

光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信技術の研究

Research on high-capacity, efficiency, flexible optical communication technologies using optical vortex



岸川 博紀 (Hiroki KISHIKAWA, Ph. D.)
徳島大学 ポスト LED フォトニクス研究所 准教授
(Associate Professor, Institute of Post-LED Photonics,
Tokushima University)
電子情報通信学会 米国電気学会 米国光学会
研究専門分野：光通信工学 光信号処理

あらまし

スマートフォンの普及や動画配信サービスの充実、新型コロナウイルスの影響で年々増加する通信データ量に対応するため、ネットワークには更なる大容量化と柔軟性・高効率性が求められる。この実現技術として光渦がある。本研究は光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信ネットワークの実現を目的とし、本稿では多重分離技術の課題と解決策について検討する。光渦はその特徴的な螺旋位相構造を保つ必要があるが、光送受信機間の光学素子配置誤差や、伝搬空間中の大気の揺らぎが原因で受信光ビームの螺旋位相構造が保たれなくなり、多重分離性能に影響を及ぼすことが考えられる。本研究では光学素子の配置誤差と大気の揺らぎが多重分離性能にどのように影響を与えるかを評価し、その影響を補償する方法を提案する。パイロットビームを用いて誤差の特徴量を抽出し、受信機側でデータビームの位相を制御し適応的に補償する手法を考案し、計算機シミュレーションで評価した。

1. 研究の目的

我が国の通信データ量の状況は、総務省報道資料によると2021年11月時点の総ダウンロードデータ量は前年比19.3%増の約23.6テラビット毎秒と年々増加している。高速光インターネット接続やスマートフォンの普及、動画配信サービスの充実に伴い、また新型

コロナウイルスの影響によるリモートワークの拡大などが後押しとなり、今後も通信データ量の増加が続くと予想されている。このような通信を支えるネットワークへの要求条件として、更なる大容量化に加え、データ量の変動に対応する柔軟性を持たせ、高効率に運用することが求められる。

大容量化と柔軟性、高効率性の実現技術として光渦がある。軌道角運動量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 光ビームとも呼ばれる。光渦は新たな多重化の次元として期待されており、所望の伝送容量に応じて適用することで、大容量化だけでなく高柔軟、高効率な光通信ネットワークの実現に寄与できると期待される。本研究では、光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信ネットワークの実現を目的とし、(1) 光渦の多重分離技術、(2) 光渦の光ファイバ伝搬中のモード変換技術、(3) 光渦に重畳した変調方式変換技術进行研究してきた。本稿では特に(1)の多重分離技術について、課題と解決策について検討した結果を述べる。

2. 研究の背景

光渦、あるいは軌道角運動量光ビームは光波伝搬の物理的性質を用いて光ビームに軌道角運動量 (OAM) を持たせた光のことである[1]。

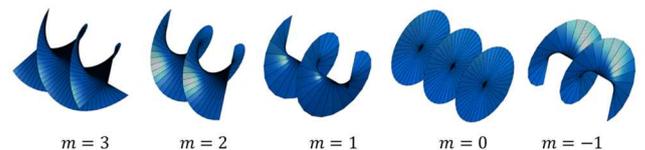


図1 軌道角運動量光ビームを特徴づけるらせん状の等位相面

図1に示すように、OAM光ビームは螺旋状の等位相面を持ち、絡み合う螺旋の数で次数 m が決まり、異なる次数 m の値を持つビームは互いに直交していることが特徴である。したがって、異なる次数 m のビームそれぞれに情報を載せて多重化することが可能であり、従来用いられてきた多重化の物理量である直交変調、波長、偏光、空間に次ぐ新たな多重化の次元として期待されている。この新たな多重化を所望の伝送容量に応じて適用することで、大容量化だけでなく高柔軟、高効率な光通信ネットワークの実現に寄与できる

光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信技術の研究

Research on high-capacity, efficiency, flexible optical communication technologies using optical vortex

