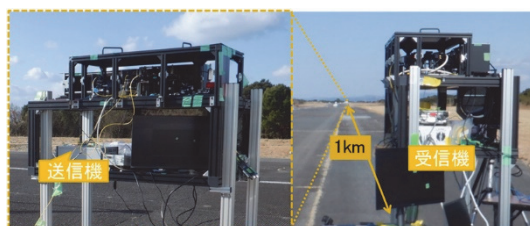


屋外 1km 以上先へ高速大容量通信できる光無線装置の開発

Development of a Free-Space Optical Communication Device Capable of High-Speed, High-Capacity Transmission Over Distances Exceeding 1 km in Outdoor Environments



石川 慎之佑^{*1}
Shinnosuke Ishikawa

松田 竜一^{*1}
Ryuichi Matsuda

野村 航大^{*2}
Kota Nomura

本報では、急増するデータ通信需要に対応する次世代高速通信技術として空間光通信に注目し、その実用化に向けた課題と解決策を検討した。空間光通信は光の直進性や広帯域性を活かし、高速大容量かつセキュアな通信を実現可能であるが、送受信機の設置誤差や、大気揺らぎによる微小な光軸変動が通信品質を低下させる問題がある。設置誤差に対しては捕捉追尾技術を、光軸変動に対しては光軸補正技術を開発し、高速かつ高精度な光軸制御を実現した。そのうえで光ファイバによる通信技術をもつ NTT 株式会社と共同で、屋外 1km の大気揺らぎが強い環境下でも最大 100 ギガビット毎秒の伝送速度を達成し、単位時間当たりの平均伝送速度は 93 ギガビット毎秒を維持できることを確認した。これらの結果は、空間光通信の実用化に向けた重要な成果であり、災害時やインフラ未整備地域、移動体間通信への適用可能性を示している。

1. はじめに

近年、映像配信サービスやクラウドコンピューティング、IoT 機器の急速な普及に伴い、データ通信量は年々増加の一途をたどっている。このため、従来の無線通信や有線インフラのみでは対応が困難になりつつあり、新たな通信方式の必要性が高まっている。そうした背景のもと、空間光通信は、光の直進性や広帯域性を活かした次世代の高速通信技術として注目を集めている⁽¹⁾。

空間光通信は、送信機内で光ファイバから出射した通信光を平行化し、遠方の受信機で再度光を集光させ、光ファイバに結合させることで光ファイバ通信と遜色ない高速大容量な通信を可能とする技術である。通信伝送経路に光ファイバなどの物理的な媒体を用いることなく、柔軟なネットワーク構築が可能となる。特に、災害時に通信インフラ構築が求められる場面、衛星通信や移動体間通信など、インフラの敷設が困難なシーンでの適用が期待されている。

空間光通信は、電波通信と比較していくつか顕著な利点を有する。まず、通信光を用いる空間光通信は数ギガビット毎秒(以下, Gbps)から数テラビット毎秒(以下, Tbps)に達する高速通信が可能である。電波通信では周波数資源が限られており、通信を高速化するには規制や干渉の問題が伴う。他にも、通信光は指向性が非常に高く、空間的に広がらないため漏洩が少なく盗聴等が困難であるためセキュリティ性が高い。さらに、周波数免許や届け出が不要である。

一方で実用化に向けては、通信光を用いることによって生じる特有の課題がある⁽²⁾。例えば、通信光は大気中を伝搬する過程で大気揺らぎの影響を受けることが挙げられる。大気揺らぎは主に温度や圧力の不均一性によって生じる屈折率変動であり、屈折率変動により光軸が乱される。大気揺らぎによって受信側の光ファイバに結合された光強度が時間的に変動するため、結果的に通信断絶や誤り率の増加を招く。長距離伝搬する場合や地表付近を通信光が通過する場合などでは大気揺らぎの影響が顕著となる。空間光通信において安定した通信を確保するためには、大気揺らぎを補正する技術が不可欠である。それだけでなく、通信光は指向性が高いため、設置

*1 総合研究所 電子・物理研究部

*2 総合研究所 電子・物理研究部 博士(工学)

誤差によって大きく結合効率が低下する。そのため、空間光通信では正確な光軸調整が不可欠である。

2. 装置の概要

空間光通信において、通信光は送受信機設置誤差や通信伝送経路上の大気揺らぎにより光軸の変動が生じて、通信断絶や誤り率の増加につながることは前章で説明した。この課題を解決するためには、設置誤差や光軸変動を検出し、補正する技術が不可欠である。本報では、設置誤差に対しては捕捉追尾技術を、大気揺らぎ等による光軸変動に対しては光軸補正技術を開発したので詳細に紹介する。

