

**ICTイノベーションフォーラム2012
～成果発表会～**

光空間通信技術の研究開発

日本電気株式会社

2012年10月2日

目 次

1. 研究開発概要
2. 研究開発課題と成果
3. 普及への取り組み

1. 研究開発概要

研究開発の背景、目的

安全安心社会のための災害監視や、地球観測に、衛星・航空機による観測が重要化。観測技術の進歩で増大する大量観測データを、機上から地上ユーザへ迅速な伝送が必要。電波では容量不足となり、**光空間通信と地上光ネットワークの連携(下図)**が必要と考える。

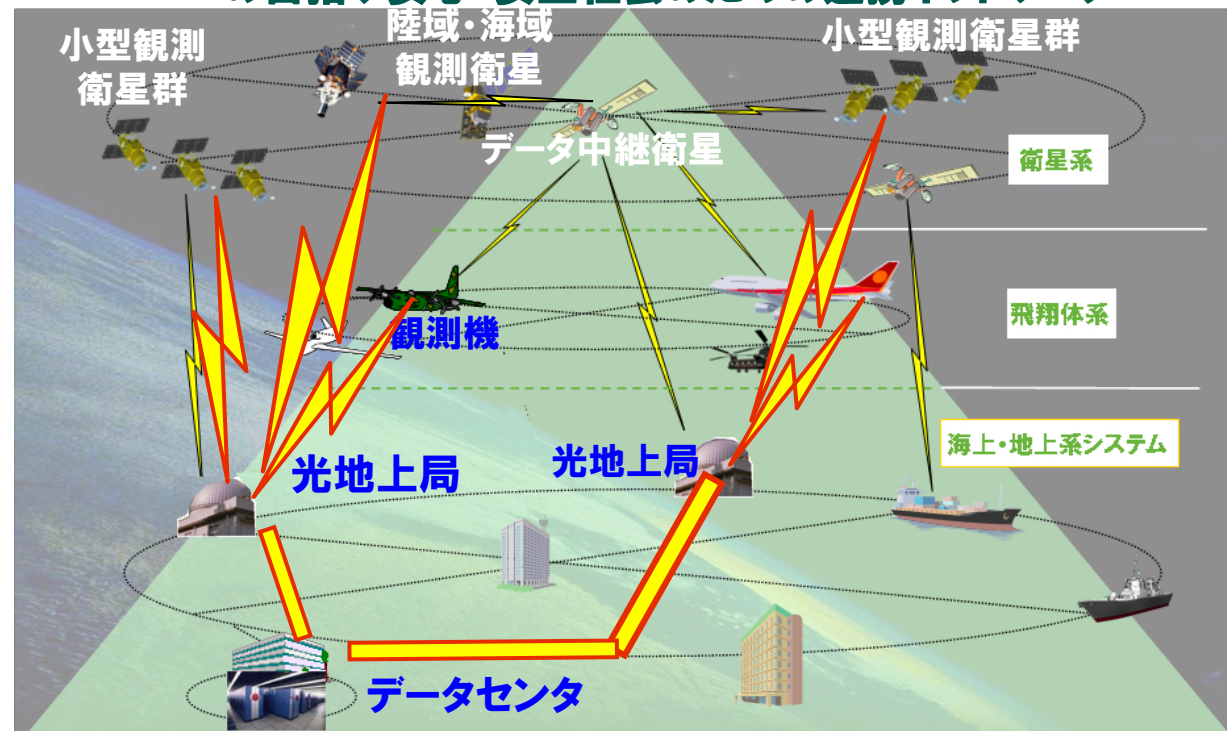
東日本大震災において被害状況の把握、災害の復旧のため、観測システムが重要な役割を担う等、大震災や火山噴火などで観測衛星のニーズが急増しており、そのデータを高速で伝送する技術はますます重要なものとなってきている。

デジタルコヒーレント技術を用い、1波長で、**40Gbps**の超高速データ伝送を移動体との光空間通信で達成 (**世界初**)

1.5 μm 帯レーザー使用

1.5 μm は、地上光ファイバー網で使用されており、1 μm 帯よりもデバイスの入手が容易かつアイセーフ
欧州が1 μm 帯を採用しているが、上記理由から、高速化に向けて世界的に1.5 μm の開発に移行

NECの目指す安心・安全社会のための連携ネットワーク



1. 研究開発概要

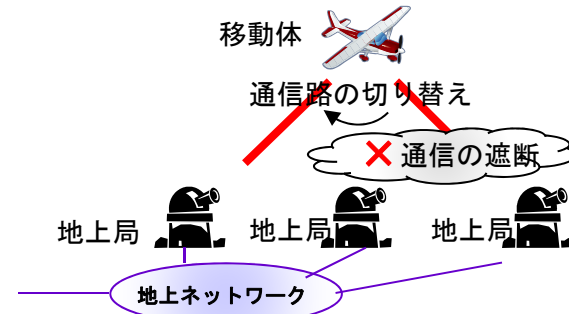
研究開発課題

課題1 光空間通信プロトコルの研究開発

【目的】 雲等の遮蔽物により通信が遮断された場合には瞬時に別の地上局経由でデータを途中から再送信すること等が可能な通信プロトコルの開発を行うことで、光空間通信による安定なネットワークを実現する。

【実施内容】

- ◇通信路遮断の検出切替技術（ハンドオーバ技術）
- ◇データ再送信制御技術（高効率プロトコル技術）等の開発

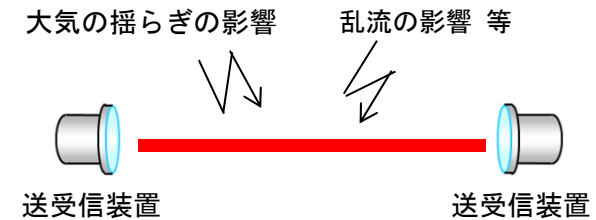


課題2 光空間通信方式の研究開発

【目的】 新たな通信方式の開発や誤り訂正技術等により光空間通信の品質を向上させることで、外乱に対して強く高速・高信頼な通信を実現する。

【実施内容】

- ◇外乱に強い通信方式（デジタルコヒーレント高感度通信技術）
- ◇誤り訂正技術 等の開発



課題3 移動体光通信技術の研究開発

【目的】 移動体を高速・高精度に追尾するために必要な、移動体搭載機器の開発技術及び地上局の開発技術を確立することで、移動体と地上局間で高速・高信頼な通信を実現する。

【実施内容】

- ◇高精度広角捕捉／追尾技術
- ◇波面制御技術



課題4 実証実験の実施

【目的】 課題1～3で構築した技術を統合し、実証する 【実施内容】 ◇移動体（トラック、繫留気球）を用いた試験実証

2. 研究開発課題と成果

課題1 光空間通信プロトコルの研究開発

課題1-ア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

- 概要: **光空間通信の通信特性に適応可能なプロトコル技術を開発する。**
高速な瞬断回復(局間ハンドオーバ)を実現する。
- 成果: **世界初の光空間通信用トランスポートプロトコルを開発し、従来比10倍以上の性能改善を達成した。**
通信信号断時の局間ハンドオーバにおいて高速回復(1秒程度)を実証した。
- エクストラサクセス:
 - ネットワーク区間ごとに**性能モデルを交換する通信方式**により光空間通信と他通信を接続した**高速かつ高効率(省資源)な通信**を実証した。
 - 端末、通信方式をモデル化し**迅速なTCP/IPのパラメタ自動調整**を実証した。

課題1-イ 光空間通信エミュレータの開発

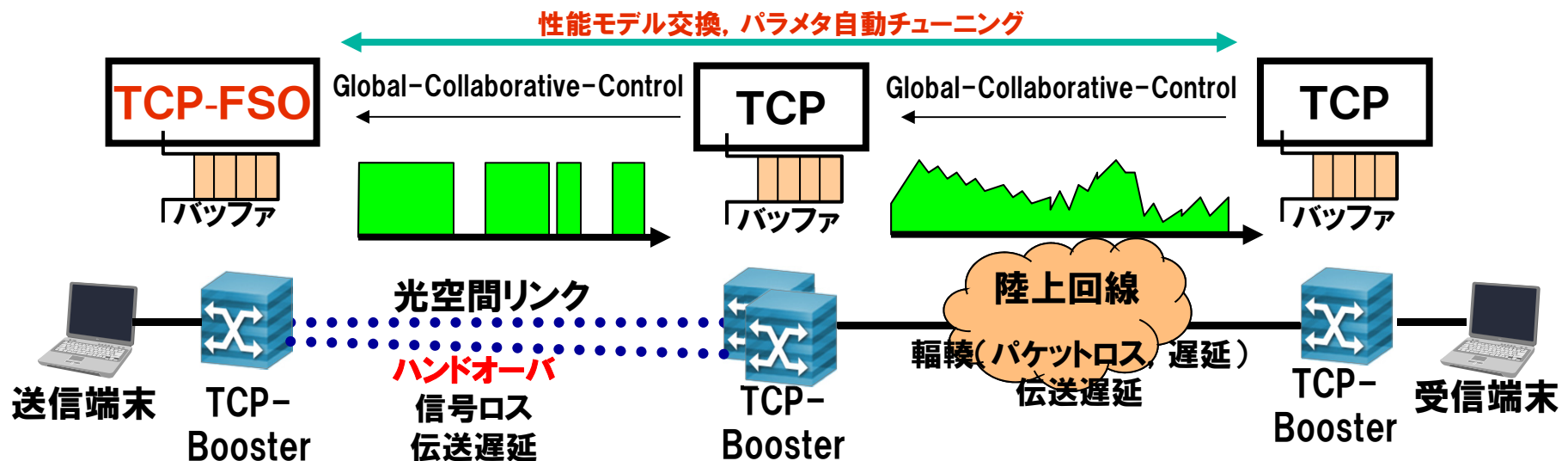
- 概要: **光空間通信特有の高速な特性変動を再現するエミュレータ環境を開発する。**
- 成果: **光空間通信で生じる光強度の変化(信号変動100kHz)を正確(誤差0.1dB以内)に再現**できることを実証した。
- エクストラサクセス: **更なる高速な変動(1MHz)での動作**を実証

2. 研究開発課題と成果

課題1ーア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

開発項目

- ① 光空間通信専用TCP: TCP-FSO
プロトコル中継器間の光空間通信専用TCP
- ② ヘテロトランスポート中継プラットフォーム: TCP-Booster・Model-Controller
TCP-FSOを組み込んだ性能モデル交換型通信方式
プロトコル中継器間のハンドオーバによる通信継続機能
- ③ トランスポート中継パラメタ自動チューニング技術: AutoTuner
性能モデルを基にバッファ量を最適化



