

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06445

研究課題名（和文）光無線通信へのラゲールガウスビームの適用に関する研究

研究課題名（英文）Application of Laguerre-Gaussian beams to optical wireless communications

研究代表者

小川 賀代（OGAWA, Kayo）

日本女子大学・理学部・教授

研究者番号：20318794

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、光無線通信において問題となる大気乱流に起因した伝送特性劣化を克服すべく、ラゲールガウスビームに着目し、シンチレーションの影響を軽減するモードを見出した。また、多重伝送においては、モード間干渉の小さいモードの組み合わせを導き、1枚の計算機多重ホログラムを用いて多重モード分波器を提案・実現し、システムの簡易化も図った。

電波におけるモード多重伝送方式の検討においては、UCAによるOAM-MIMO方式を採り上げ、逐次干渉除去の適用を図る方式の提案を行った。提案方式の伝送特性の評価、及び多重度やアンテナ軸のずれの影響について解析的に評価を行い、有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

10年で100倍の伝送容量の増加が見込まれる中、世界中において、すでにbeyond5G, 6Gの検討が始まっている。次世代の通信を実現させる手法として、ラゲールガウス（LG）ビーム（OAMはLGビームの一部）のモード多重伝送が注目を集めており、電波だけでなく、ミリ波、テラヘルツ波、光など、高周波数帯域まで視野に入っている。本研究は、光と電波について検討を進めてきたが、いずれも、次世代の通信技術を構築していく上で、重要な成果であり、学術的及び社会的意義が大きいといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to overcome the transmission characteristic degradation caused by atmospheric turbulence, which is a problem in the optical wireless communication, focusing on the Laguerre-Gaussian beams it has been found modes to reduce the effect of the scintillation. In addition, for multiplex transmission, we derived a combination of modes with low inter-mode interference and proposed and realized a multi-mode demultiplexer using a single computer multiplex hologram to simplify the system.

In the study of the mode multiplex transmission method in radio waves, we adopted the OAM-MIMO method by UCA and proposed a method for applying successive interference cancellation. The transmission characteristics of the proposed method were evaluated, and the effects of multiplicity and antenna axis shift were analyzed analytically, and the effectiveness was confirmed.

研究分野：光無線通信

キーワード：光無線通信 ラゲールガウスビーム OAM モード多重伝送 MIMO UCA 計算機ホログラム

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光無線通信は、通常の有線光通信よりも低コストで容易に導入でき、無線局免許を取得することなく、大容量・高秘匿通信が実現できる利点がある一方、その伝送特性が大気乱流に起因したシンチレーションにより、大きく劣化する問題があった。また、年々増加している伝送容量に応えるべく、新しい技術の開発が望まれていた。そこで、注目を集め始めていたのがラグエルガウス (LG) ビームであった。LG ビームは、1992 年に L. Allen によって世界で初めて確認され、顕微鏡、光ピンセット、レーザ加工への応用の検討は行われていたが、通信分野での適応については、始まったばかりであった。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、光無線通信において特に問題となる、大気乱流に起因した伝送特性劣化を克服すべく、軌道角運動量を有するラグエルガウスビーム(LG ビーム)に着目し、シンチレーションの影響を軽減するモードを見出すとともに、LG ビームが元来有するモード間の直交性を活かして、モード間干渉の小さいモードの組み合わせにより多重伝送を行う方式を確立することを目的とする。

また、大容量化に向けた LG ビームの多重モード伝送については、光だけでなく、電波においても検討の範囲を広げた。UCA による OAM 多重伝送では、搬送波周波数、アンテナ素子数やアンテナ径といったパラメータにより、受信特性が大きく変動することから、その特性の安定化に、複数の UCA を同心円状に多重させて、アンテナ径に冗長性を与える方式が有効である。そこで、本研究課題では、複数 UCA による OAM 多重伝送を対象として、各種システムパラメータや固定無線通信特有の置局条件を考慮したときの伝送特性を解析・評価するとともに、さらなるシステム容量向上に向けて、SIC(SIC: Successive Interference Cancellation)による空間多重を用いた OAM 多重伝送方式の提案を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 光無線通信における LG ビームモード多重伝送の検討

光無線通信における LG ビームモード多重通信については、まず、シンチレーションの影響を軽減できる LG ビームのモードを見出すべく、単一モードを対象として、各種モードを変化させた場合の伝送特性を取得・評価する。伝送特性は、シミュレーション手法としては、図 1 に示すようなスプリットステップビーム伝搬法とフェイズズスクリーン法を用いる。モードを網羅的に変化させた時の波面を取得し、評価はシンチレーションインデックスを用いて行う。