図1に空間光通信装置の全体概念図を示す。本装置からデータを送信する場合、図1に示す光源(Tx)から光ファイバを介し通信光を出射する。通信光はファイバサーキュレータ(Fiber circulator 以下、FC^{*1})を通してファイバ端から空間に出射され、ビームスプリッタ(Beam Splitter 以下、BS^{*2})、高速ステアリングミラー(以下、微動鏡^{*3})、ロングパスダイクロイックミラー(Long Pass Dichroic Mirror 以下、LPDM^{*4})、捕捉追尾ジンバルミラーを順に通過し遠方に出射される。対してデータを受信する場合の通信光は逆の経路をたどり、Txと異なるFC出口から受信光デバイス(Rx)に至る。

本報において開発した捕捉追尾技術は、図1に示すように通信光と、ビーコン光を同軸に配置する。具体的には、LPDMを用いて通信光とビーコン光を合成し、単一の光軸から出射する構成とした。ビーコン光は可視波長を選定することで、受信側で容易に検出可能となる。受信側では、可視カメラを用い、ビーコン光を発する通信装置を撮像する。可視カメラ画像において、通信装置の位置が視野中心からどの程度偏位しているかを算出する。この偏位情報は、図1に示す捕捉追尾ジンバルミラーの制御系にフィードバックされる。捕捉追尾ジンバルミラーは電動アクチュエータにより高精度で角度調整が可能であり、偏位量に応じてミラー角度を補正することで、通信装置が可視カメラ画像の中心に位置するよう追尾する。この操作を送受信局双方で実施することにより、設置誤差を相互に補正し、通信光を光ファイバに安定して導くことが可能となった。本技術は将来、高速・高精度に制御することで移動体通信への活用が期待される。

次に、本報において開発した光軸補正技術は、図2に示すように四分割ディテクタ、微動鏡、ビームスプリッタから構成される。四分割ディテクタは、受光面を4つの領域に分割した光検出器であり、入射する光強度分布の重心位置を高精度で検出することが可能である。通信光が理想的な光軸から変位した場合、各領域に入射する光強度の差異を解析することで、光軸の変動方向と量を算出する。光軸変動の検出は数kHz以上の速度で行うことが可能であり、乱流や機械振動によって生じる変動も検出可能である。微動鏡は圧電素子によってミラーを微小・高速に傾斜させるステアリングミラーであり、図3に開発した微動鏡を示す。微動鏡には直径1インチの小型ミラーを取り付け、高速化のため、X軸、Y軸に機器を分割した構成とした。四分割ディテクタからの光軸変動情報に基づき、微動鏡の傾斜角度をリアルタイムにフィードバック制御することで、通信光を四分割ディテクタの中心に正確に導くことが可能となる。このとき、微動鏡と四分割ディテクタの間にビームスプリッタを配置し、分岐した通信光を光ファイバに結合させた。分岐した通信光は四分割ディテクタ及び光ファイバの双方で同位置に集光する光学的共役関係である。したがって微動鏡を制御することで通信光が四分割ディテクタの中心に導かれるとき、必ず光ファイバの中心にも通信光が導かれる。以上の構成によって光軸変動に対しても常に光ファイバに通信光を結合させることが可能となり、通信品質向上につながった。

