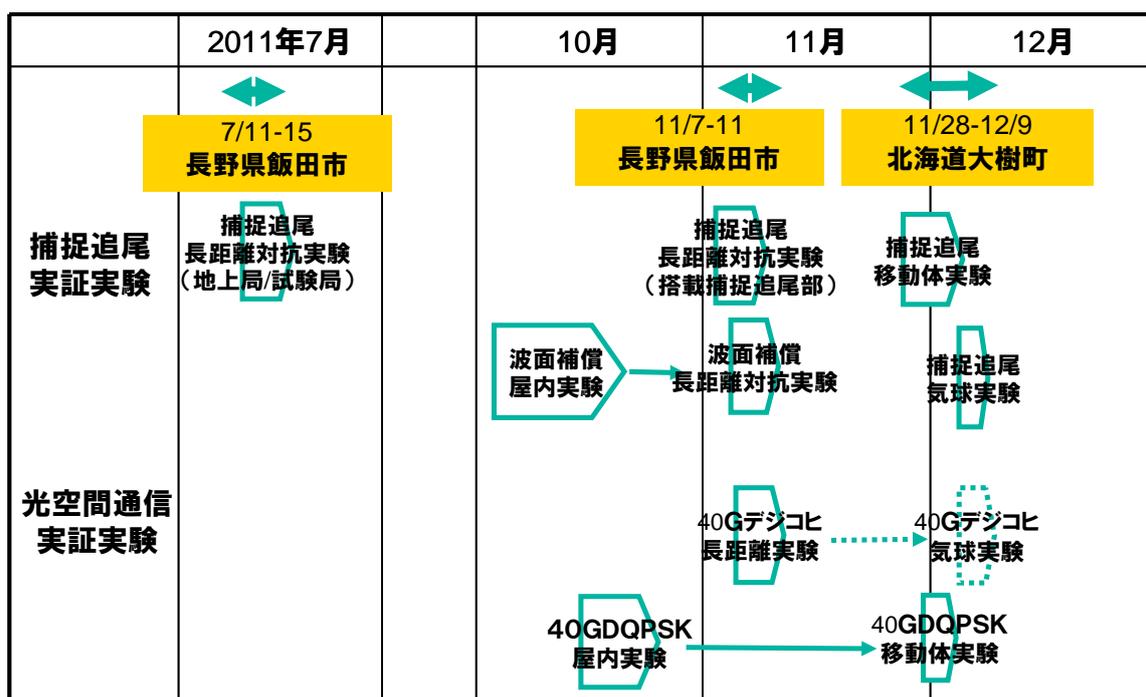


図 3.4-1 実証実験の実施状況

実証実験は以下のように 2 段階で実施した。

第 1 ステップは固定局間の長距離実験である。約 4 k m 離れた距離で、捕捉追尾実験及び、デジタルコヒーレント光空間通信実験を行った。捕捉追尾端末としては、地上局、試験局に加えて、搭載捕捉追尾端末を使用した。地上局捕捉追尾端末には課題 3 ーイで開発した波面補償機能を組み込んだ。

第 2 ステップとして、移動局（トラックまたは係留気球）と固定局（地上局）との間で捕捉追尾実験と、課題 1 ーアで開発したプロトコルの実験を含む DQPSK 光空間通信実験を行った。図 3.4-2 に係留気球実験のコンフィギュレーションと実験風景を示す。

これらの実証実験によって、移動体光空間通信における捕捉追尾技術及び、光空間通信技術に関する年次目標を達成した。合わせて、移動体光空間通信の実用化に向けた課題を明らかにした。