次に、LG ビームをベースとしたモード多重伝送方式を確立すべく、シンチレーションに対して軽減効果を有するモードについて、相互干渉特性を検証するとともに、モード間干渉の小さいモード多重の組み合わせ条件を導き、多重伝送を行ったときの伝送特性を取得・評価する。図 2 は、モード多重およびモード分離の光学的実現方法の概念図である。モード多重分離フィルタを 1 枚の多重ホログラムを用いて実現させる方法を提案し、システムの簡易化を図る。さらに、本方式の有効性を確認するために、光学実験においても検証を行う。

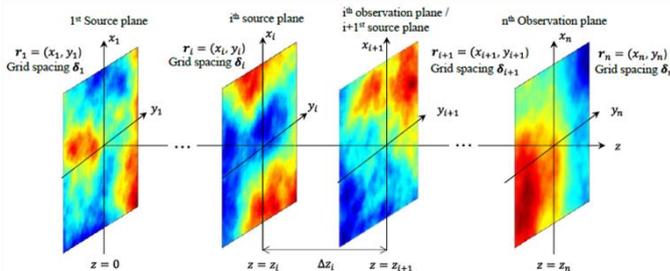


図 1 スプリットステップビーム伝搬法

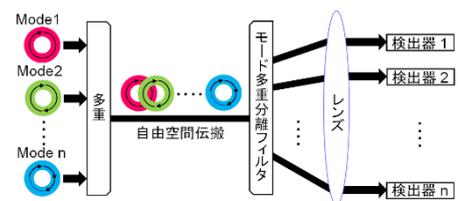


図 2 モード多重分離の概念図

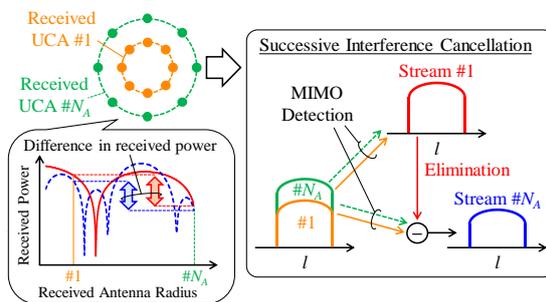
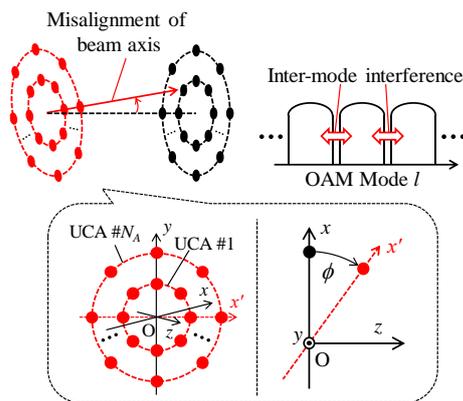
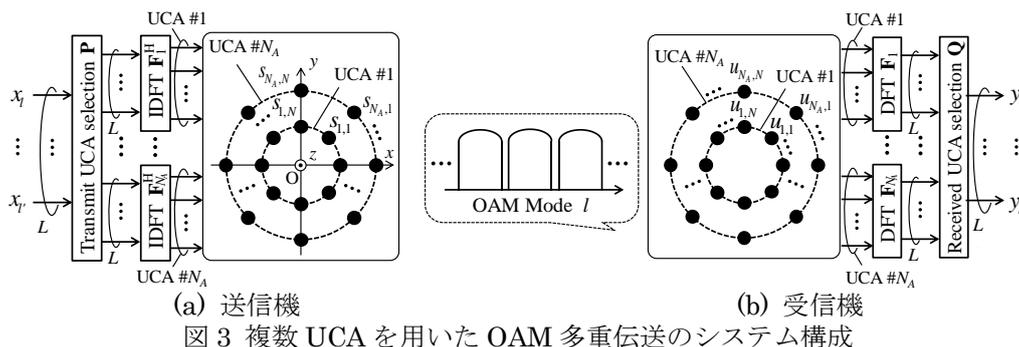
#### (2) 電波におけるモード多重伝送方式の検討

複数 UCA による OAM 多重伝送については、一定の送信電力とアンテナ素子数を設定し、UCA 多重数を変化させたときのシステム容量を取得・評価する。図 3 は、複数 UCA を用いた OAM 多重伝送のシステム構成を示したものである。同図に示すように、送受信機側のそれぞれにおいて、IDFT 及び DFT が施されることにより、OAM モード信号の多重・分離が行われる。ここで、異なる UCA アンテナ径で受信された OAM 信号の受信電力が変動することに着目すれば、各モードにおいて、受信電力が最良となるような送受信 UCA を選択でき、空間ダイバーシチ効果を獲得することができる。