と期待されている。

OAM 光ビームはモード間の直交性を活かした多重化が可能である。送信時に多重化した OAM 光ビームは、受信機において情報ビットを復号するために多重分離する必要がある。高効率な多重分離技術としてモードソーティング法が提案されている[2]。モードソーティング法は空間光変調器 (Spatial Light Modulator, SLM) やレンズ等の光学部品を用いて、多重化した OAM 光ビームに含まれる次数に応じて異なる位置に光を収束させ、その集光位置に応じて含まれる次数を判別するものである。複数次数を同時に判別可能であることに加え、逆方向に伝搬させて使うと多重化が可能であることから、多重・分離の手法として有用である。

3. 研究の方法

3.1 送受信機の配置誤差の影響評価と適応補償

OAM 光ビームはその特徴的な螺旋位相構造を保つ必要があるが、光送受信機間の光軸がずれていたり、光学素子配置誤差があったりすると、受信光ビームの螺旋位相構造が保たれなくなり、モードソーティングの多重分離性能に影響を及ぼすことが考えられる。本研究では光学素子の配置誤差が多重分離性能にどのように影響を与えるかを評価し、多重分離技術の実現課題を明確化する。加えて、配置誤差を補償する方法を提案する。受信した OAM 光ビームから誤差の特徴量を抽出し、それに基づいて受信機側で OAM 光ビームの振幅・位相を制御し適応的に補償する手法を考案し、計算機シミュレーションで評価する。

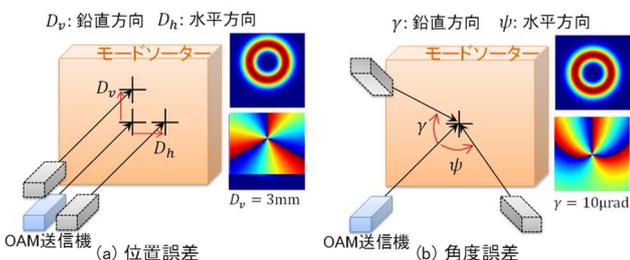


図2 位置誤差と角度誤差の定義

図2に示すように、まず配置誤差として送受信機間の中心軸がずれる位置誤差と、受信機と入射光が正対

せずに角度がずれる角度誤差を定義した。

これまでの検討の結果[3,4]、図2(a)に示す位置誤差は伝搬光ビーム直径のおよそ±20%程度まで許容でき、自由空間光通信で用いられる数 km 程度の伝搬距離であっても位置調整が十分可能であることを明らかにした。一方図2(b)に示す角度誤差は 1000 分の 5.7 度 (100 マイクロラジアン) 以内に抑える必要があり、手動での調整は困難で、自動的に補償する手法を考案する必要があることを明らかにした。鉛直方向の角度誤差に対する影響評価結果を図3に示す。縦軸にはクロストーク(XT)をとっており、この値が小さいほうが良く、許容できる XT 値として-3dB を考慮すると、角度誤差は 100 マイクロラジアン以内に抑える必要があることが分かる。

