

光空間通信技術の研究開発

担当課室名：国際戦略局 宇宙通信政策課

実施研究機関：日本電気（株）

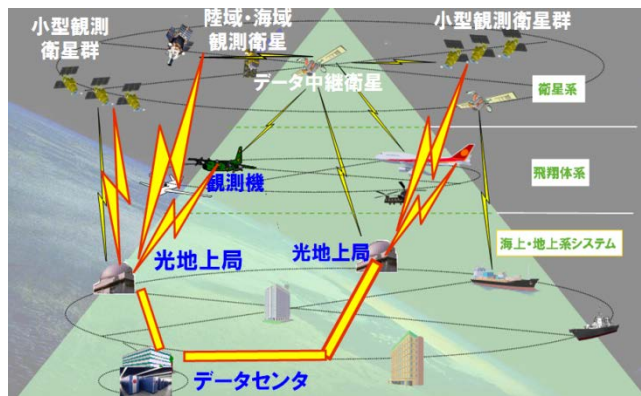
研究開発期間：H22年度～H23年度

研究開発費：H22年5.1億円、H23年4.2億円(H22年補正分) 計9.3億円

1. 概要

○ 政策目標

電波と比較して大容量の通信を可能とする光空間通信技術を確立することにより、観測システムにおける観測画像の高分解能化に伴う通信需要の高まりに応える。これにより観測システムの応用範囲を拡大し、また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可能とすることで、的確な災害対策等に資する等、国民生活の向上、安全で安心して暮らせる社会の実現に貢献する。



○ 研究開発目標

光空間通信プロトコルの開発、光空間通信方式の開発、移動体光通信技術の研究開発を実施することにより、今後の観測衛星やデータ中継衛星等への利用を見据え、大気ゆらぎの存在下における航空機等の移動体との40ギガビット以上の通信速度を可能とする光空間通信技術を確立する。

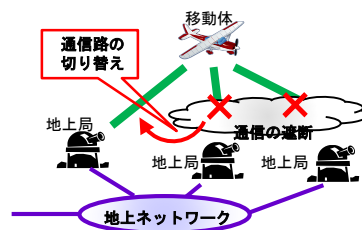
研究開発課題

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（ハンドオーバー技術）
- ◇データ再送信制御技術（高効率プロトコル技術）等の開発

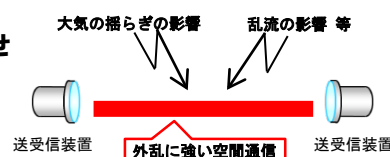


課題2 光空間通信方式の研究開発

【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

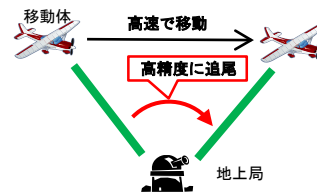


課題3 移動体光通信技術の研究開発

【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】

- ◇高精度高速捕捉／追尾技術
- ◇波面制御技術 等の開発



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. 研究開発成果概要

- 受託者社内の組織を横断し、2事業部、3研究所が力を結集して研究開発を推進
- 諸外国における光空間通信技術研究の進展及び光空間通信の利活用の加速の動き等を鑑みて、当初3年間の開発計画であったが、期間を2年間に、費用も当初計画の2/3以下として実施



実施計画より大幅に効率的に、全般的に世界的レベルで最先端の技術開発に成功

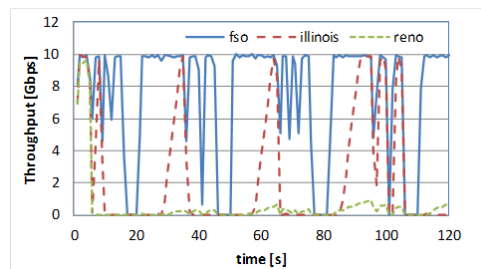
研究開発成果

(1) 光空間通信プロトコルの研究開発

【成果】 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した

<主な成果>

- 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輻輳制御や再送制御、到達データ推定機能等の改良により、従来比10倍以上となるデータ転送スループットを達成した。
- 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し、当初の想定以上となる高速レベル変動(1MHz)を再現。



