

## [研究助成 (A)]

## 光波空間変調を用いた光無線通信システムに関する研究

## Development of free-space optical communication system using two-dimensional patterns

2211002



研究代表者

大阪公立大学 大学院工学研究科

助 教

池 田 佳奈美

## [研究の目的]

光無線通信システムは自由空間中を伝搬する光によって情報伝達を行う通信システムです。送信器から出射する光を搬送波として情報を載せ、受信器で受光し情報を受け取ります。光を用いることの利点には、周波数が高いことによる広帯域性・高速度性などがあります。光無線通信システムの基本構成は光源と変調器を含む送信器と光検出器を含む受信器であり、電気通信システムと比べて大きな違いはありません。また、光ファイバを用いた有線の光通信システムと同様に、複数の波長の光を用いて並列に光を送信する波長分割多重や独立した空間モードを用いて並列にデータを送信する空間分割多重などの技術により大容量かつ高速な通信が可能です。これらの特徴を持ち合わせたうえで、有線通信では必須である伝送路設備の敷設なしに設置できる光無線通信システムは、今後更なる利用が期待されています [1]。

情報通信システムにおいて、情報の安全性の担保は重要であり、暗号化技術は必要です。従来、共通鍵暗号方式や公開鍵暗号方式などの暗号化技術が広く用いられてきています [2]。情報通信システムはソフトウェア領域、ネットワーク領域、ハードウェア領域の3領域で構成され、従来の暗号化技術はソフトウェア領域やネットワーク領域においてアルゴリズムに従って情報の暗号化を行う技術が大半です。ソフト

ウェア領域やネットワーク領域における暗号化は、システムを構成するハードウェアデバイスへの依存が少なく、汎用的に利用できる利点があります。一方、システムの仕様や入出力の状態を知ることによって暗号を解析され理論的に攻撃される可能性があるという懸念があります。また、無線通信は無線であるがゆえに有線での通信と比べて第三者によって傍受される可能性が高くなります。そのため、光無線通信システムの利用拡大に伴って、ハードウェア領域を含む複数の領域において複数の暗号方式を組み合わせるシステム全体のセキュリティ性を向上させることが不可欠となります。我々は、従来のソフトウェアによる暗号化と併用可能な、ハードウェア内の光学系構成によって光無線通信の安全性を向上する新規暗号化光無線システムの構築を目指しています。具体的には、簡易なハードウェアでの安全性の高い光無線通信システム実現に向けて、光無線通信における新規ハードウェア暗号化として送信器・受信器内に2次元空間フィルタを搭載するハードウェアを用いた暗号化の構築を目指しています。

本研究では、立石科学技術振興財団のサポートを頂きながら、数値シミュレーションと実験により提案手法の可能性を検証しました。また、展開として通信の並列化によるシステムの拡張についての基礎的な検証結果をここに報告します。

## [研究の内容, 成果]

## 1. 2次元空間フィルタリングによる暗号化を導入した光無線通信システムの開発

図1に2次元空間変調を通信の暗号化鍵として導入した光無線通信システムの構成を示します。提案システムにおいては、光波に与える2次元変調パターンが送信情報そのものとして利用されるのではなく、暗号化の鍵として利用される点が特徴です。入力される2値データストリームの情報の状態に合わせて波面を空間変調することで暗号化します。送信器と受信器はそれぞれレンズを用いた4fの光学系を備えており、通信信号は送信機光学系での空間変調により暗号化され、特定のパターンに対応した空間フィルタを受信器光学系内に搭載することで2次元空間フィルタリングが実行されます。その結果、受信器内のみで振幅変調された光が検出でき、通信信号を復号することができます。すなわち、データストリームを光学系で暗号化する光無線通信システム構成です。

まず、提案システムの基礎的な実験検証を行いました。構築した光無線通信システムを図2に示します。本実験では送信器入力面および受信器フィルタとして位相変調型の空間光変調器 (SLM) を搭載し、入射波面の空間変調を行いました。入力された通信信号の時間変化に合わせて、送信器に搭載した SLM に描画されるパターンが切り替えられます。受信器出力面において中央の光強度を光強度検出器で検出し観測しました。

基礎実験では2次元パターンを2つ用意し、

そのうちの1つのパターンをもとにして作成したマッチトフィルタを受信器内のフィルタとして搭載しました。実験結果の例を図3に示します。図3 (a) はシステムに入力した通信信号、(b) はフィルタを搭載した専用の受信器で受光した光強度、(c) は専用の受信器を使用せず送信器から送られてきた光全体を受光した光強度を示しています。ここで、図3 (b) と (c) はそれぞれ単位面積当たりに換算し (b) の最大値で正規化したものです。

本実験では通信速度 2 Hz, 通信距離 600 mm, ビーム径 3 mm, 受信器検出径 0.3 mm としま

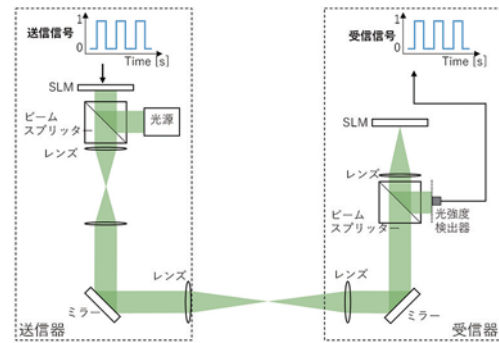
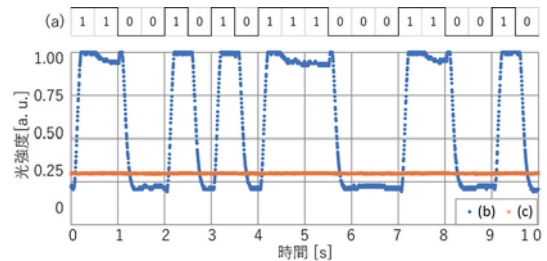