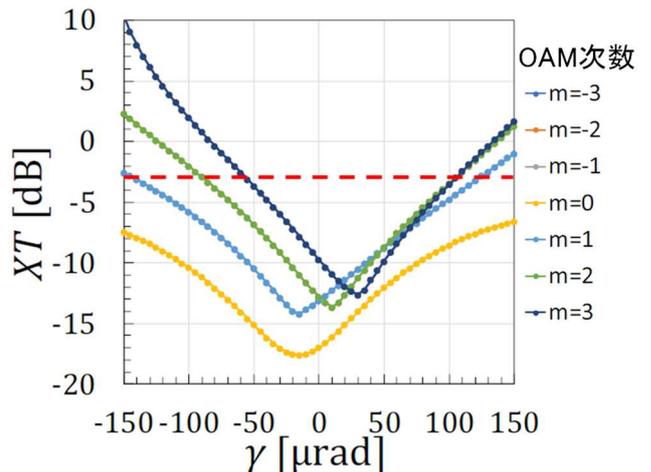


図3 角度誤差の影響評価結果

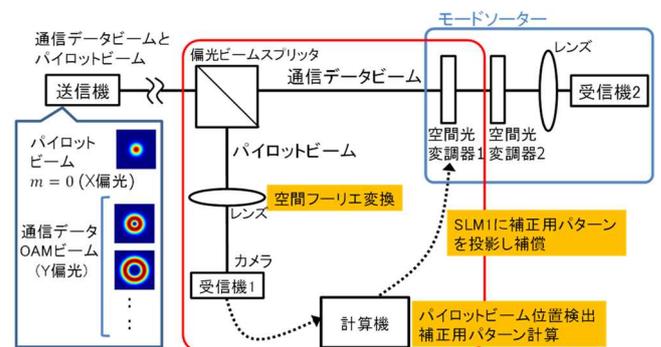


図4 角度誤差の適応補償法の構成図

これらの影響評価の結果、角度誤差の影響が顕著であるため、適応補償法の考案では角度誤差を対象にす

光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信技術の研究

Research on high-capacity, efficiency, flexible optical communication technologies using optical vortex

ることを決定した。角度誤差の適応補償法を検討し、パイロットビームを用いる方法を考案した。図4に適応補償法の構成図を示す。通信データを送る OAM 光ビームとは別に、角度誤差を検知する専用のパイロットビームを用いる。通信データ OAM 光ビームとパイロットビームを同軸で自由空間伝送することで、両ビームに等しい角度誤差が付与される。受信機でパイロットビームを分離し、その角度誤差をレンズを用いた空間フーリエ変換を施すことにより検知する。検知した角度誤差を打ち消すような補正位相を計算し、通信データ OAM 光ビームにその補償を施すことで、角度誤差の影響を抑えることができる。

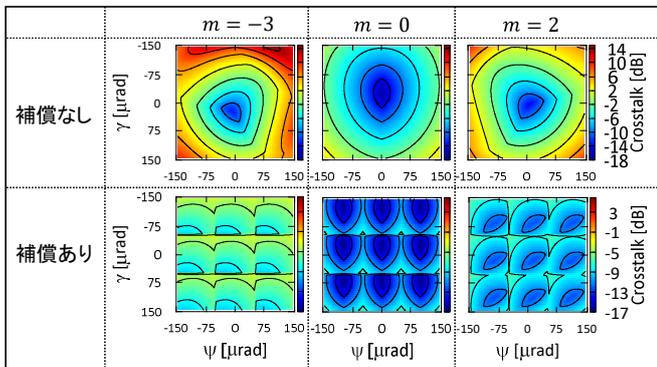


図5 鉛直・水平方向の角度誤差に対するクロストーク計算結果

本手法の有効性を計算機シミュレーションで評価した。図5に計算機シミュレーションの結果を示す。補償なしと補償ありで分け、各図の縦軸が鉛直方向の角度誤差、横軸が水平方向の角度誤差の量を表す。等高線図の色の違いが評価指標であるクロストークを意味し、値が小さいほど(色が青色に近いほど)信号品質劣化が少なく品質が良いことを示す。OAM ビームの次数を $m=-3,0,2$ の場合で補償の有効性を検証した結果、許容できる100マイクロラジアン毎に補償することで角度誤差に対してクロストークが低減できていることが分かり、角度誤差の影響を抑えて受信信号品質を高めることができることを明らかにした。

3.2 大気擾乱による位相変動の影響評価と適応補償

OAM 光ビームを用いた自由空間伝送では、送受信

機間の光学素子の配置誤差だけでなく、伝搬空間中の大気の擾乱(揺らぎ)が原因で OAM 光ビームの位相分布が乱れて受信信号品質が劣化することも重要な課題である[5]。そこで本研究では、大気の揺らぎによる受信信号品質の劣化を補償する方法を検討する。大気の揺らぎは温度分布、風、気圧などの影響で時間・空間に対し確率的な振る舞いをするため、やはり適応的に補償する必要がある、受信した OAM 光ビームから揺らぎの特徴量を抽出し、それに基づいて受信機側で OAM 光ビームの位相を制御し適応的に補償する手法を考案し、計算機シミュレーションで評価する。