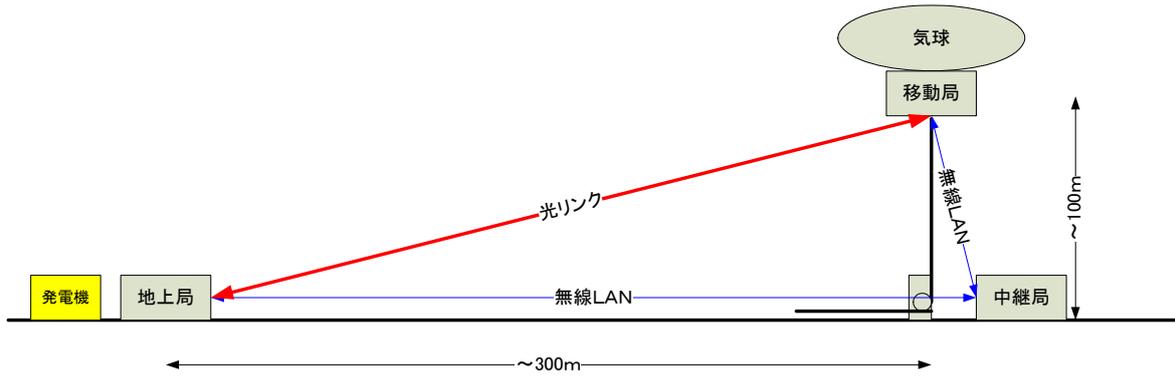


図 3.4-2 移動体（係留気球）実験のコンフィギュレーションと実験風景

3. 4. 2 捕捉追尾技術の実証実験

捕捉追尾技術の実証実験に関しては、搭載装置と地上局の 2 台の捕捉追尾端末を使って捕捉追尾技術の総合評価試験及び、地上実験を行った。地上局には課題 3-イで開発した波面補償システムを組み込んだ。2 台の捕捉追尾端末の間に光リンクを形成し、捕捉追尾システムの機能性能の実証と地上における大気揺らぎの補正効果を評価した。続いて、同じ装置を用いて捕捉追尾技術の実証実験を行い、以下の成果を得た。

- ① 地上局には課題 3-イで開発した波面補償システムを組み込み、2 台の捕捉追尾端末による野外試験において光リンクを形成し、捕捉追尾システムにおいて 1mrad 以下（マイクロラジアンオーダー）の追尾精度を実証した。
- ② 同じ装置を用いて捕捉追尾技術の移動体（トラック）実験を行った。搭載装置を載せた移動体と地上局の間の光リンクを形成し、移動体での捕捉追尾技術を実証した。
- ③ 地上における大気揺らぎの補正効果を評価した。

- ④ 係留気球と地上局の間の光リンクに関しては、プログラム追尾、地上局からの初期捕捉を実施し、今後の航空機等への搭載へ向けて、GPS の位置（高度）誤差の低減、初期捕捉センサの高機能化等の新たな課題も抽出できた。

3. 4. 3 光空間通信技術の実証実験

光空間通信技術の実証実験に関しては、以下を達成した。

- ① 屋外の 2 つの局の間で DQPSK 方式による 40Gbps 光空間通信実験を行い、課題 1 で開発したプロトコルを実証した。
- ② 屋外の 2 つの局の間で 40Gbps デジタルコヒーレント方式の光空間通信実験を行い、超高速デジタルコヒーレント方式に対する大気揺らぎの影響を評価した。
- ③ さらに、移動体（トラック）と地上局との間で①②を行い、移動体との間で超高速光空間通信が可能であることの確認、及びプロトコルの実証を行った。

なお、光空間通信技術の実証実験の具体的成果に関しては、課題 1 および課題 2 に記載した。

3. 5 研究開発成果の社会展開のための活動実績

(1) 研究開発運営委員会

本研究開発の推進に当たっては、基本計画書に基づき、本研究開発に関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くと共に、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、外部の学識経験者、有識者で構成される研究開発運営委員会を設置した。本研究期間中、委員会を 6 回実施し、学識経験者、有識者による指導、意見を受け、研究開発推進に反映した。

(2) 研究開発成果の普及促進（平成 22～23 年度）

国内外での学会発表を通じて、広く一般に周知・広報活動を推進した。国際学会においては、エクセレントペーパー賞を受賞する等、最先端の技術開発として海外からも注目を集めている。当社の技術を紹介する NEC 技報（2011 年 3 月宇宙特集）にも高速（40Gbps）光空間通信システムプロジェクトとしてシステムの概要と開発した機器を解説し、成果の展開に努めている。

(3) 搭載装置開発に向けた概念検討の実施

本研究成果を実用化に結びつけ社会展開を図るため、今後の航空機搭載超高速データ伝送システム及び衛星搭載光空間通信装置として実現を図ることを目指し、概念検討も実施した。

4 研究開発成果の社会展開のための計画

本研究で開発した成果は、観測航空機搭載データ伝送機器としての実用開発、具体的衛星計画への搭載化宇宙実証を目指しており、それに続く各種大型観測衛星、小型観測衛星への実用化を視野に入れている。また、技術そのものは、今後の標準化等への寄与を目指し、世界的に社会展開する予定である。衛星応用では、衛星運用に関する国際的標準化機関である CCSDS への反映を行う予定である。

5 査読付き誌上発表リスト

なし

6 その他の誌上発表リスト

[1] 「衛星通信を支える通信技術」、NEC 技報、vol.64、No.1、(2011.3)

7 口頭発表リスト

[1] 「衛星／航空機からの観測データ伝送のための超高速光空間通信技術の研究開発」
宇宙科学技術連合講演会(2010.11)

[2] 「衛星／航空機からの大容量データ伝送のための光空間通信技術の研究開発」
電子情報通信学会 総合大会(2011.3)

[3] 「光空間通信用精捕捉追尾機構の研究開発」
電子情報通信学会 総合大会(2011.3)

[4] 「Research and Development of 40Gbps optical free space communication from satellite/airplane」
International Conference on Space Optical Systems and Applications 2011(2011.5)