2. 研究開発課題と成果

課題1-ア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

① 光空間通信用トランスポートプロトコル: TCP-FSO

課題

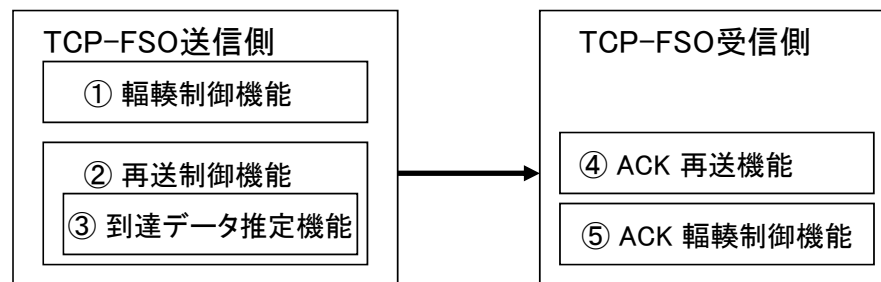
- 光空間通信では、連続的な信号ロス、大きな遅延など、従来のリンクに無い特徴があり、従来のTCPでは、十分な性能を達成することが困難

解決方法

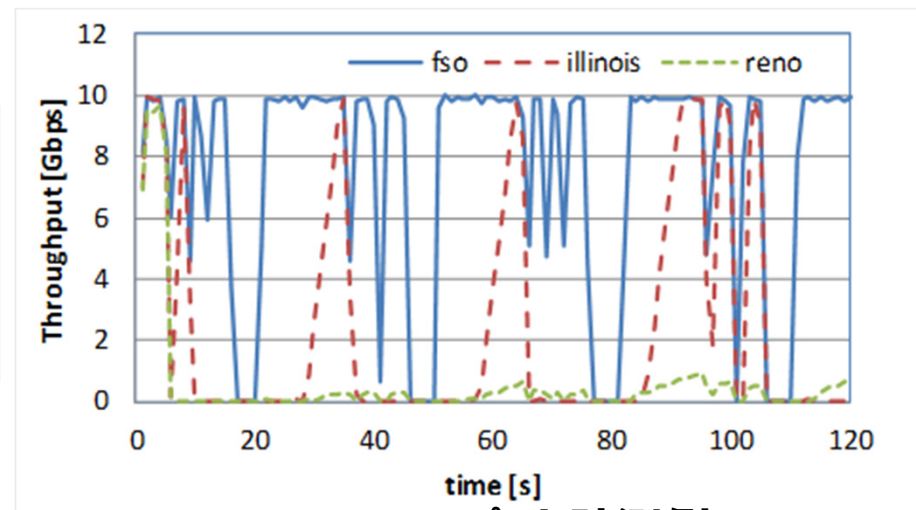
- 輻輳制御、再送制御などを改良したTCP-FSOを提案

成果

- 従来比、10倍以上のデータ転送スループットを実証



TCP-FSOの機能概要



スループット計測例

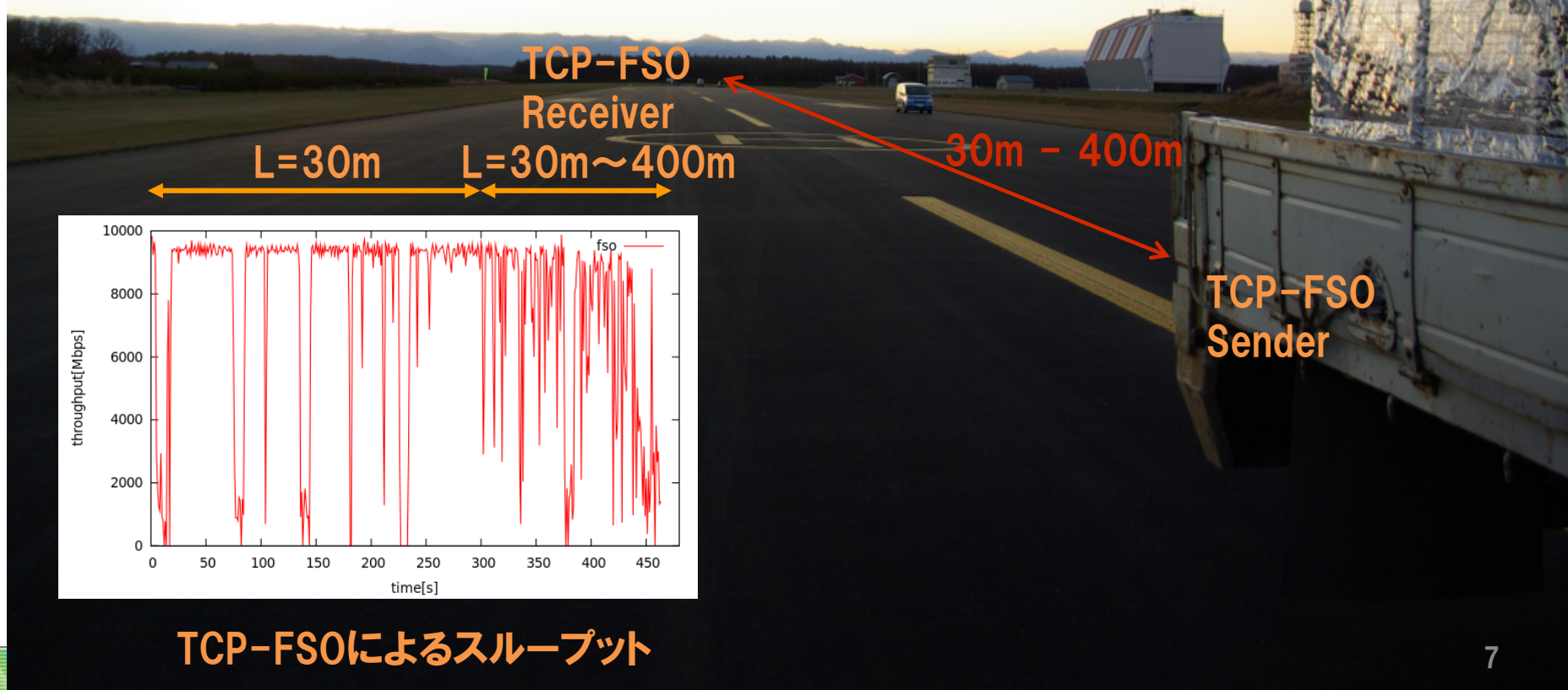
(課題1-イ光空間エミュレータ使用)

2. 研究開発課題と成果

課題1 - ア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

大樹航空宇宙実験場での実験(課題4)にて、提案方式の
効果を確認

従来方式ではほとんどデータ転送できない状況であっても、
提案方式は回線速度に近いデータ転送スループットを達成



2. 研究開発課題と成果

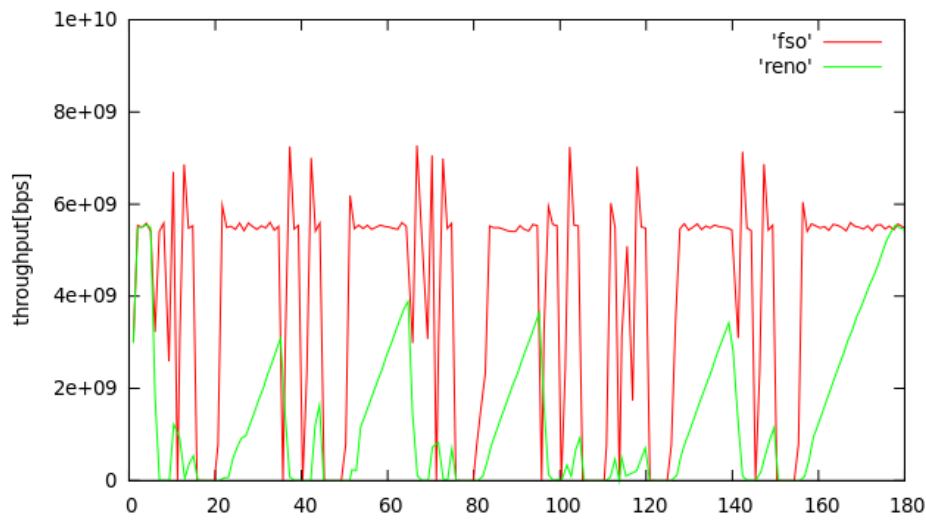
課題1ーア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

②ヘテロランスポート中継プラットフォーム: TCP-Booster・Model-Controller

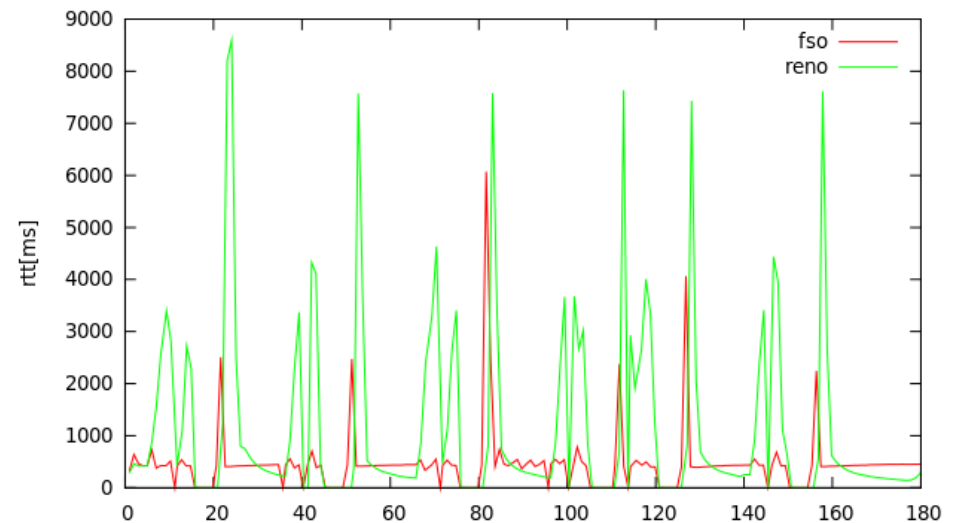
課題: スループットの向上、バッファ省資源化

特徴: 各NW区間の通信性能モデル(local-model)を交換し合い、
端末間で達成可能な性能モデル(e2e-model)を作成

成果: 高スループットと低遅延
(省資源)を両立



スループット



データ転送遅延

2. 研究開発課題と成果

課題1ーア 光空間通信プロトコル技術の研究開発

③ Auto-Tuner 課題

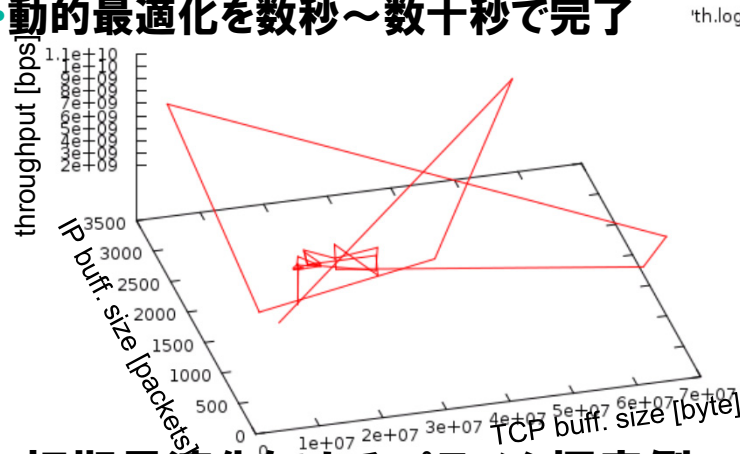
- TCPBが最大性能を発揮するパラメタ設定の発見が困難
 - ・ 一方、巨大なバッファ設定によるデータ転送遅延の悪化も