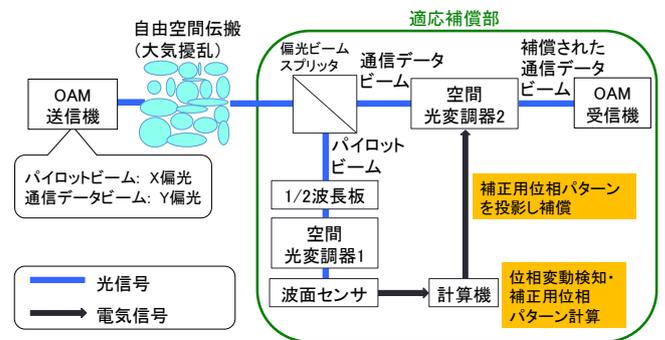


図6 大気の揺らぎによる位相変動の適応補償法の構成図

図6に大気の揺らぎに対する適応補償法の構成図を示す。図4で用いた専用のパイロットビームを用いる手法が適用でき、類似の光学系が使えるため着想に至った。図4と同様に通信データを送る OAM 光ビームとは別に、大気の揺らぎを検知する専用のパイロットビームを用いる。通信データビームとパイロットビームを同軸で空間伝送することで、両ビームに等しい変動が付与される。受信機でパイロットビームを分離し、その位相変動を波面センサを用いて検知する。検知した位相変動を打ち消すような補正位相を計算し、通信データビームにその補償を施すことで、大気の揺らぎが原因で生じる位相変動の影響を抑えることができる。

本手法の有効性を計算機シミュレーションで評価した。大気の揺らぎは Modified von Karman モデルで生成した位相スクリーンを送信ビームに乗算し、その後ビーム伝搬法によるフレネル回折計算を施すことで自由空間伝搬を模擬した[6]。大気の揺らぎの強さを示すパラメータに大気構造定数 C_n^2 があり、この値が大

光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信技術の研究

Research on high-capacity, efficiency, flexible optical communication technologies using optical vortex

きいほど大気の揺らぎが強く、小さいほど揺らぎが弱い状況を模擬できる。

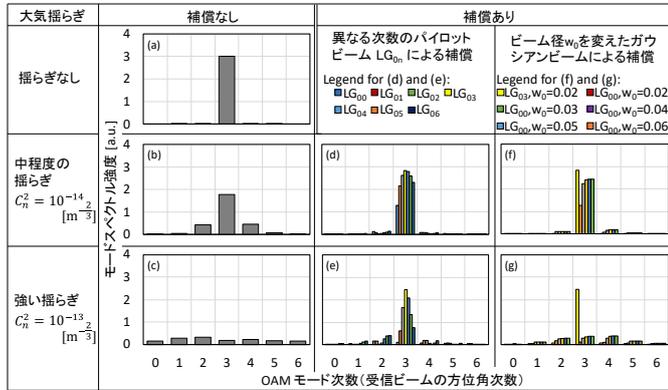


図7 大気の揺らぎに対する適応補償の有無による受信信号品質計算結果

図7に、大気の揺らぎに対する適応補償の有無による受信信号品質の計算結果を示す。受信信号品質は、送信データビームの次数3が正しく判別できているかをモードスペクトル強度で評価した。図7(a)に表すように、大気揺らぎがない場合は、適応補償をしなくても受信データビームの次数3が強く表れており、送信データビームが正しく受信できていることがわかる。一方、図7(b)や(c)に表すように、中程度および強い大気揺らぎの中をデータビームが通過すると、補償なしの場合は受信データビームの次数は3以外にも周辺部に現れ、判別が困難になり、信号品質が悪くなることがわかる。適応補償を行うと、図7(d)や(e)に表すように次数3の強度が回復してきており、受信データビームの信号品質が改善することがわかる。パイロットビームの次数をデータビームの次数と一致させた方が改善効果が高い。図7(f)および(g)は、パイロットビームとして次数0のガウシアンビームを用いた場合の補償結果である。左端の黄色の棒グラフは図7(d)や(e)で最も補償効果の高かった、通信データビームと同じ次数3のパイロットビームを用いたものであり、それより右の棒グラフは次数0のガウシアンビームのビーム径を変えた場合のものである。ガウシアンビームのビーム径を変えることで、通信データビームの領域を覆うことができるため、改善効果が高まるのではないかと予想したが、そのようにはならず、結果を見ると次数

