

論文の内容の要旨

論文題目「空間光通信における通信品質の向上に関する研究」

学位申請者 中山 朋子

キーワード：空間光通信、通信品質、大気ゆらぎ、空間伝搬損、指向誤差

情報社会(Society 4.0)から、Society 5.0 への移行が標榜される中、仮想空間と現実空間の融合システムにおいても、情報の役割は今まで以上に大切なものとなることが予想される。世界的なパンデミックとなった新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) への対策として、テレワークやオンライン教育、オンライン診療の導入も急速に進んでいる。このような情報化社会は、通信とコンピュータから成る情報通信技術(Information and communication technology : ICT)の進歩により実現している。また、近年のコンピュータの処理能力の向上は、更なる高速伝送の要求につながっている。

ケーブルの敷設の必要がないワイヤレス通信は、3次元の空間を自由に通信できるという優れた特長を持っている。中でも、地上と人工衛星との通信はワイヤレス通信に頼らざるをえない。また、地上のワイヤレス通信では、第5世代移動通信システム(5th generation mobile communication system : 5G)が導入され、Beyond 5G に向けた研究開発が活発化している。将来的には、衛星、航空機、無人航空機(Unmanned aerial vehicle : UAV)などの非地上系端末と地上系端末が3次元に接続されるネットワークの実現につながると考えられる。特に、ワイヤレス通信に関わる非地上系ネットワーク(Non-terrestrial networks : NTN)は、重要な位置づけにある。しかし、Beyond 5G の通信システムにおいて、今後、周波数の逼迫が課題となることが予測されている。同時に、電波通信の数 100 Mbps を超える 10~100 Gbps 級の通信速度が求められている。

空間光通信は、電波と比べ波長が短いレーザー光を用い、光の広帯域性も利用することで、大容量の回線の提供が期待されている。また、現在のところ、光の周波数帯は国際的な周波数調整の制約がないため、着目されている。しかし、空間光通信には実用化に向けたいくつかの課題がある。空間光通信における信号対雑音比(Signal-to-noise ratio : SN 比)の低下、SN 比の変動により引き起こされる通信品質の低下は未だ解決されていない。

伝搬に伴い拡がった光波を有限の大きさのアンテナで受信するために生じる空間伝搬損は、SN 比の低下を招く。大気ゆらぎにより生じる強度変動、移動体の風の影響などにより引き起こされる指向誤差は SN 比の変動を引き起こす。これらは検討が加えられているものの確実な低減にはつながっていない。また、昨今の通信相手との距離変化の割合が大きい空間光通信において、本研究で見出した新たな課題である距離変化によるレーザーの進行方向に対する受信光の焦点位置の変動は、SN 比の変動を招く。

本研究では、通信品質の低下を招くそれぞれの課題に対して、空間光通信の送信機能、受信機能、指向誤差に着目し、以下の3つの提案・検討を行い、通信品質の向上を目指した。

1. 複数ビーム生成素子を適応した送信機能

通信相手との位置変化が生じても大気ゆらぎの影響の低減が可能な複数ビームの伝送法に着目した。複数ビーム伝送法のキーとなる複数ビーム生成素子は、大気ゆらぎの度合いに応じた大気ゆらぎの影響低減のため、出力ビーム数の柔軟な制御が求められている。また、空間伝搬損の低減を図ることを目的に、距離に応じてレーザ光のビーム拡がり角が制御可能で、機械的な駆動装置や屈折率の精密な制御を必要としないデバイスが求められている。そこで、光情報処理の分野で複製像の生成に用いられてきたデュプリケート光学系を、生成ビーム数や出力ビームの強度分布が制御可能な複数ビーム生成素子として用い、送信機能へ適応することを提案した。さらに、衛星-光地上局間空間光通信を事例に挙げ検討を行った。屋外の約 450 m の距離でビーム送信実験を行い、デュプリケート光学系による複数ビームが大気ゆらぎの影響を抑制することを実験的に実証した。また、回折を考慮した数値解析を行い、デュプリケート光学系によりビーム拡がり角が制御可能であることを確認した。

2. 受信光の焦点制御を適応した受信機能

UAV-光地上局間空間光通信は、UAV の機体揺れをカバーするため、拡がり角の広いビームを用いる。また、UAV と光地上局との距離に対して UAV の移動に伴う距離変化が大きい。そのため、距離変化よりレンズの焦点位置がレーザ光の進行方向に変動する。そこで、この焦点の変動により生じる信号光の減少を低減し、通信品質向上を図るため、受信機能への受信レーザ光の焦点位置の制御機能の適応を提案した。さらに、数値計算により、焦点制御による結合効率の向上を明らかにした。また、ビームを屋外の 2 点間の 450 m 伝搬させる実験を行い、可変焦点レンズでの制御を確認し、焦点制御を適応した受信機能の大気ゆらぎのある実環境下での光回線の通信品質の向上の可能性を得た。

3. 指向誤差を考慮した通信品質の推定

UAV-光地上局間空間光通信は、指向性の高いレーザ光を用いて、風の影響を受けランダムな揺れが生じる UAV に対し高品質な通信を構築する必要がある。そのため、UAV から通信相手に向け送信器がレーザ光を送信した方向と実際の通信相手の方向との角度差である指向誤差を補正する機能の適応が求められる。そこで、様々な種類の指向誤差補正システムから適切なものを選択するために、大気ゆらぎの影響を考慮した通信品質を表す指標の 1 つであるビット誤り率(Bit error rate : BER)を推定した。求められる BER に対して許容される指向誤差の範囲を求め、指向精度の要求値を明らかにした。

これらの検討を踏まえ、空間光通信の通信品質の向上を図ることで、空間光通信を重機の遠隔操縦、UAV による作業現場の確認に適応した無人化施工の実現などが見込まれる。このように、空間光通信が Beyond 5G と連携し、生活を支える通信技術となることが期待される。

本学位論文は、空間光通信の通信品質の向上を目指すことで、空間光通信の実用化に向け貢献しようとするものであり、送信機能、受信機能、指向誤差に着目した通信品質の向上のための提案と通信品質向上の可能性を示せたと結論するものである。