*1 光ファイバ内で反対方向に伝搬する光信号を取り出すことが可能なデバイス

*2 入射するビームパワーの一部を反射させ、残りを透過させる機能を持つ光学素子

*3 アクチュエータで高速に上下・左右の任意角度に制御可能なミラー

*4 可視光より長波長の通信光を透過し、可視光を反射させる光学素子

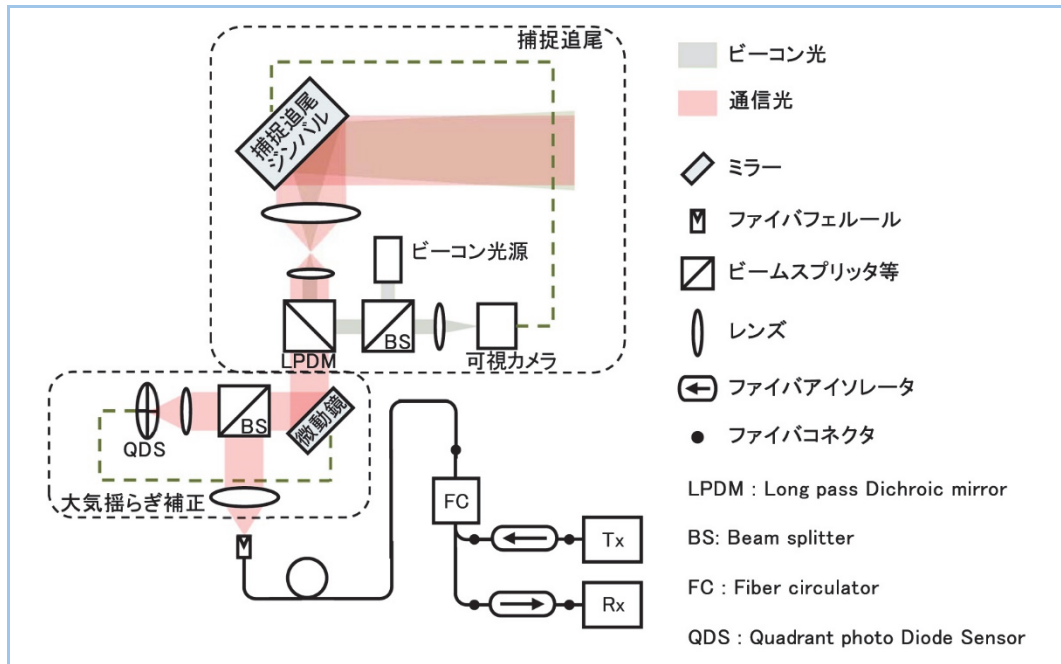


図1 空間光通信装置全体概念図

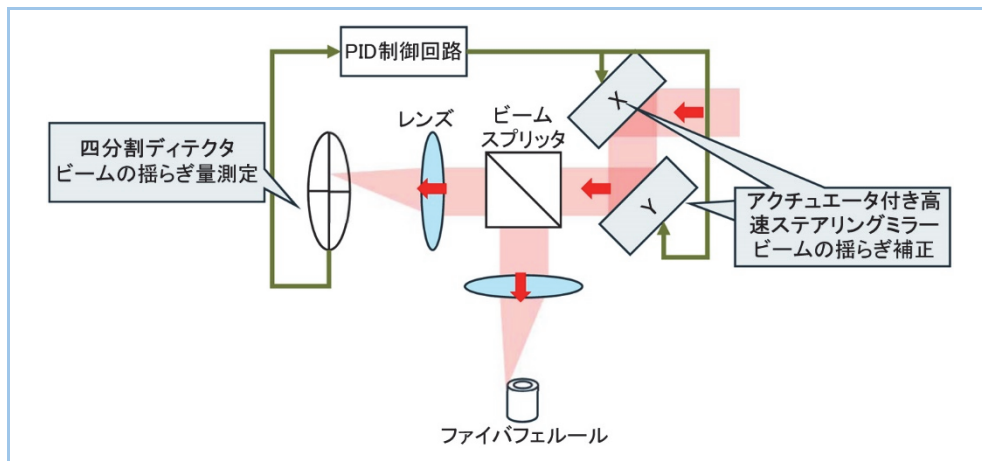


図2 大気揺らぎ補正技術

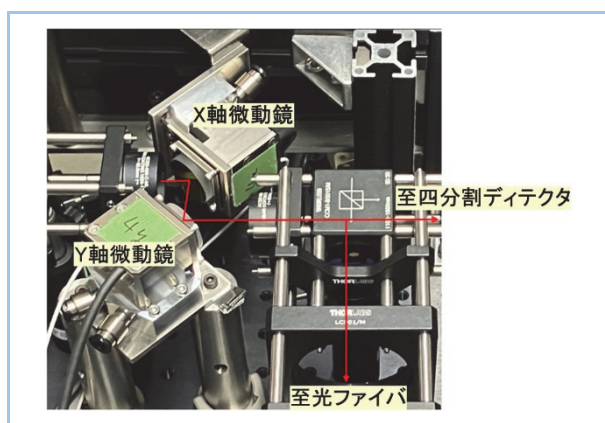


図3 開発した微動鏡と周辺の空間光通信光学系

3. 屋外 1km 伝送実験及び結果

開発した空間光通信装置を 1km の距離で対向させ、屋外の大気揺らぎ環境での実証実験を行った(図 4)。実験では、100Gbps 光信号を伝送し、単位時間当たりの伝送速度(以下、スループット)の測定と、大気屈折率構造定数(以下、 C_n^2)の測定を行った。光送受信機には光ファイバ通信で一般的に用いられる 100Gbps デジタルコヒーレントトランシーバ(波長:1550nm, 変調方

式: Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying) を用い, Viavi 100G 光テストにて 0.1 秒間隔で 30 秒間スループットを測定した。 C_n^2 の測定には大気揺らぎによる屈折率変動を遠隔光源の受光強度の変動として検出するシンクロメータ (BLS900) を用いた。