また、風等による振動により、固定無線通信ではアンテナ軸ずれが生じることから、このような現実的な環境下における伝送特性を解析・評価する。図 4 は、UCA を用いた OAM 多重伝送においてアンテナ軸ずれが生じる様子を示したものである。このように現実的な置局条件では、アンテナ軸ずれに起因して、OAM モード間の直交性の崩れによるモード間干渉が生じることから、アンテナ軸ずれがシステム容量に与える影響について評価するとともに、複数 UCA のアンテナ軸ずれに対する適用効果について明らかにする。

さらに、複数 UCA による OAM 多重伝送の更なる大容量化を図るべく、逐次干渉除去による空間多重(MIMO)の適用を図る方式を提案する。図 5 は、提案方式の概念を示したものである。

同図において、提案方式は、異なるUCAアンテナ径で受信したOAM信号間に電力差が生じることに着目し、空間多重されたOAM信号をSICにより分離し、空間ダイバーシチ効果を獲得するものである。



#### 4. 研究成果

##### (1) 光無線通信におけるLGビームモード多重伝送の検討

##### ① LGビームを単一モードで伝送したときの特性評価

シンチレーションの影響を軽減できるLGモードを見出すために、網羅的にモードを変化させたときの伝送特性を計算機シミュレーションにより取得した。シミュレーション手法としては、スプリットステップビーム伝搬法とフェイズズクリン法を用いた。伝送特性はシンチレーションインデックスにより評価した。その結果、強い乱流中において、LGビームの適用によりシンチレーションが軽減されるという結果を得た。更に、シンチレーションの改善が通信特性にどの程度寄与するのかを明らかにするために、シンチレーションの軽減に有効な条件であるLG(7, 5)ビームとガウスビームのCNR対ビット誤り特性で評価したところ、図6のようになり、LGビームの適用によりシンチレーションの影響を軽減し、通信特性が改善されることがわかった。

##### ② LGビームでモード多重を施した時の特性評価

最初に、真空中を想定した時のモード間干渉の小さいモード組み合わせの検討を行った。まず、ラジアル次数  $n = 0, 1, \dots, 10$ 、アジマス次数  $m = -5, -4, \dots, 5$  の範囲において、LGモード多重におけるクロストークの小さいモードの組み合わせを検討した。その結果、クロストークを  $-10\text{dB}$  以下に抑える組み合わせとするには、LG(n,m)に対してLG(n±1, m±2)以上離せば組み合わせ可能であることがわかった。

更に、モード分波器の簡易化を実現するために1枚のホログラムで複数のモード分離可能な多重ホログラムに着目し、キノフォーム型計算機ホログラム(Computer Generated Hologram: CGH)を用いて設計を行った。先に導出したクロストークを抑える組み合わせルールに基づいて10多重を行ったところ、クロストークを  $-10\text{dB}$  以下に抑え、かつ、多重ホログラムとしては高い受信効率で分波できることがシミュレーション実験より確認できた。結果を表1に示す。

これらの結果の有効性を実験的に示すために、光学実験も行った。LGビームの生成及び多重

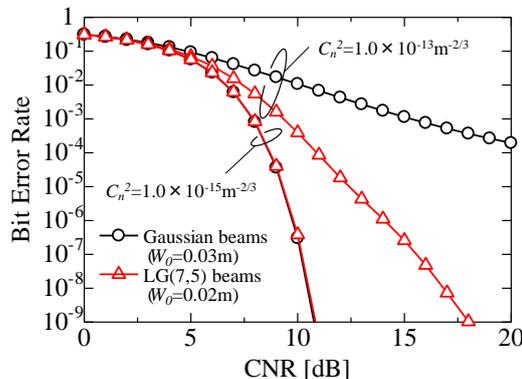


図6 LG(7,5)ビームとガウスビームを適用した光無線通信システムのCNR対BER特性

モード分波器である多重ホログラムには、液晶空間光変調器を用いた。光学実験では、2 多重で検証を行った。図 7 に実験光学系を示し、図 8 に多重モード分波器となる設計した CGH を示す。多重分波の結果を図 9 に示す。分波後のクロストークは-3dB 以下に抑えられ、かつ分波信号の回折効率も平均約 3% というホログラムとしては高効率な結果が得られた。これにより、本方式が光学実験においても、有効であることが確認できた。

