

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

### Studies on Free-Space Optical (FSO) Systems Applying CDMA and OFDM over Fading Environment

フェーディング環境下における CDMA/OFDM 方式を  
適用した自由空間光システムに関する研究

申請者

ホ	ハク
Fan	BAI

国際情報通信学専攻  
ワイヤレスシステム研究 II

2016年 1月

自由空間光通信 (Free Space Optics : FS0) 方式は高速で大容量通信を可能とする光無線通信方式である。今後、UHD TV 伝送、第 5 世代移動通信 (5G) ネットワークへの応用が期待されている。FS0 は光無線通信であることから、光ファイバーを用いた有線通信方式と比較して歩行者環境など限定されたエリアにおいて容易に通信ネットワークを構成する上で有効なシステムであることが述べられている。しかし、FS0 は光通信であることから通信路の大気擾乱により伝播特性が大きな影響を受ける。本論文では直交周波数多重化方式 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM)、符号分割多重方式 (Code Division Multiple Access : CDMA) による多重化 FS0 方式の研究課題を実現する上で新しい方式に関する課題を検討した結果をまとめている。

本論文は具体的には 3 つの FS0 方式について提案している。一つは、OFDM 方式に複数の受信レンズを用いて検波するダイバシティ効果を用いた OFDM-Based Ro-FS0 (Radio over FS0) システムである。ダイバシティ効果は、複数の受信レンズを用いて合成することで優れた受信特性が得られることを明らかにしている。二つ目は、外部変調器として用いた偏向変調方式 (Polarization Shift Keying : Po1SK) と光 CDMA 方式を組み合わせた Po1SK-OCDMA 方式 (Polarization Shift Keying Optical CDMA) である。三つ目は、Po1SK-OCDMA 方式の検出方式としてコヒーレント検出を可能とするヘテロダイン検出方式について明らかにしている。コヒーレント検出を用いることで、光通信における大気擾乱を改善できることを示している。

本論文は英語で執筆されている。以下、各章ごとに概要を述べ評価を加える。

第 1 章では、「Introduction」として、FS0 の研究背景と応用領域について述べている。FS0 を実用化する上で、光無線区間の大気擾乱による伝送特性の劣化が大きな障害となることを明らかにしている。伝播特性の劣化の克服のために、従来の On-Off Keying (OOK) に代わって、新たなアクセス通信方式として受信ダイバシティを用いた OFDM-Based Ro-FS0 システムと Po1SK-OCDMA 方式を提案したことについて述べている。

第 2 章では、「Fundamentals of FS0 Communication Systems」として、FS0 を伝送する光無線特性の伝播特性について述べている。本研究を進める上で、光無線伝播の減衰特性、伝送路の大気擾乱に基づく統計モデルを明らかにしている。本章では無線伝播路が対数正規分布則 (Log-normal) 擾乱モデルを用いたときの FS0 通信方式の限界誤り率特性を明らかにしている。また、FS0 通信方式の伝送特性解析では Gamma-Gamma 擾乱モデルの妥当性を明らかにしている。本

章では、光無線伝播特性の大気擾乱による特性劣化を克服するために、受信器に絞り値平均化法 (Aperture Averaging :AA)を適用することが有効であることを述べている。またFSO通信方式として、輝度変調/直接検波 (Intensity Modulation/Direct Detection :IM/DD)としてFSO空間輝度変調 (Space Intensity Modulation based FSO : SIM based FSO) とPo1SKが有効であることを述べている。

第3章では「OFDM-Based Ro-FSO Systems with Spatial Diversity over Correlated Log-normal Fading Channels」として、光無線伝送路のフェージング環境下において、ダイバシティ効果を用いたOFDM-Based Ro-FSO システム方式を明らかにしている。ダイバシティの相関特性とゆらぎの影響を考慮して受信信号の誤り特性と失敗確率について述べている。本章においては、大気擾乱モデルを用いたOFDM-Based Ro-FSO システムの理論解析式を導出し、シミュレーション特性との比較を行い理論解析方法の妥当性を立証している。

すなわち、本章ではOFDM-Based Ro-FSO Systems with Spatial Diversity方式を提案し、光無線伝送路および送受信特性を総合的に検証し、本提案方式をFSO方式として用いることが有効であることを示した成果は大きい。

第4章では、「Po1SK-Based Direct Detection OCDMA Systems through Turbulent FSO Links」と題して、Po1SK変調方式とOCDMA方式の統合化方式について述べている。本章では、統合化したPo1SK-OCDMA方式の大気擾乱モデル環境下における通信方式を理論的に解明し、Meijer G 関数による誤り特性と失敗確率について近似式を導出している。さらに、送受信間距離が1km離れたGamma-Gammaモデル伝送路環境においても、送受信が可能であることを理論的に明らかにしている。本章では、Po1SK変調方式を従来のOOK変調方式と比較して伝送路の大気擾乱環境において高効率な通信方式であることを述べている。

すなわち、本章において、新たにPo1SK-OCDMA方式を提案し、理論的な解析方法を示し、シミュレーションによる評価により提案方式の有効性を示したことの成果は大きい。

第5章では、「Po1SK-Based OCDMA Systems with Heterodyne Detection over Turbulent FSO Links」と題して、Po1SK-OCDMA方式にヘテロダイン検出を用いる方式について述べている。本章では、従来のOOK変調方式とPo1SK-OCDMA方式において直接検波方式とヘテロダイン方式によるコヒーレント検出を用いたときの通信方式について理論的に解明し、ヘテロダイン方式によるコヒーレント検出の有効性を明らかにしている。さらにシミュレーションにより評価を行い、大気擾乱環境においても本方式が有効であることを示した。

すなわち、本章ではコヒーレント検出を可能とするPo1SK-OCDMA方式にヘテロダイナ検出方式を適用した場合の理論的解明を行い、シミュレーションにより検証し有効性を示した成果は大きい。

第6章では「Conclusions」と題して、FSO通信方式としてPo1SK-OCDMA方式を提案し、大気擾乱環境での理論解析とシミュレーションにより解明したことの結論について述べている。さらにコヒーレント検出を適用するためにヘテロダイナ検出方式を適用し、大気擾乱環境特性を向上できることの有効性を示している。

この研究の成果は、今後、高速大容量データ通信が必要とされる光無線通信システムにおいて有効なFSO通信方式の提案である。従って、国際情報通信学の発展に寄与するところ極めて大であり、本論文は博士（国際情報通信学）の学位を授与するに値するものと認める。

2016年1月28日

審査員

主任 早稲田大学教授 工学博士（新潟大学）  
（専門分野：情報通信工学）

佐藤 拓朗



早稲田大学教授 工学博士（東北大学）  
（専門分野：無線通信工学）

嶋本 薫



早稲田大学大学院客員教授 工学博士（東京大学）  
（専門分野：情報通信工学）

津田 俊隆



早稲田大学名誉教授 博士（工学）（早稲田大学）  
（専門分野：無線通信工学）

松本 充司



電気通信大学特任教授 工学博士（東北大学）  
（専門分野：情報通信工学）

中嶋 信生