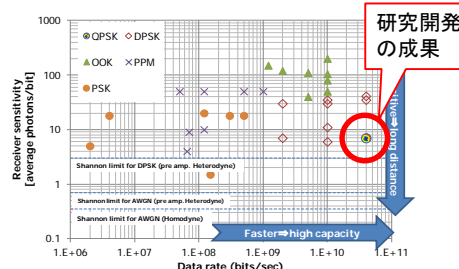
開発したプロトコルは、従来TCPに比べて、10倍以上のデータ伝送スループットを実現

(2) 光空間通信方式の研究開発

【成果】 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、大容量通信に適した誤り訂正方式や変調方式等を選択の上で開発し、移動体との間で40Gbps以上の通信速度を実現できる光空間通信方式を確立した。

<主な成果>

- 単一偏波QPSKデジタルコヒーレント方式や高性能誤り訂正方式の採用により、1波長40Gbpsという高速データ伝送を実現するとともに、当初の想定以上となる世界トップレベルの高感度な受信性能(7 photons/bit)を達成した。(これにより40 km光空間リンクにおいて6 dB以上の受信電力マージンの確保が期待できる。)
- 各々カスケード接続した光増幅器及び光アッテネータの構成の採用により、当初の想定以上となる受光レベル変動許容量(最大振幅25 dB、瞬時応答速度10 kHz)を達成し、「きらり」の光地上局実験で報告されている外乱によるレベル変動値の10倍の環境下でも、安定受信が可能な受信性能を達成した。



研究開発の成果

世界における光空間通信試験との感度比較

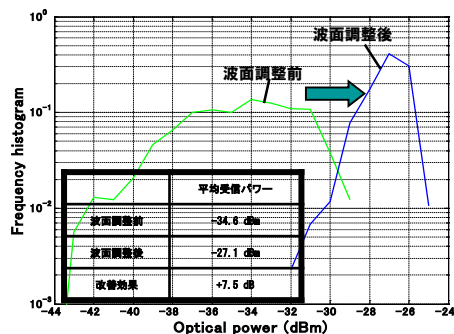
※ 7photons/bitの達成により、本研究開発成果を用いれば、航空機などの移動体との光空間通信に必要な40kmでの伝送に必要な受信電力の確保が可能になった。

(3) 移動体光通信技術の研究開発

【成果】 移動体との光空間通信においても、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捕捉・追尾技術を確立した。

<主な成果>

- 最大振幅 $\pm 4.5^\circ$ (「きらり」の約10倍以上)、制御帯域300Hzの広角・高速性能で追尾可能な、世界トップレベルとなる精捕捉追尾機構を開発した。
- 高速(補正周波数11.2kHz(従来の10倍以上))で波面のゆらぎに応答可能な波面補償システムを採用し、当初の想定以上となる平均受信電力の大幅改善(7~8dB)を達成した。



波面補償技術による受信電力の改善



移動体搭載用光空間通信装置

(4) 実証実験の実施

【成果】 移動体を用いた実証実験を実施し、光空間通信により大気ゆらぎの存在下において移動体との間で40Gbps以上の通信速度を達成した。

3. 成果から生み出された経済的・社会的な効果

<成果の社会展開に向けた取組状況>

- 本研究開発で得られた要素技術開発成果を活用して、航空機搭載モデルをターゲットとして地上局、移動局、光空間通信シミュレータを開発し、NICTに納入。その後、それらの装置を使用して、ヘリコプタ搭載実験の予備実験として自動車による画像伝送実験を実施した。その後、これらの装置に改良及び保守を実施すると同時に、当該地上局に搭載済みの波面補償装置の性能評価を実施した。
- 上記装置を使用したヘリコプタ搭載実験の準備作業として、移動局をヘリコプタに搭載し地上でロータを回転させて振動データ等の基礎データを取得した。
- 衛星搭載品モデルとしては、将来のデータ中継衛星経由での光空間通信のシステム設計を開始。本研究開発で得られた要素技術開発成果を活用し、JAXAから受注したデータ中継衛星による衛星間光通信システム、及びNICTから受注した光フィーダリンク用超高速光トランスポンダを開発中。エンジニアリングモデルを開発中であり、約85%完成している。