3のパイロットビームが最も良い。これはガウシアンビームで覆うことはできているが、大気の揺らぎの影響が次数3の通信データビームと次数0(ガウシアン)のパイロットビームで異なるためである。パイロットビームの次数はデータビームの次数と一致させた方が改善効果が高いことが分かった。

4. 将来展望

OAM 光ビームを用いた自由空間光通信の適用先として、宇宙空間光通信、水中光無線通、室内での光無線 LAN (Li-Fi)、携帯電話基地局やビル間の光無線通信、等が考えられる。この中でも特に水中光無線通信は、海中を含めた沿岸域において、海洋資源の調査、海沿岸施設の監視、港湾施設や橋脚・ダムなどの水中構造物の点検等を効率化するため、母船やブイから海中に設置された中継器を経て、多数の自律型無人探査機や遠隔操作型無人探査機と同時に接続して通信を行うものである。通信容量を向上させる技術、および多数の無人機の同時接続を可能とする技術として光ファイバ通信で用いられる波長分割多重技術の適用が考えられるが、水中での電磁波の減衰が小さいのは青～緑の可視光線波長であり、水の濁度に応じて最適波長が異なるため、波長分割多重技術のようにレーザー光の色を変えて通信を行うのは困難であると想定される。そこで OAM 光ビームを用いた OAM 多重によって、水中光無線通信の通信容量の向上と同時接続数の向上が期待できる。

おわりに

本研究は光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信ネットワークの実現を目的とし、多重分離技術の課題と解決策について検討した。光送受信機間の光学素子配置誤差や、伝搬空間中の大気の揺らぎが原因で受信光ビームの螺旋位相構造が保たれなくなり、多重分離性能に影響を及ぼす。この影響を評価し適応的に補償する方法を提案した。パイロットビームを用いて誤差の特徴量を抽出し、受信機側で OAM 光ビームの位相を制御し適応的に補償する手法を考案し、計算機シミュレーションで評価した。その結果、角度誤差の補償によりクロストークが低減できること、また大気

光渦を用いた大容量・高効率・高柔軟な光通信技術の研究

Research on high-capacity, efficiency, flexible optical communication technologies using optical vortex

の揺らぎを補償することで受信信号品質が改善することを明らかにした。

参考文献

- [1] P. J. Winzer, “Scaling optical fiber networks: challenges and solutions,” *Optics and Photonics News*, vol. 26, no. 3, pp. 28–35, Mar. 2015.
 - [2] G. C. G. Berkhout, M. P. J. Lavery, J. Courtial, M. W. Beijersbergen, and M. J. Padgett, “Efficient sorting of orbital angular momentum states of light,” *Physical Review Letters*, vol. 105, no. 15, pp. 153601-1–4, Oct. 2010.
 - [3] H. Kishikawa, N. Sakashita and N. Goto, “Mode sorting performance for optical beams carrying orbital angular momentum suffering lateral displacement and angular deflection,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.57, No.8S2, 08PB01-1-08PB01-5, June 2018.
 - [4] N. Sakashita, H. Kishikawa and N. Goto, “Influence of lateral displacement and angular deflection on mode sorting for beams carrying orbital angular momentum,” *OSA Advanced Photonics Congress 2018*, No.JTu5A.35, Zurich, Switzerland, Jul. 2018.
 - [5] A. E. Willner et al., “Optical communications using orbital angular momentum beams,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 7, no. 1, pp.66–106, Mar. 2015.
 - [6] J. D. Schmidt, *Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB*, SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2010.
- この研究は、平成30年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和元年度～令和3年度に実施されたものです。