解決法

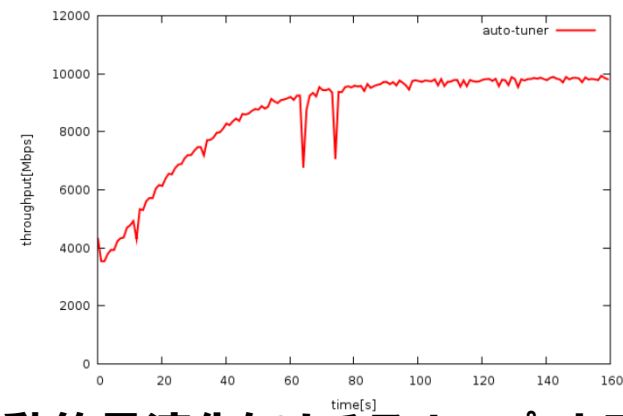
- 端末、TCP、NWのモデルよりスループットモデルを構築し、探索回数を削減
 - ・ 初期最適化: TCP層のバッファと、IP層のバッファの組み合わせを最適化
 - ・ 動的最適化: 各バッファを連動させ最適化

成果

- 初期最適化、動的最適化、それぞれでスループットとデータ転送遅延を改善
 - ・ 初期最適化の探索回数を $O(n^2)$ から $O(n)$ に削減
 - ・ 動的最適化を数秒～数十秒で完了



初期最適化によるパラメタ探索例

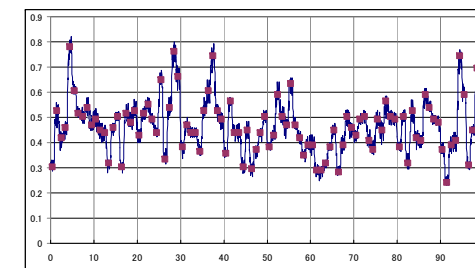
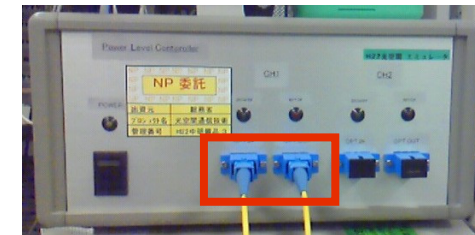
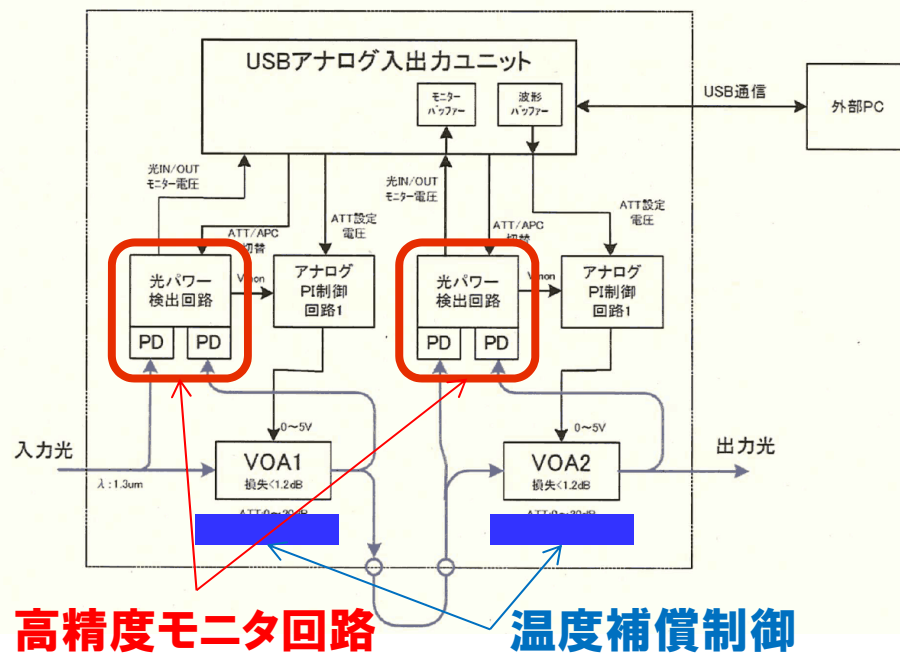


動的最適化によるスループット改善例

2. 研究開発課題と成果

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

- 大容量通信の瞬断等、**光空間通信の特性を再現**する目的で開発
- 空間伝搬での**光強度変動**を、光ファイバ入出力デバイスで実現
- 強度の**変動速度100KHz**、強度の**変動再現精度0.1dB**を目標
- 入出力の光レベルを**双方モニタ**して制御することで、0.1dB精度を実現
- レベル変動デバイスを**温度補償制御**して、動作を安定化、制御を高速化



開発したエミュレータのブロック図(左)、
外観(右上)、レベル変動再現波形(右下)

2. 研究開発課題と成果

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

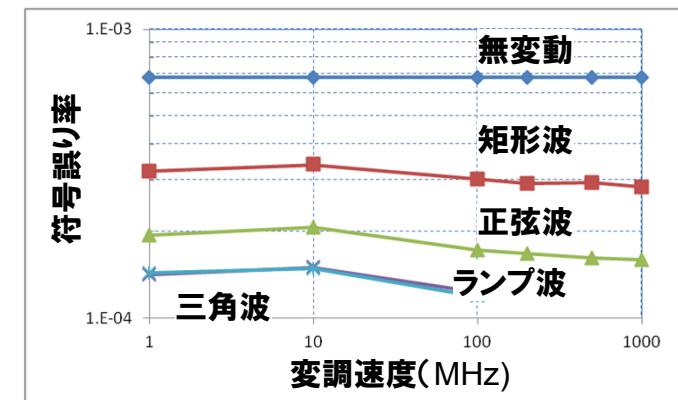
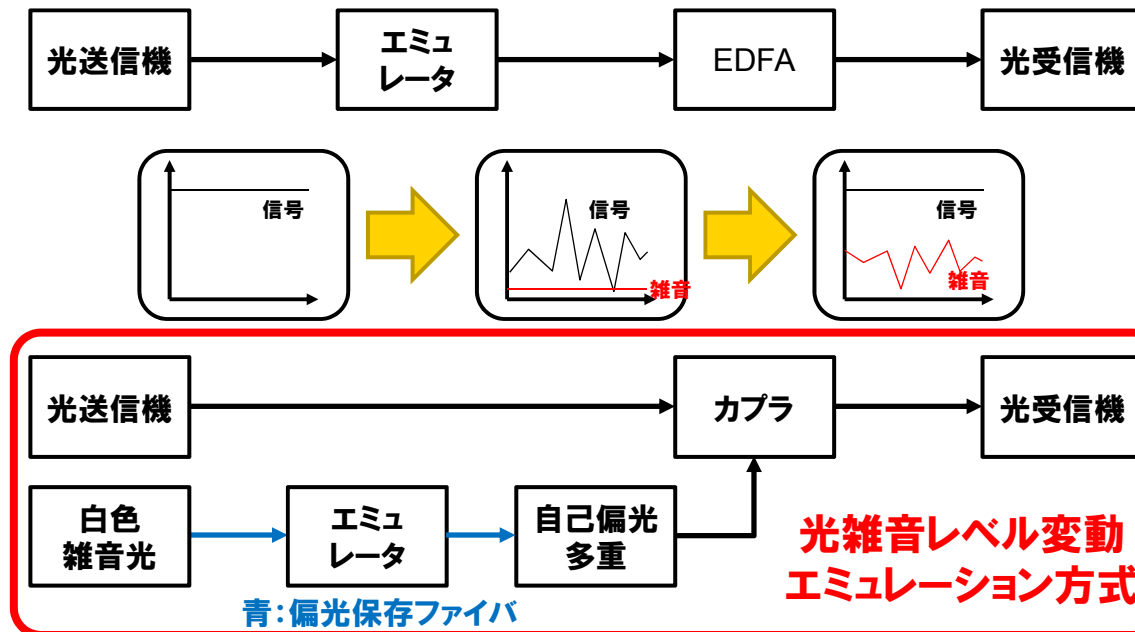
レベル変動高速化→地上光ファイバ通信での**高速変調器**が有効

- しかし、レベル変動量に偏光依存性があるため、**そのままでは適用不可**

信号の高速レベル変動エミュレーションと等価な、**光雑音レベル変動エミュレーション方式**を提案

最大1MHzの変動実験において、符号誤り率が理論通りに変動

- **等価なエミュレーションが可能**となることを確認



変動時の誤り率測定結果
(最大速度1MHz)

2. 研究開発課題と成果

課題2 光空間通信方式の研究開発

課題2ーア 光空間通信用光伝送方式の研究開発

- 概要: 40 Gb/s級光リンクを実現可能とする高感度変復調方式と高精度誤り訂正方式の確立を目指す。
- 成果: デジタルコヒーレント変調方式とLDPC符号軟判定誤り訂正方式を組み合わせた光空間伝送システムを開発し、**世界トップレベルの高感度な受信性能**（7 photons/bit）を実現。さらに、**40 Gb/s級のスループットを光空間伝送実験により実証**。

課題2ーイ 光空間通信実証用光送受信機技術の研究開発

- 概要: 広いダイナミックレンジと瞬時応答性を両立した光レベル変動制御システムを開発し、外乱に強い光空間通信システムの実現を目指す。
- 成果: 受光レベル変動の許容量として、**最大振幅25 dB、瞬時応答速度10 kHzの性能を達成**。
「きらり」の光通信実験の大気外乱によるレベル変動値の実測データに対し、その**10倍の実験環境下**に対応可能。

課題2ーウ 光空間通信の大気揺らぎモデル化技術の研究

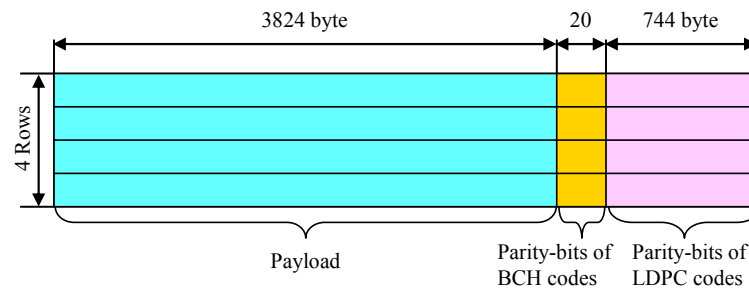
- 概要: 大気揺らぎによる光の伝搬特性を把握するために、そのモデル化の実現を目指す
- 成果: 「きらり」の光通信実験の**実測データを基にした分析**を実現させ、大気揺らぎ数学モデルを伝送路として取り込んだ**通信回線シミュレーションツール**の作成と光通信エミュレータによる通信システム検討へ反映した。