<知財や国際標準獲得等の推進>

- 本研究開発の成果を国際標準化機関（CCSDS）にインプットすることにより、 $1\mu\text{m}$ 方式と併記する形で、 $1.5\mu\text{m}$ 方式がオレンジブック（予備検討規格）に採用された。

4. 成果から生み出された科学的・技術的な効果

- 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。
- デジタルコヒーレント受信により1波40Gbpsという高速データ伝送において世界トップレベルの高感度な受信性能(7 photons/bit)を達成。
- 世界初となる各々カスケード接続した光増幅器ならびに光アッテネータの構成により、受光レベル変動許容量として、最大振幅25 dB、瞬時応答速度10 kHzの性能を達成。また、予想される外乱によるレベル変動値の10倍の環境下でも、安定受信可能な性能を達成。
- 補正周波数11.2kHzで高速に応答する波面補償システムを構築し、平均受信パワーの大幅改善(7~8dB)を達成。
- 世界トップレベルの駆動範囲 $\pm 4^\circ$ 、制御帯域300Hzという高速、広角な精捕捉追尾機構を開発するとともに、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し、高速移動体を追尾可能な高速2軸シンバルシステムを開発。

5. 副次的な波及効果

- 衛星搭載、航空機搭載の用途以外に、以下に示す技術的メリットから、地上ネットワーク等へも適用可能。
- 単一偏光QPSKデジタルコヒーレント送受信方式に関する受信部の信号処理技術 → 長距離伝送の阻害要因と予想される偏光間非線形クロストークが、発生しないため、偏光多重QPSK方式と比べ、長距離化が可能となる。
- 高性能・高速誤り訂正符号化方式 → 広帯域無線伝送をはじめとする無線システムにも適用可能であり、幅広い応用が期待できる。
- 光レベル制御技術 → 地上系ネットワーク、特に将来の光スイッチや光パケット技術等を用いた柔軟かつ拡張性の高いネットワークを構築において、応用が期待でき、具体的には、光スイッチ等の経路変換の際に生じる光レベル変動を高速に均一化することで、後段における光信号品質の劣化を抑え、安定したネットワークが可能となる。
- アダプティブオプティクス技術 → 到来する波面の乱れだけでなく、光学系の製造、調整誤差に起因する光空間通信端末内部における効率の劣化も補償できることを実証。

6. その他研究開発終了後に実施した事項等

- 17件の学会発表を行い、本研究の成果を積極的にアピールした。また、査読付き誌上論文も1件発表した。
- 海外も含め、23件の特許申請を行った。
- 光通信プロトコルの研究成果に対し、「第63回(平成27年度)電気科学技術奨励賞(旧オーム技術賞)」を受賞した。

7. 政策へのフィードバック

- 衛星搭載モデルの開発は多くのコストが必要であり、また、高度な技術開発のためにはさらなる研究開発費用が必要となることから、国レベルでの研究開発は必須である。
- 研究開発テーマは、光空間通信における大容量かつ効率良いデータ伝送を行うための技術として必須の技術であり、妥当な設定だったと判断する。
- 本技術開発のターゲットである衛星搭載モデル、航空機搭載モデルは、国レベルでの開発となり、国家予算／政策にも左右され、モデルの完成までに長期間を要する可能性がある。本研究開発に基づく開発も、実用化に向けた当初の想定よりも遅れているのが実情であるが、実用化時点での陳腐化を避けるという観点では、本研究テーマは現時点でも高度な技術となっており、適切な選定テーマだったと判断できる。