[5] 「The new Tracking Control System for Free-Space Optical Communications」
International Conference on Space Optical Systems and Applications 2011(2011.5)

[6] 「光空間通信用捕捉追尾端末の開発」
第 29 回 レーザセンシングシンポジウム(2011.9)

[7] 「Two-axis Tracking Control System for Free-space Optical Communication」
Ka and Broadband Communications Navigation and Earth Observation Conference(2011.10)

[8] 「Research and Development of Fine Pointing Mechanism for Free-space Optical Communication」
Ka and Broadband Communications Navigation and Earth Observation Conference(2011.10)

[9] 「光空間通信における機上搭載追尾制御系の協調制御アルゴリズム」
第 49 回 飛行機シンポジウム(2011.10)

[10] 「Optical Free Space Communication System for 40Gbps Data Downlink from Satellite/Airplane」
29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference(2011.11)

[11] 「単一偏光 QPSK 信号のデジタルコヒーレント受信に適した最大比合成法アルゴリズムの性能検証」
電子情報通信学会 光通信システム研究会(2011.11)

[12] 「40 Gbit/s Optical Free Space Transmission experiment using QPSK modulation format」
SPIE Photonics WEST2012(2012.1)

[13] 「Development and Evaluation of a Digital Signal processing for single polarization QPSK modulation format」
SPIE Photonics WEST2012(2012.1)

[14] 「高速データ転送のための TCP ACK 輻輳制御方式」
電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会(2011.9)

[15] 「単一偏向 QPSK 変調信号を用いた 40 Gbit/s 光空間伝送実験」
電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会(2011.9)

[16] 「楕円偏光状態単一偏波 QPSK 信号に対する最大比合成法の性能検証」

電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会(2011.9)

[17] 「LDPC 符号に基づく光通信システム向け SD-FEC 方式の検討」

電子情報通信学会 2011 年ソサイエティ大会(2011.9)

[18] 「光空間通信用トランスポートプロトコル TCP-FSO の提案」

電子情報通信学会 2012 年総合大会(2012.3)

[19] 「光空間伝搬エミュレータの試作と評価」

電子情報通信学会 2012 年総合大会(2012.3)

8 出願特許リスト

[1] 「光通信システム、光通信方法、光通信装置およびその制御方法と制御プログラム」 (2010.11)

[2] 「光空間通信における捕捉追尾方法、捕捉追尾機構および捕捉追尾システム」 (2011.1)

[3] 「通信装置およびその通信制御方法」 (2011.3)

[4] 「送信器、受信器、送信方法、受信方法及び通信システム」 (2011.3)

[5] 「誤り訂正符号化装置、誤り訂正符号化方法および誤り訂正符号化プログラム」 (2011.3)

[6] 「光受信方法および光受信機」 (2011.4)

[7] 「通信装置およびその通信制御方法」 (2011.7)

[8] 「光信号処理装置、偏波処理装置、及び光信号処理方法」 (2011.9)

[9] 「光通信システム、光通信方法、光通信装置およびその制御方法と制御プログラム」 (2011.11)

9 取得特許リスト

なし

10 国際標準提案リスト

なし

11 参加国際標準会議リスト

なし

12 受賞リスト

[1] 鈴木 良昭、Excellent Paper 賞、“Optical Free Space Communication System for 40Gbps Data Downlink from Satellite/Airplane”、2011 年 12 月

13 報道発表リスト

なし

研究開発による成果数

	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年	平成 21 年
査読付き誌上発表数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
その他の誌上発表数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
口 頭 発 表 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
特 許 出 願 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
特 許 取 得 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
国際標準提案数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
国際標準獲得数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
受 賞 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
報 道 発 表 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
報 道 掲 載 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	—

	平成 22 年度	平成 23 年度	合計	(参考) 提案時目標数
査読付き誌上発表数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
その他の誌上発表数	1 件 (0 件)	件 (件)	1 件 (0 件)	件 (件)
口 頭 発 表 数	3 件 (0 件)	16 件 (7 件)	19 件 (7 件)	8 件 (件)
特 許 出 願 数	5 件 (0 件)	4 件 (0 件)	9 件 (0 件)	4 件 (件)
特 許 取 得 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
国際標準提案数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
国際標準獲得数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
受 賞 数	件 (件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)	件 (件)
報 道 発 表 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	件 (件)
報 道 掲 載 数	件 (件)	件 (件)	件 (件)	—

注 1 : 各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注 2 : 「査読付き誌上発表数」には、論文誌や学会誌等、査読のある出版物に掲載された論文等を計上する。学会の大会や研究会、国際会議等の講演資料集、アブストラクト集、ダイジェスト集等、口頭発表のための資料集に掲載された論文等は、下記「口頭発表数」に分類する。

注 3 : 「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等を計上する。

注 4 : PCT 国際出願については出願を行った時点で、海外分 1 件として記入。(何カ国への出願でも 1 件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。