2. 研究開発課題と成果

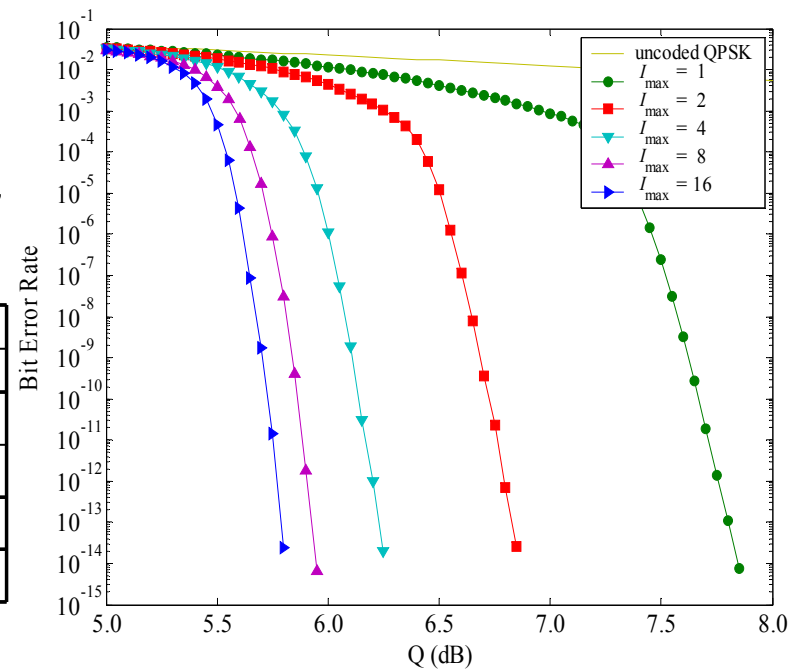
課題2-ア 光空間通信用光伝送方式の研究開発

高性能誤り訂正方式の研究開発

- 誤り率 10^{-12} において、10dB超のネットコーディングゲインと40Gbpsスループットの両立を目指し、**低密度パリティ検査符号をベースとした軟判定FEC方式を開発**
- FPGAをターゲットしたハードウェア実装、及びシミュレーションによる誤り率特性評価を通して、目標数値達成を確認



FEC	I_{\max}	Coding Gain (dB)		Net Coding Gain (dB)		Q-limit (dB)	
		BER= 10^{-12}	BER= 10^{-14}	BER= 10^{-12}	BER= 10^{-14}	BER= 10^{-12}	BER= 10^{-14}
SD-FEC (LDPC+BCH)	8	11.10	11.70	10.30	10.90	5.90	5.95
	16	11.25	11.85	10.45	11.05	5.75	5.80
AFEC (OH = 7%) ITU-T.G.975.1-1.3		8.35	8.95	8.05	8.65	8.65	8.70
RS (255, 239)		5.80	6.05	5.50	5.75	11.20	11.60



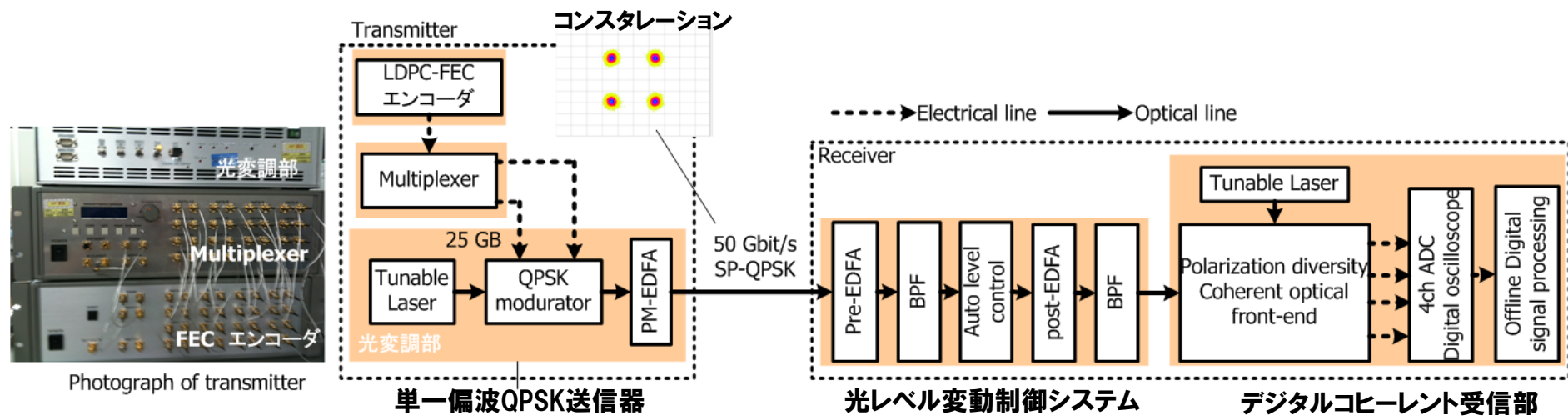
FECフレームフォーマット及び誤り率特性評価シミュレーション結果

2. 研究開発課題と成果

課題2-ア 光空間通信用光伝送方式の研究開発

光変復調方式の研究開発

- 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
- 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



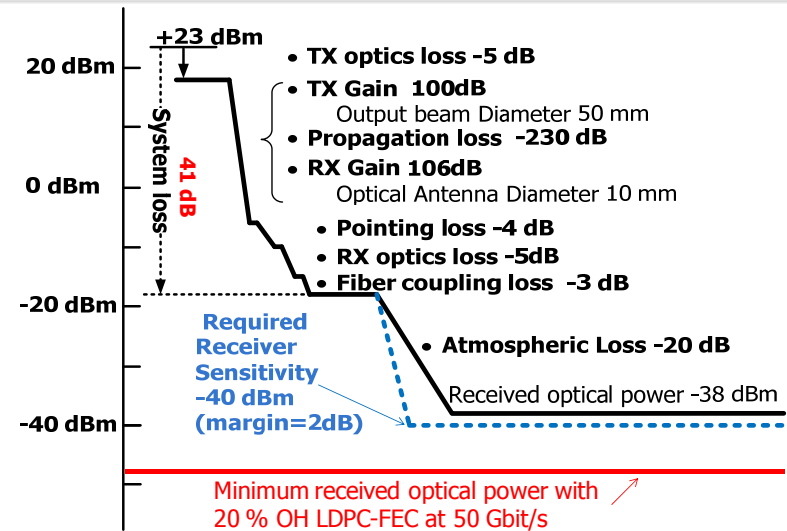
光空間伝送システム

課題2-ア 光空間通信用光伝送方式の研究開発

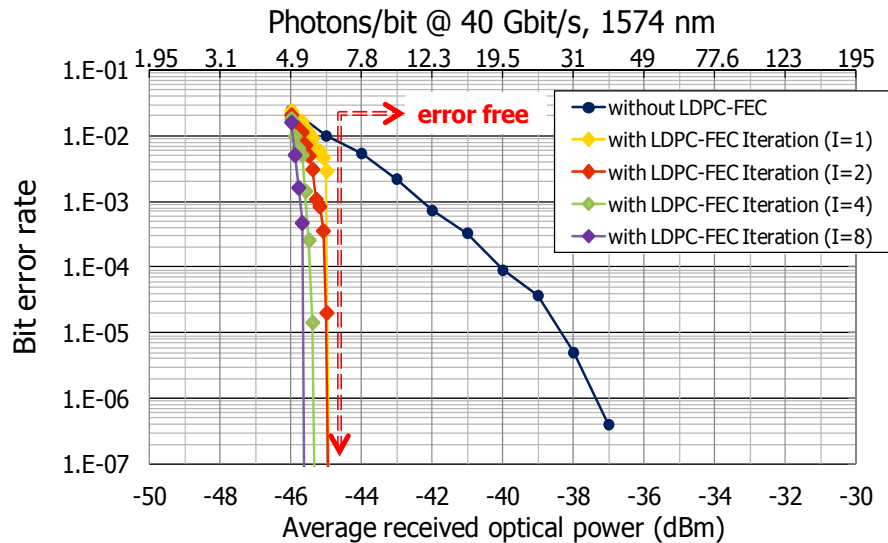
開発した光空間伝送システムの性能評価を実施し、平均受信感度-44 dBmにおいてエラーフリーを実現できることを確認

- 7 photons/bit (@ 40 Gbps)と極めて高感度な性能
- 40 km光空間リンク回線を可能とする性能

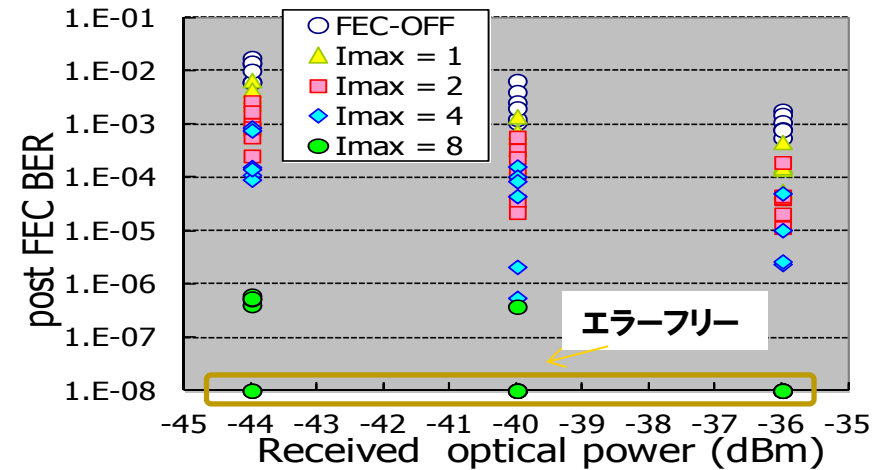
さらに、移動局-固定局間における光空間伝送実験の実測データにより、誤り訂正処理後においてエラーフリー伝送を確認



40 km光空間リンクダイアグラム



光空間評価システムの受信特性



空間光伝送したLDPC-FECエンコード光信号の受信特性 (平均受信パワー-36 dBmで、取得した全データが訂正可能)