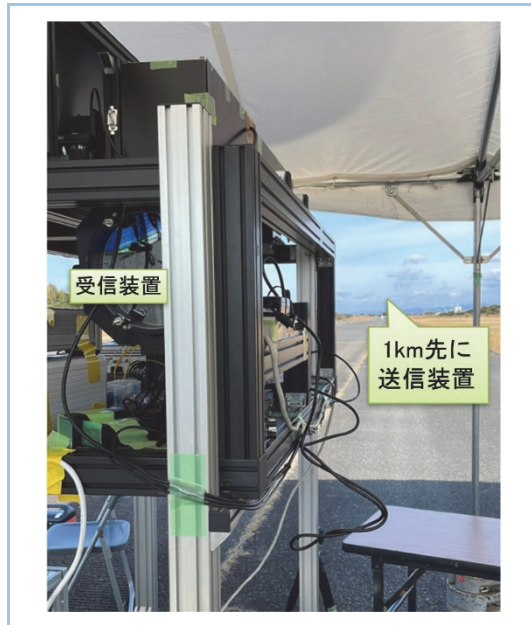


図4 屋外 1km での試験の様子

C_n^2 は、通信の安定性や品質に影響を与える重要な因子であり、特に大気揺らぎがある環境での通信性能を評価する際に考慮すべきパラメータである。具体的には、 C_n^2 の値が小さいほど、大気の屈折率変動の影響が小さく、より安定した通信が可能となる。 C_n^2 の値は、一般的に日中の地表付近で生じる強い揺らぎが $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ から $1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 、夜間や上空で生じる弱い揺らぎは $1 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ から $1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 程度であると知られている⁽³⁾。

屋外実験における C_n^2 は、日中の測定結果から、 $1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ から $1 \times 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ の範囲で変動することを確認した。後述のスループット測定時においては $C_n^2 \cong 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ であり、一般的に強い大気揺らぎに相当する環境であった。

図 5 に、屋外 1km・100Gbps 伝送実験におけるスループットを 30 秒間測定した結果を示す。測定の結果、強い大気揺らぎ環境においても最大 100Gbps を達成した。また、図 5 によるとスループットが一時的に低下している。これは先述の大気揺らぎの補正を行っても残存する大気揺らぎや装置の振動等によって一時的に通信光が光ファイバ端に結合せず、瞬間的な通信断絶が起こることに起因する。スループットの測定は 0.1 秒間隔で行っているが、例えば 0.02 秒間の通信断絶があった場合、スループットは $(0.1 - 0.02) / 0.1 \times 100 \text{ Gbps} = 80 \text{ Gbps}$ となる。また測定した 30 秒間における平均スループットは 93Gbps であった。

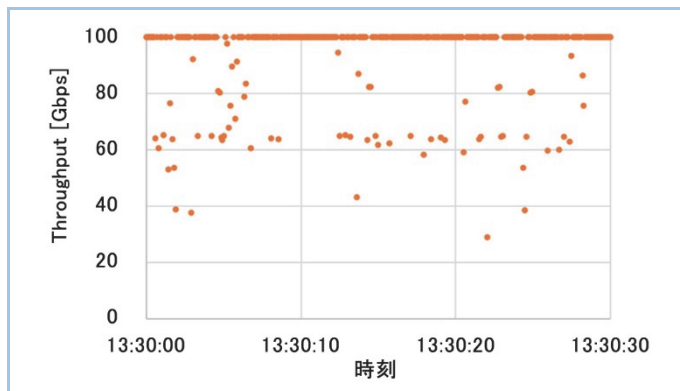


図5 屋外 1km 伝送実験におけるスループット測定結果

4. まとめ

空間光通信はこれまで人工衛星間におけるネットワークへの実機適用が進んできた。本報での技術開発によって揺らぎのある大気圏内における実機適用を推進することが可能となった。例えば、即応性を活かした災害時の臨時通信回線や、高速大容量性を活かした自動運転車・鉄道車両間等における移動体通信、または工場内のロボット間通信等電波干渉を避けたいシーンへの適用が考えられる。

今後は移動体への通信が可能となるよう相手局のリアルタイム捕捉追尾技術などの研究開発を推進する。

最後に、本報における研究開発の遂行にあたり、NTT 株式会社には実験におけるデータ伝送、スループット測定、大気屈折率構造定数の測定に関して多大なるご協力を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 大津留 豪ほか, 非地上系ネットワーク (NTN) における HAPS の研究開発, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, 19 巻 1 号, 2025, p. 6
- (2) 有本 好徳, 10Gbit/s 以上の高速大容量を実現した光無線通信装置の大気揺らぎ環境下における伝送特性, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J96-B No.3, 2013, pp.330-338
- (3) L. C. Andrews, et al., Laser Beam Propagation through Random Media, SPIE Press, Bellingham, 1998 pp.43-64