図2 構築した光無線通信基礎実験系



(a) 入力信号  
(b) 送信機のフィルタ変調と対応した専用のフィルタを搭載した専用の受信器で受光した強度  
(c) 専用の受信器を使用せず受光した強度

図3 基礎実験結果

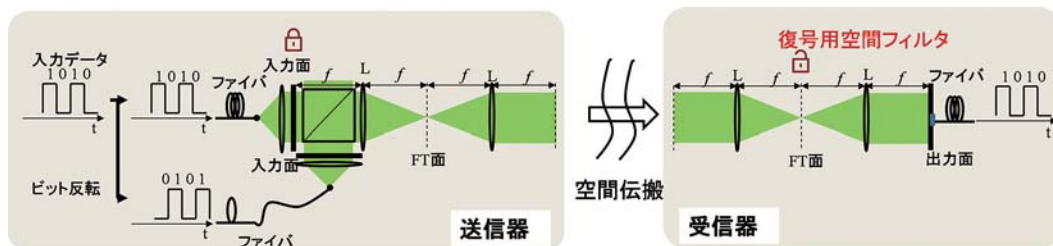


図1 光空間変調を通信の暗号化鍵として導入した光無線通信システムの概要

した。設計通りの空間パターンを送信器に用い、送信器と対応したフィルタを受信器に搭載することで受信器で検出される光強度を用いて信号を送受信することができました。つまり、数値シミュレーションと実験により提案手法を示しました。また、提案手法は最初に用意する2つの空間パターンの類似度が受信される光信号品質に影響します。そこで、使用する空間パターンの選定によって受信信号の品質を向上させることが可能であることもシミュレーションによって明らかにしました。

次に、送信器と受信器の間の距離による信号品質の変化についてシミュレーションによって検証をしました。これは、図2に示した光学系は通信距離を600 mmとしてシステムを設計したのですが、光無線通信システムの実際の利用を考えると、設計通りの通信距離で利用するとは限らないためです。シミュレーションの結果、光検出強度60%を閾値とすると、設計距離に対して $\pm 5\%$ の誤差で信号の受信が可能であることが確認できました。

## 2. 通信の並列化によるシステムの拡張の基礎評価

ここまでの実験では受信器に搭載するフィルタにマッチトフィルタを用いており、2値の信号の送受信にとどまっていた。いかにして通信容量を拡大するかは大きな課題です。前述のシステムをそのまま並列にすることによる大容量化は可能ですが、システムが大型化してしまいます。そこで、光空間通信の暗号化と多重化を全光で、システムを大型化することなく実現するシステムを構築することを目指し、受信器に搭載するフィルタの改良について検討しました。

受信器のフーリエ面にマッチトフィルタを搭載するのではなく、Gerchberg-Saxton アルゴリズム [3] を用いて受信器に搭載する位相分布を計算し、受信器に導入することで信号を多値化することを検証しました。

具体的には、受信器の出力面での右下のピークを第0ビット、左下のピークを第1ビット、中央上のピークを第2ビットとして、3ビット通信が可能であるかを検討するシミュレーションを行いました。複数箇所ピークが出力されるパターンなどを加えると計8パターンとなります。それぞれの入力パターンに適切な3ビットの入力信号を割り当てました。シミュレーション結果より、受信器の出力面のピーク積分強度に対して適切なしきい値を設定することで、3ビットの通信が可能であることが確認できました。

## 3. まとめ

以上のように、2次元空間フィルタリングによる暗号化を導入した光無線通信システムの基礎実験系を構築しました。そして、光空間通信の暗号化と多重化を全光で行うシステムを構築することを目指し検討を進めました。具体的には、マッチトフィルタリングや Gerchberg-Saxton アルゴリズムを用いて生成した位相分布と組み合わせることによる光空間通信の可能性についてシミュレーションと基礎的な実験で確認しました。

### [今後の研究の方向、課題]

本研究によって、2次元空間フィルタリングによる暗号化を導入した光無線通信システムの基礎実験系を構築しました。2次元空間フィルタリングを導入した光無線通信に関する基礎実験が可能となり、また、提案フレームワークでの基本的な情報通信が確認できました。本研究によってフィルタの改良による並列化実現の指針が得られたため、暗号化と並列化を同時に行えるシステムにむけて、システムの発展性・将来性が向上することが期待できます。今後は、実利用に耐えうるシステムとなりえるよう、通信距離の長距離化などに関する検討を進めます。

本助成金により、研究を進めることができました。

した。ここに感謝を申し上げ、今後のさらなる研究につなげたいです。

会, G8-14, Online, 2021 年 12 月.

[参考文献]

[成果の発表, 論文等]

- [1] “光空間フィルタリングによる暗号化を導入した光無線通信 —— 計算機合成ホログラムを用いた多値化の検討 ——”, 白瀬大剛, 池田佳奈美, 小山長規, 山田 誠, 令和 3 年度電気関係学会関西連合大

- [1] V. Chan, J. Lightwave Technol. 24, 4750 (2006).  
[2] W. Diffie, et al., IEEE Trans. Inf. Theory 22, 644 (1976).  
[3] R. W. Gerchberg, et al., Optik. 35, 237 (1972).