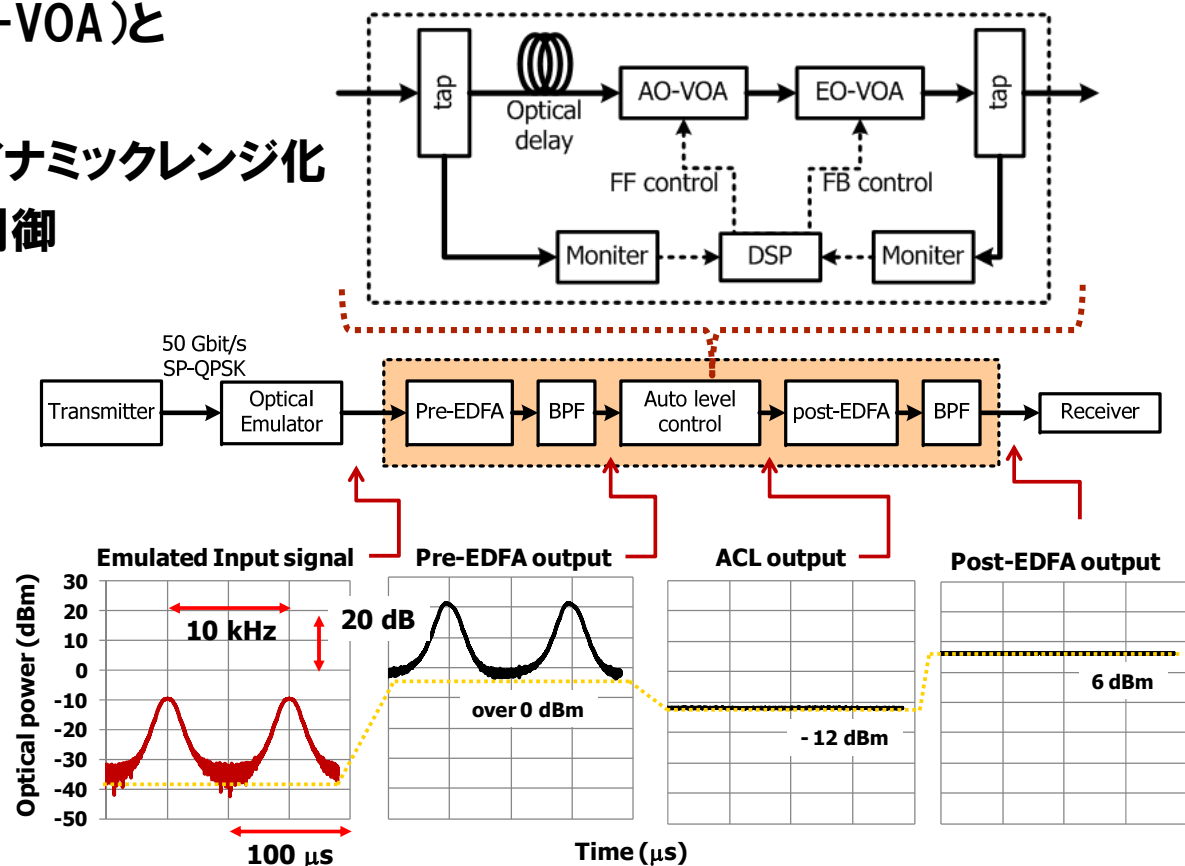
2. 研究開発課題と成果

課題2-I 光空間通信実証用光送受信機技術の研究開発

光レベル変動制御システム

- 高利得、低ノイズEDFAと自動レベル制御器をカスケード接続する方式を採用
- 高速かつ広いダイナミックレンジを実現する自動レベル制御器の開発
音響式可変アッテネータ(AO-VOA)とEO-VOAのカスケード接続
- 前段VOAで高速かつ広いダイナミックレンジ化
- 後段VOAで精密な光レベル制御

→ レベル変動幅20 dB以上、
変動速度10 kHz以上の
レベル変動した光信号の
安定受信を実現



レベル変動制御システムの構成と動的評価結果

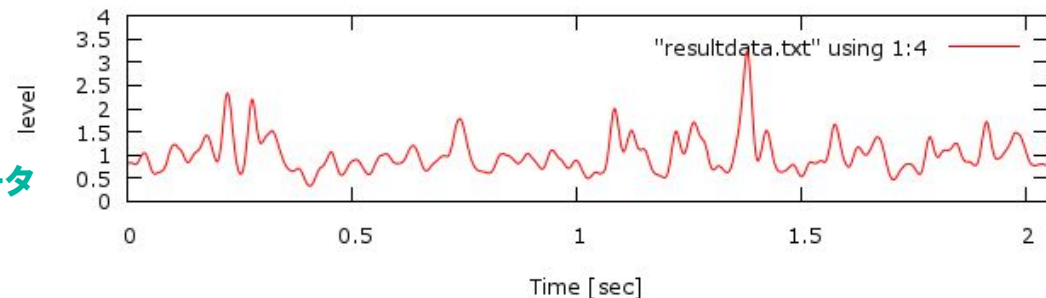
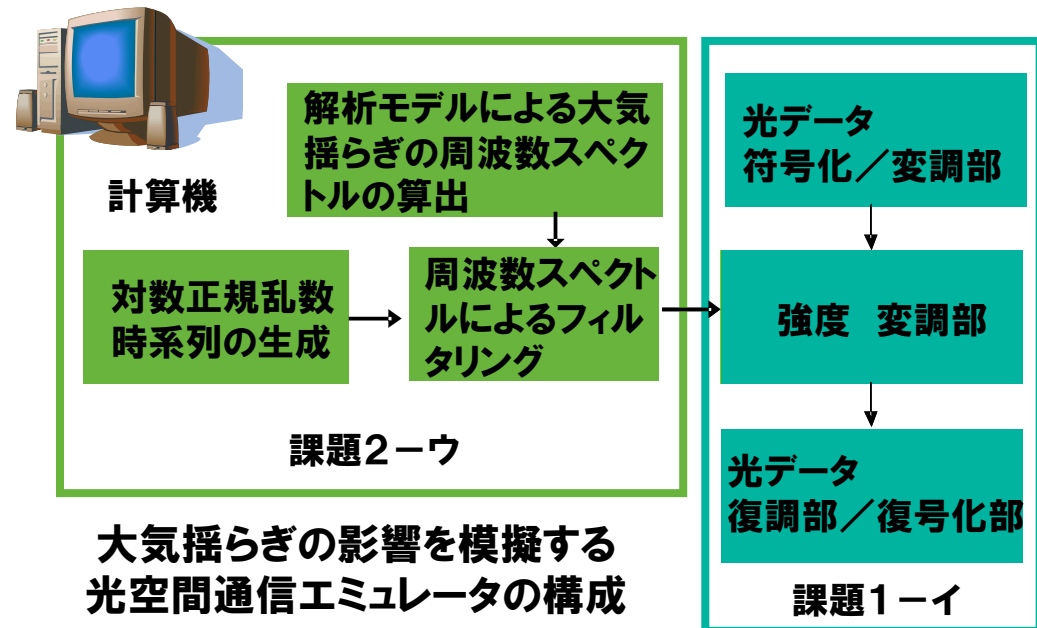
2. 研究開発課題と成果

課題2-ウ 光空間通信の大気揺らぎモデル化技術の研究

大気揺らぎの状態を表現する大気揺らぎ数学モデルを伝送路として取り込んだ通信回線シミュレーションツールを作成

- 対数正規乱数時系列を生成
(ボックスミュラ法)
- 解析モデルによる大気揺らぎの周波数スペクトルを算出
(von Karman spectrum)
- 乱数時系列をFFTLし、上記揺らぎのスペクトルをフィルタとして周波数領域で掛け合わせ
- 上記で得られたデータを逆FFTLし、大気揺らぎの時系列データを生成

シミュレーション時系列を生成するためのパラメータ
シンチレーションインデックス、
RMS擬似風速、受信開口径、
大気構造(インナースケール、アウトースケール)



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

2. 研究開発課題と成果

課題3 移動体光通信技術の研究開発

課題3ーア 広角小型精捕捉追尾技術

- 概要:広角かつ高速な捕捉追尾機構の実現を目指す。
- 成果:ムービングマグネットボイスコイル駆動方式の適用により、**駆動範囲 $\pm 4^\circ$** 、**制御帯域300Hz**の駆動性能を達成した。
- エクストラサクセス:**並進駆動機構の追加**により、航空機など移動体動揺に対する捕捉追尾性能を向上し、さらなる**実機搭載特性改善**を達成した。

課題3ーイ 移動体光通信用波面補償技術

- 概要:光ビームの波面乱れを抑制可能とする波面補償技術の確立を目指す。
- 成果:波面センサと可変形鏡とを高速は面補償演算回路と組み合わせることで、**補正周波数11.2kHz**の波面補償システムを構築した。
- エクストラサクセス:静的な波面補正により、**平均受信パワーの大幅改善(7~8dB)**を達成した。

課題3ーウ 協調制御を用いた高速捕捉追尾技術

- 概要:航空機等の動揺による**光ビームの指向角変動**を高精度に補償可能するため、高速捕捉追尾技術の実現を目指す。
- 成果:移動体光空間通信において高速捕捉追尾を可能とするため、**2種類の高速2軸ジンバルシステム**を実現した。また、**光QDセンサにおいて高感度化とダイナミックレンジ拡大**を達成することで、大気揺らぎ等による大きな受光レベル変動の抑制を達成した。さらに、捕捉追尾制御系として**モデルベース協調制御方式**を導入することで、4km離れた移動体が140~336km/hで移動している場合でも**十分追尾可能**となることを実証した。
- エクストラサクセス:**搭載光学部の軽量化**を達成した(18.4kg→3.4kg)。

課題3ーエ 移動体光通信用高安定光リンク維持技術

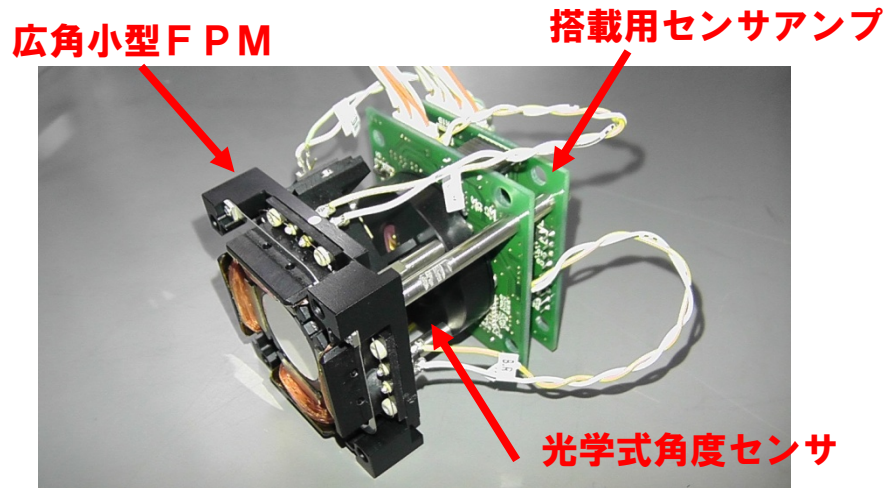
- 概要:移動体との光空間通信を可能とする移動体光通信システムの実現を目指す。
- 成果:地上用捕捉追尾端末と搭載捕捉追尾端末からなる**移動体光空間通信向け捕捉追尾システム**を構築した。

2. 研究開発課題と成果

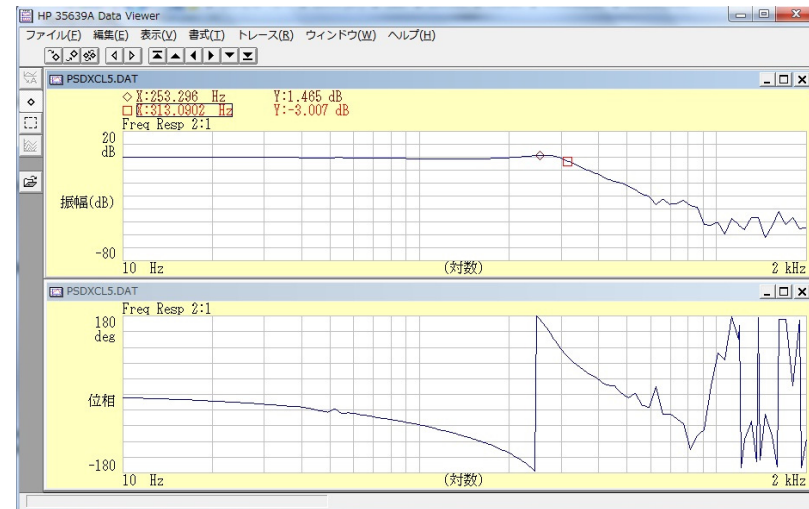
課題3-ア 広角小型精捕捉追尾機構(FPM)の研究開発

広角小型FPM、及び、光学式角度センサFPMを開発

- 磁気回路、及び、放熱機構の改善により、安定駆動範囲 $\pm 4.5^\circ$ 以上の広角小型FPMを開発
- 光学式角度センサ、搭載用センサアンプを開発し、上記広角小型FPMに搭載。光学式角度センサによる、ロバスト位相補償制御系を構築し、制御帯域300Hzを達成



広角小型FPM、光学式角度センサ



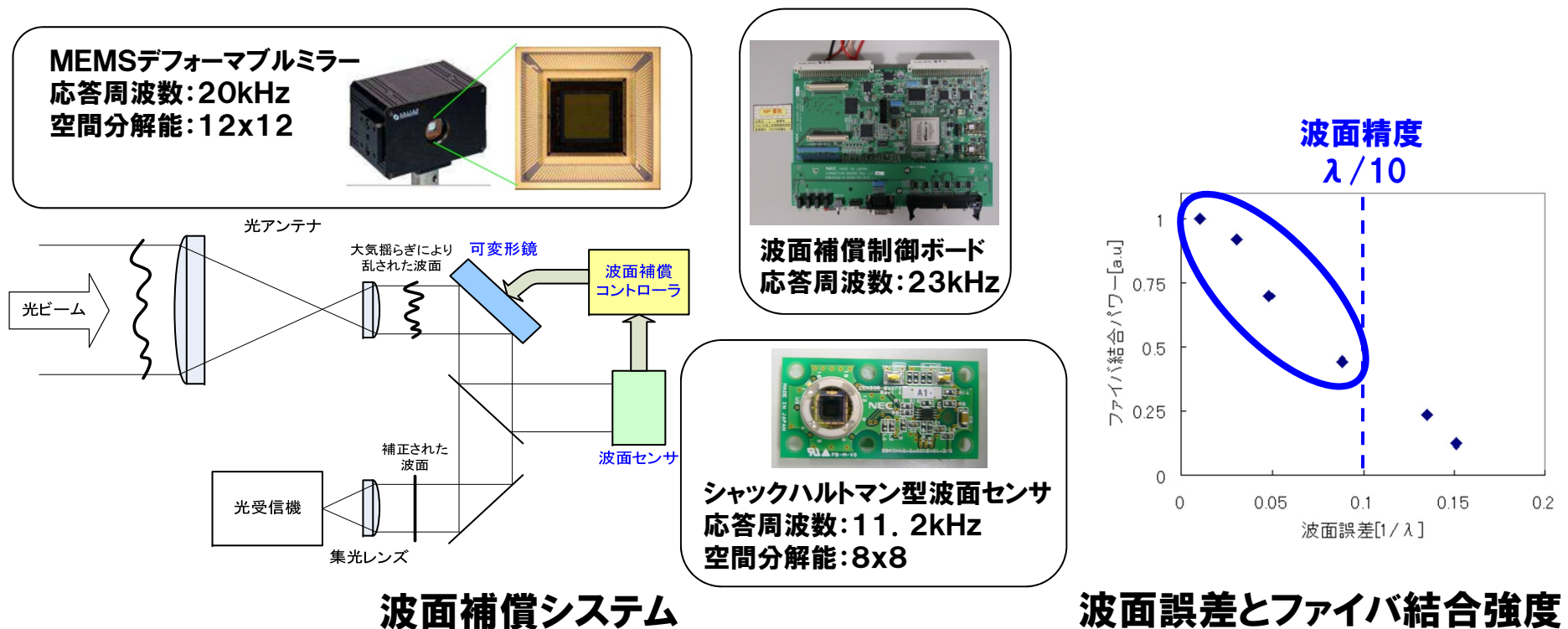
光学式角度センサ制御閉ループ特性

2. 研究開発課題と成果

課題3-イ 移動体光通信用波面補償技術の研究開発

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

- サブシステム(波面センサ、可変形鏡、波面補償コントローラ)を統合
- 波面精度 $\lambda / 10$ を達成**

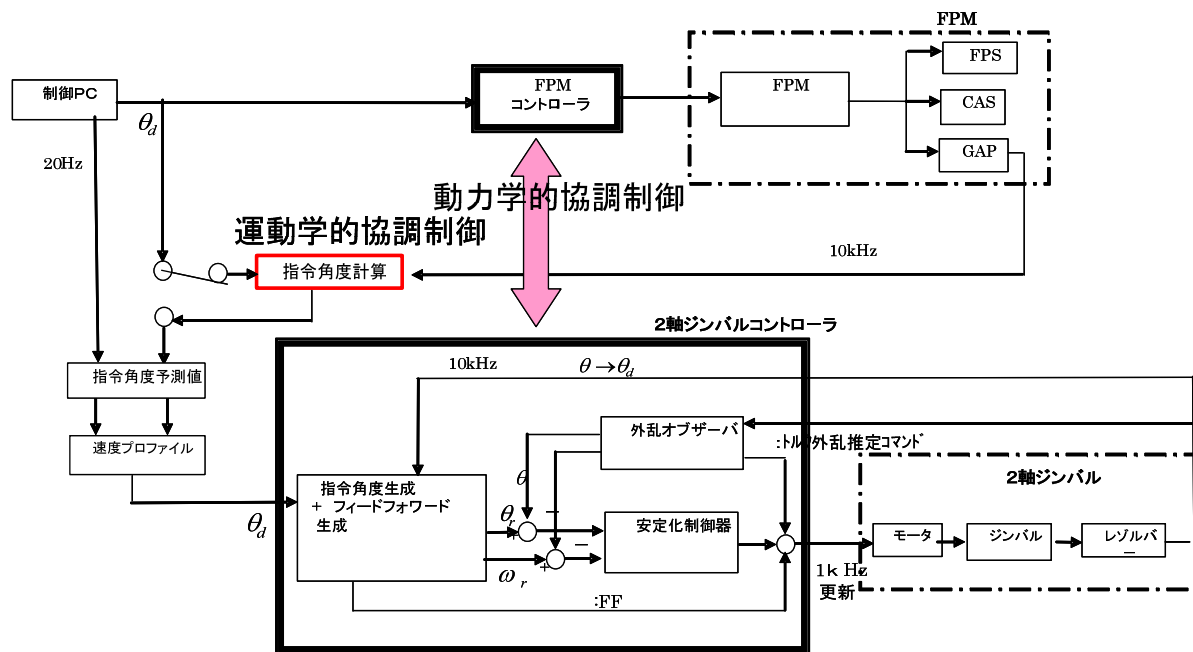


2. 研究開発課題と成果

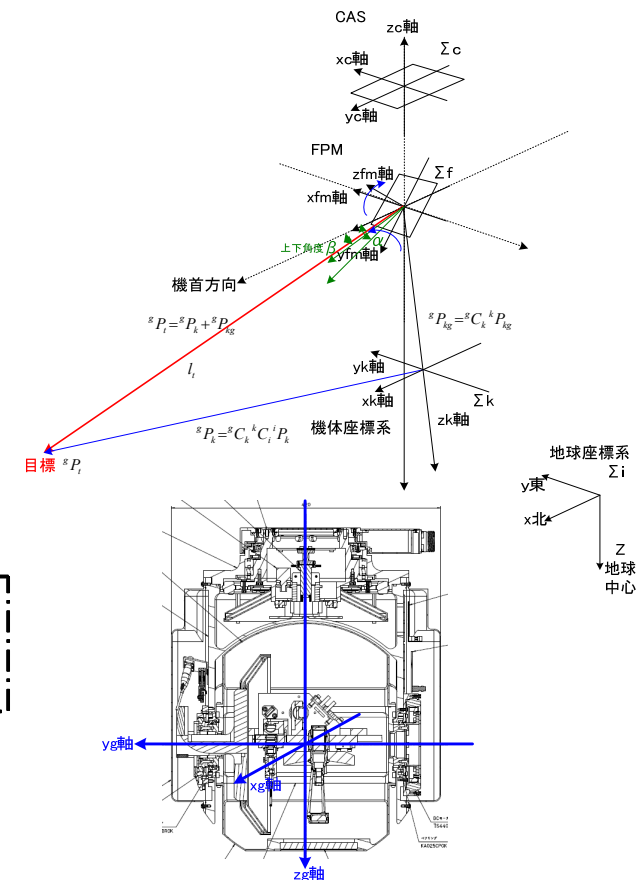
課題3-ウ 協調制御を用いた高速捕捉追尾技術の研究開発

[1] モデルベース協調制御方式

「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、2軸ジンバルとFPMとの間の「運動学的」および「動学的」干渉を同時に補償



協調制御系ブロック図



座標形の定義

2. 研究開発課題と成果

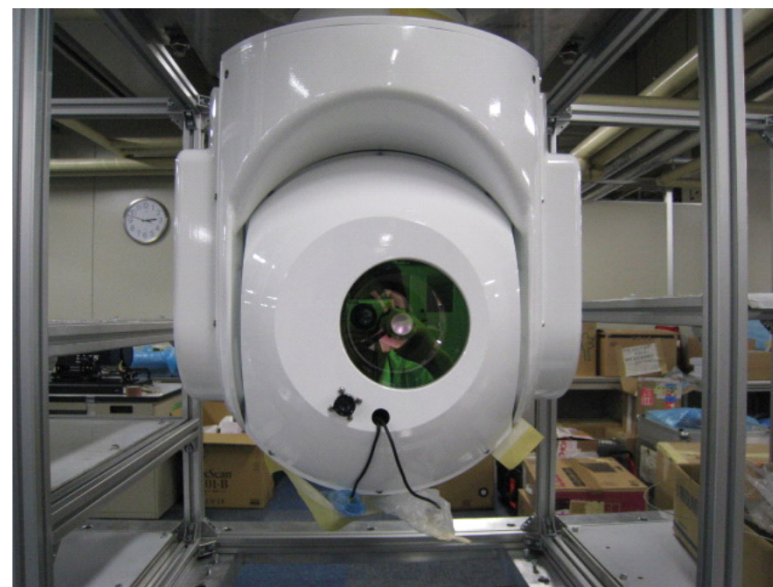
課題3-ウ 協調制御を用いた高速捕捉追尾技術の研究開発

[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、「(a) ミラー駆動型2軸ジンバル」と「(b) 搭載2軸ジンバル」の2種類を試作
- FPMとの協調制御系により、各2軸ジンバルの有効性を実証



(a) ミラー駆動型2軸ジンバル



(b) 搭載2軸ジンバル

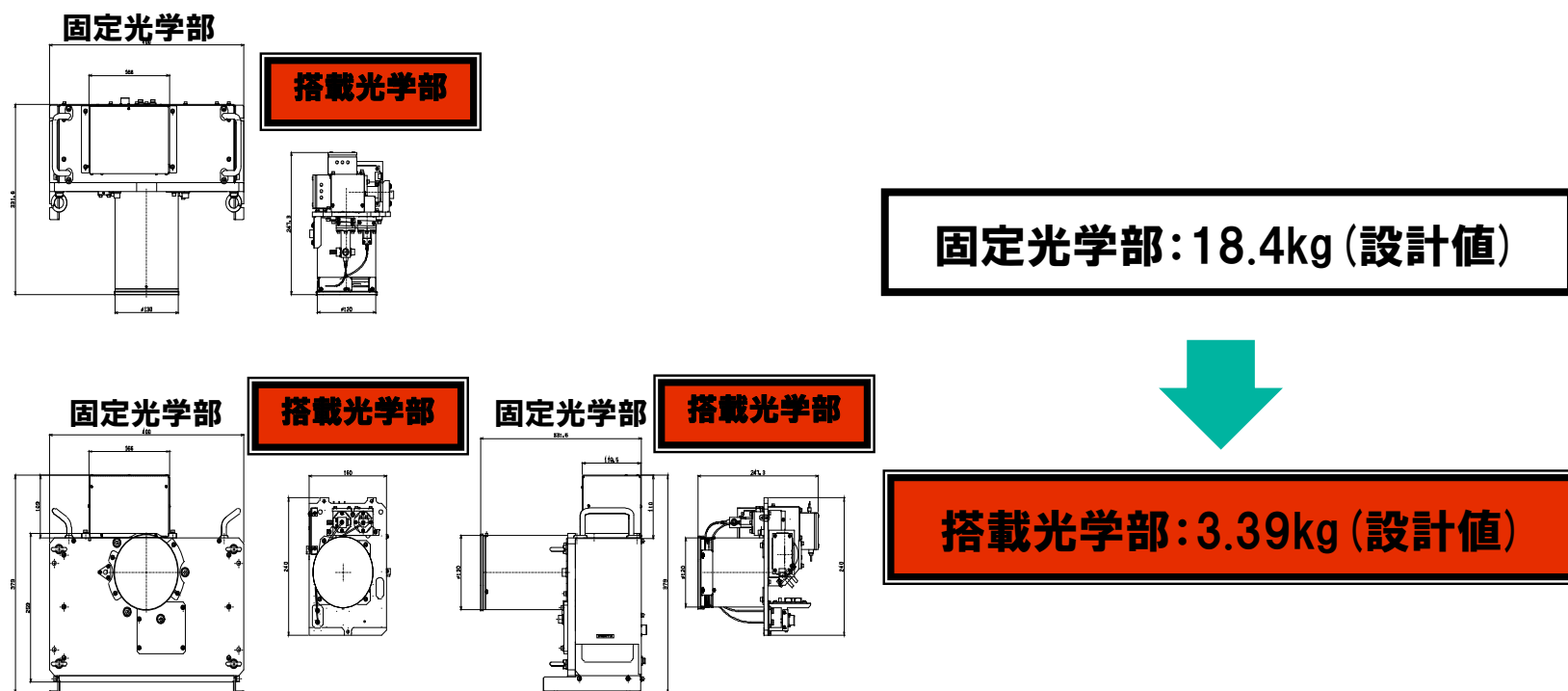
2. 研究開発課題と成果

課題3-ウ 協調制御を用いた高速捕捉追尾技術の研究開発

[3] 受光レベル変動に対して安定動作する光センサ技術

■ 波面センサと可変形鏡からなる波面補償装置を搭載した「固定光学部（質量：18.4kg）」と、小型軽量の「搭載光学部（質量：3.4kg）」を試作

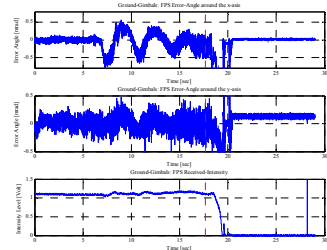
■ 大気揺らぎ等外乱の影響による受光レベルの大きな変動の影響を抑制するため、光QDセンサの高感度化とダイナミックレンジの拡大を実施



2. 研究開発課題と成果

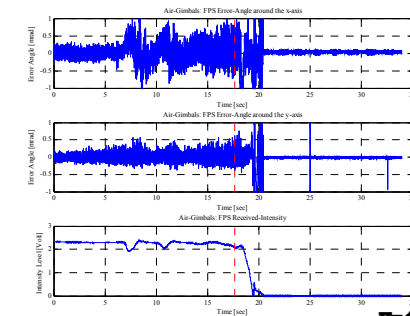
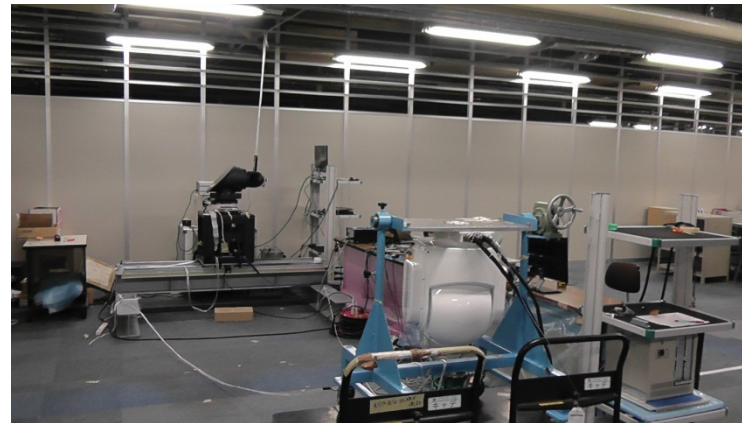
課題3-ウ 協調制御を用いた高速捕捉追尾技術の研究開発

屋内での「簡易的光空間捕捉追尾試験」により、4km先の移動体が140~336km/hで移動しても十分追尾が達成可能であることを実証



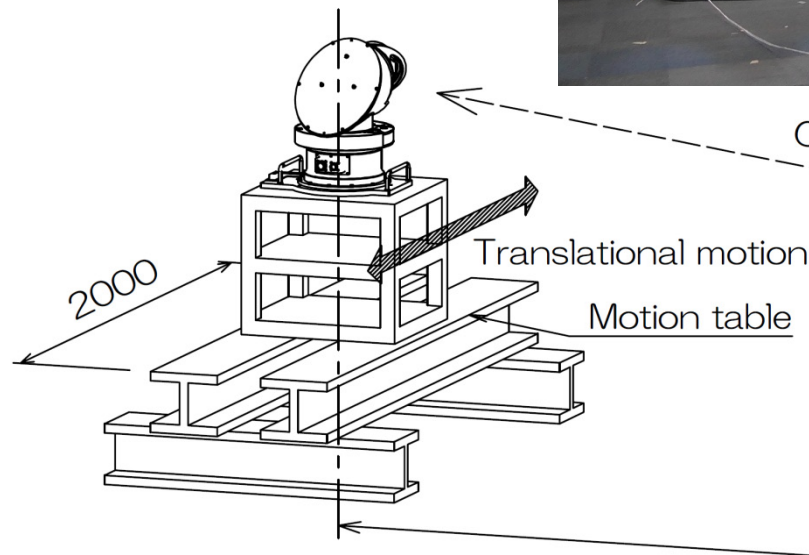
取得
データ例

Ground-Station

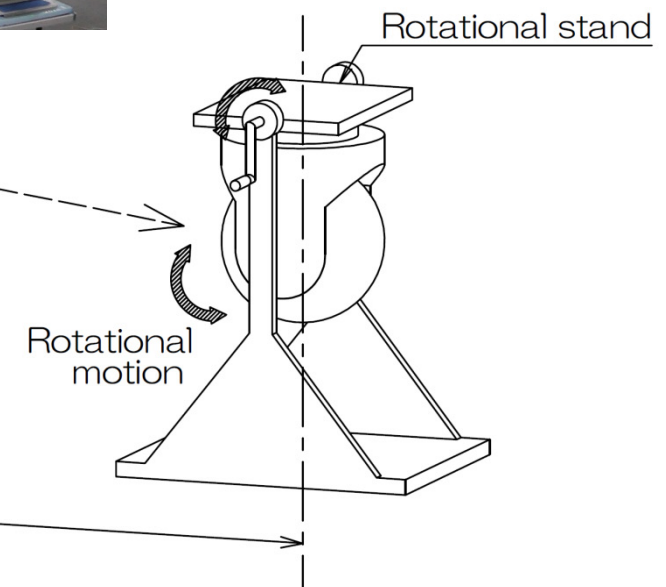


取得
データ例

Air-Station



Optical link



2. 研究開発課題と成果

課題4 実証実験の実施

課題4-ア 捕捉追尾技術の実証

- 概要: 課題3で開発する光移動体通信の**要素技術を捕捉追尾端末として統合し、捕捉追尾技術の性能実証**を行う。
- 成果:
波面補償システムを捕捉追尾端末に組み込み**大気揺らぎ補正効果を定量的に評価**
移動体(トラック)実験を行い、**移動体での捕捉追尾技術を実証**
係留気球実証試験を行い、プログラム追尾、地上局からの初期捕捉を実施

課題4-イ 光空間通信技術の実証

- 概要: 光空間通信プロトコル、デジタルコヒーレント光通信、高精度捕捉追尾を**最適に組み合わせ、光空間通信システムの定量的評価**を行う。
- 成果:
屋外において**40Gbpsデジタルコヒーレント方式の光空間通信実験を世界で初めて達成**

2. 研究開発課題と成果

課題4 実証実験の実施： 長距離実験の概要

波面補償を組み込んだ地上局と、試験局または搭載捕捉追尾端末との間で野外捕捉追尾長距離実験を実施。また、40Gbps Digital Coherent光空間通信を達成



2点間距離：約4.2km



地上局
(波面補償モジュール組込)

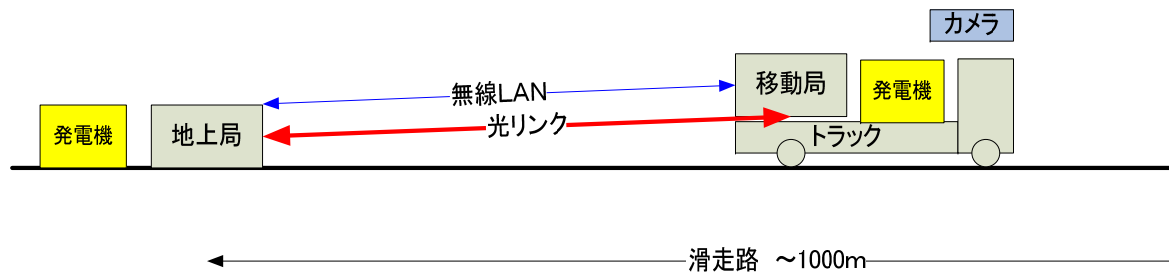


移動局
(搭載装置)

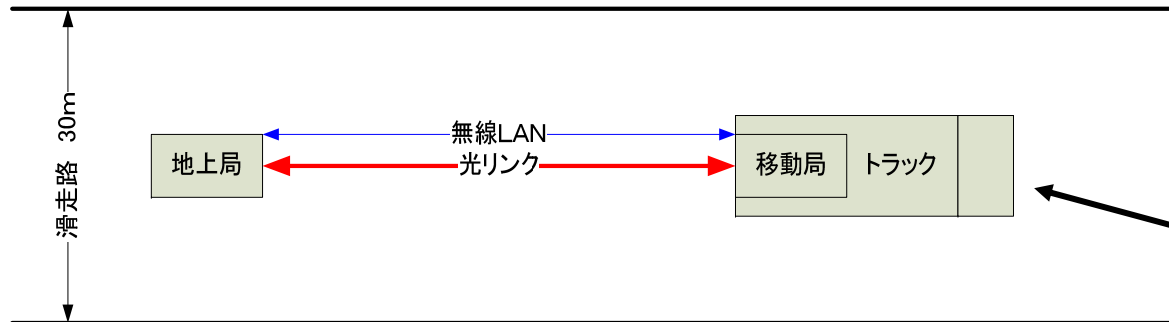
2. 研究開発課題と成果

課題4 実証実験の実施： 移動体実験

移動局(トラック)と地上局との間で捕捉追尾実験を実施
→40Gdps DQPSK光空間通信(プロトコル)を達成 (~370mの範囲)



Top View

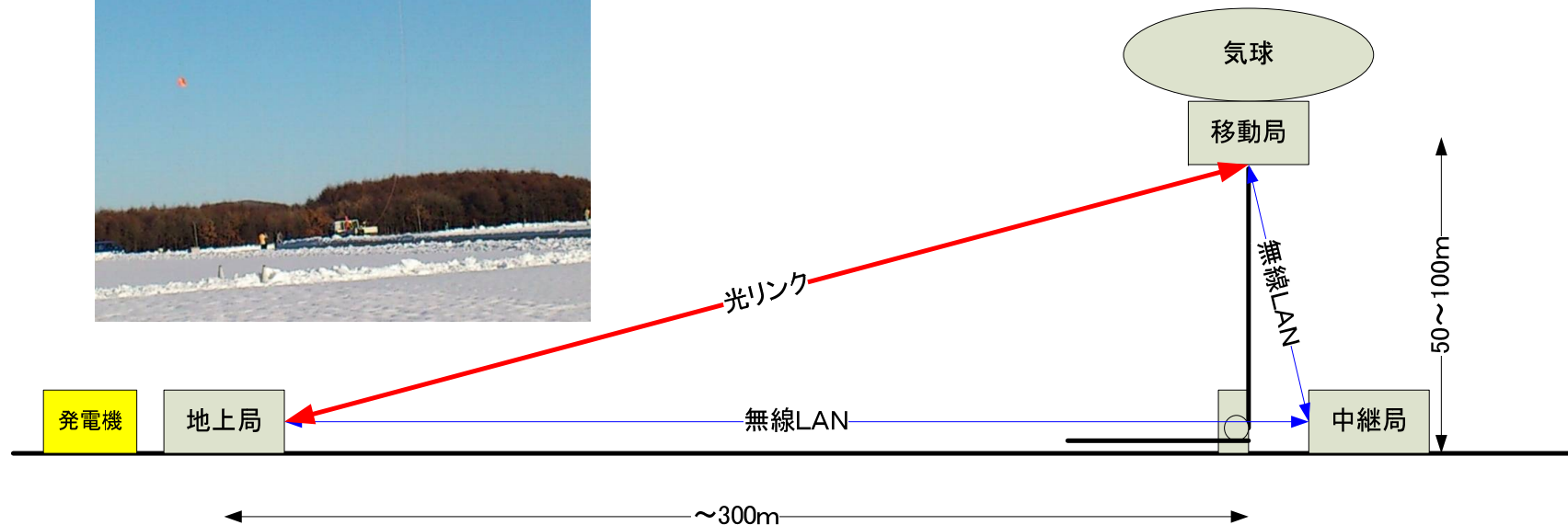
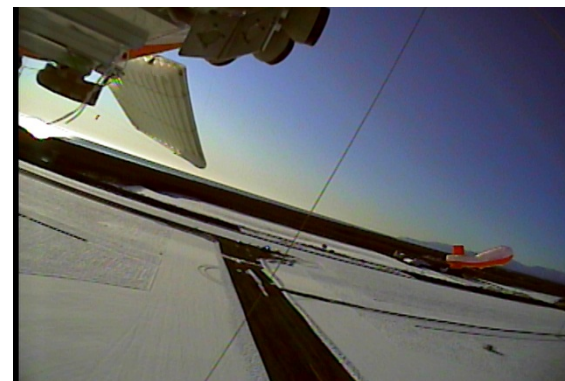


DQPSK: Differential Quadrature Phase Shift Keying

2. 研究開発課題と成果

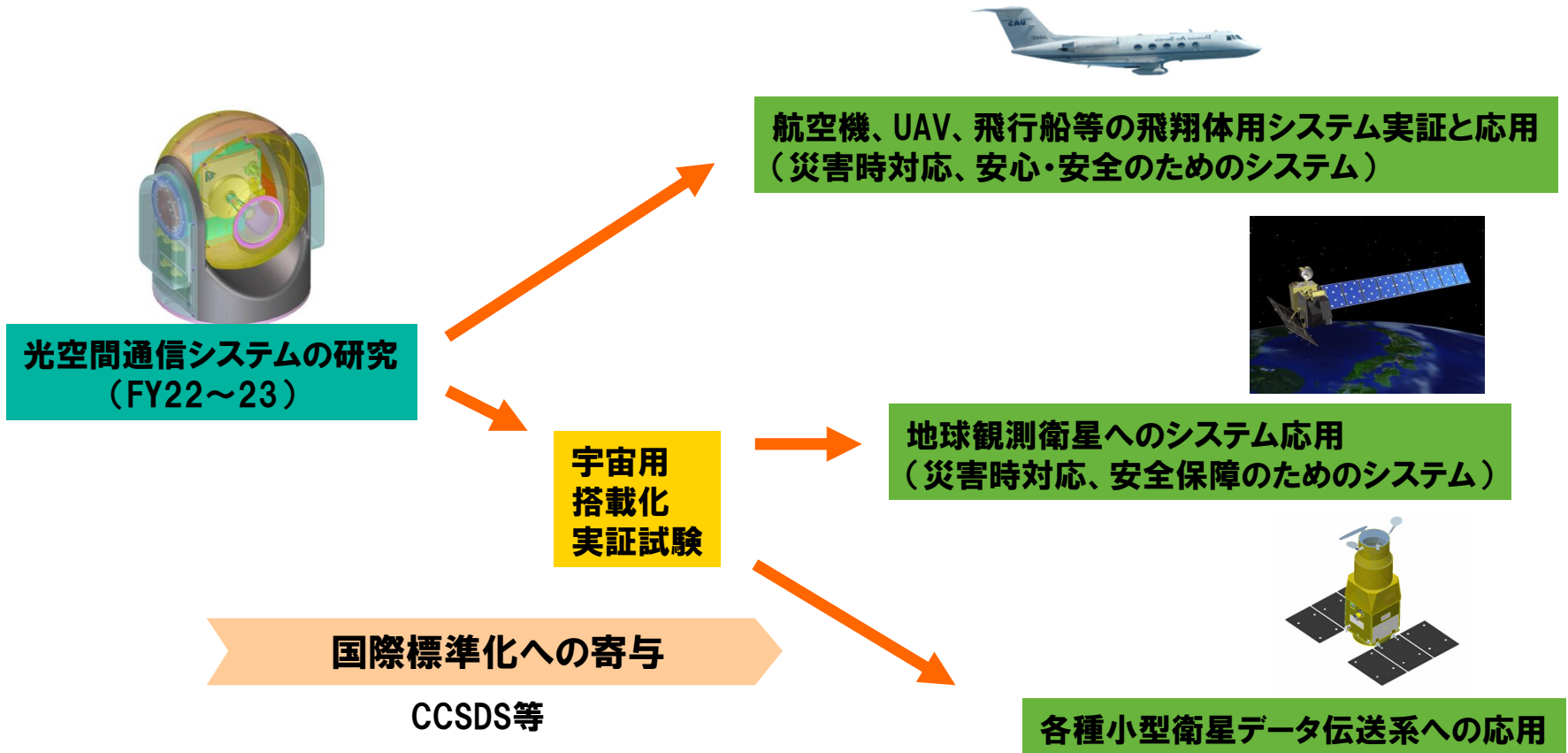
課題4 実証実験の実施： 気球実験

移動局(気球)と地上局の間で捕捉追尾実験を実施
→ 移動局(気球)から地上局の捕捉を確認



3. 普及への取り組み 研究開発成果の展開方針

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。



3. 普及への取り組み 研究開発成果の展開方針(実用化に向けた対応)

■ 航空機搭載用光空間通信システムへの実用化に向けて

- 航空機搭載システムの概念検討を実施
- 航空機搭載実証試験の実施を経て実用化を目指す。

■ 地球観測衛星等システムの概念検討を実施

- 搭載機器の開発に着手し、宇宙実証を目指す。
- 宇宙実証を経て各種地球観測衛星等への搭載実用化を図る。

■ 各種小型衛星データ伝送系への実用化に向けて

- 搭載機器の小型軽量化の検討を実施後、小型衛星への実用化、ビジネス展開を目指す。