表 1 10 モード多重時のクロストークと回折効率の結果

	LG(0,1)	LG(1,3)	LG(1,-1)	LG(0,-3)	LG(0,5)	LG(1,-5)	LG(3,1)	LG(3,-3)	LG(2,4)	LG(4,-1)	回折効率
LG(0,1)	-	-16.97	-14.59	-38.18	-39.00	-35.78	-10.62	-36.88	-30.39	-19.86	8.10%
LG(1,3)	-17.99	-	-41.14	-43.26	-18.28	-37.00	-17.72	-42.87	-10.18	-38.99	5.72%
LG(1,-1)	-14.90	-35.88	-	-16.00	-39.42	-37.42	-17.67	-18.98	-41.35	-10.73	6.44%
LG(0,-3)	-38.56	-45.88	-16.25	-	-42.84	-19.25	-39.49	-12.88	-45.02	-21.59	6.10%
LG(0,5)	-37.92	-18.49	-42.07	-40.95	-	-36.53	-40.44	-43.83	-14.59	-37.14	5.73%
LG(1,-1)	-45.28	-45.40	-38.71	-19.76	-39.26	-	-34.80	-19.75	-40.95	-37.17	5.51%
LG(3,1)	-12.10	-17.71	-17.96	-39.36	-36.18	-40.33	-	-37.81	-27.62	-16.53	5.87%
LG(3,-3)	-41.73	-39.26	-19.33	-13.31	-42.19	-19.56	-41.07	-	-40.14	-16.07	5.78%
LG(2,4)	-31.39	-10.33	-40.54	-43.95	-14.87	-34.36	-27.99	-44.02	-	-37.63	5.59%
LG(4,-1)	-21.04	-41.95	-10.49	-21.76	-41.44	-38.99	-16.76	-16.02	-47.68	-	6.05%

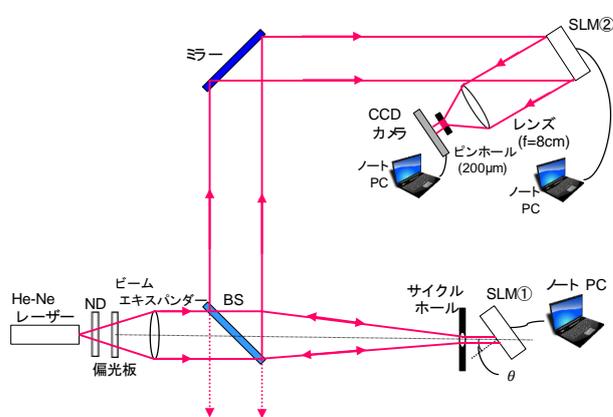


図 7 実験光学系

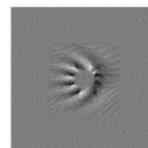


図 8 設計 CGH

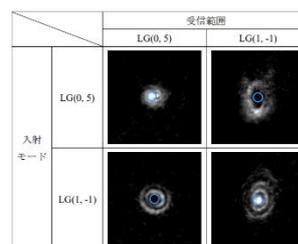
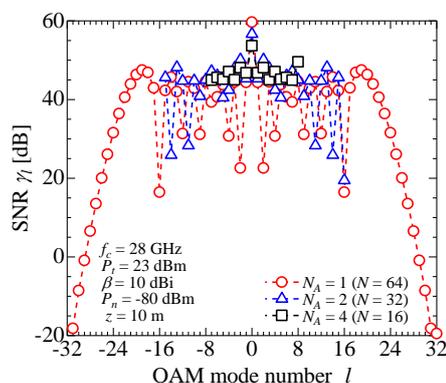


図 9 実験結果

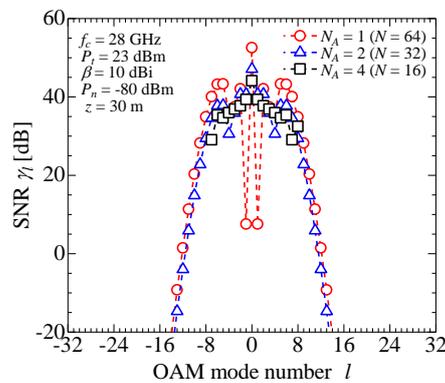
## (2) 電波におけるモード多重伝送方式の検討

### ① 複数 UCA を用いた OAM 多重のシステム容量特性

図 10 は、各モードにおける SNR 特性を示したものである。同図に示すように、通信距離  $z=10\text{m}$  と比較的短い場合、高い SNR を高次モードまで確保できる一方、 $z=30\text{m}$  とすると、高次モードの SNR が大幅に低下することがわかる。これは、モードの増加に伴い、ビーム広がり の影響が大きくなることに起因した結果である。また、UCA 多重数  $N_A$  の増加により、各 UCA に配置される素子数  $N$  が減少することから、受信電力と多重可能なモード数の低下が生じるものの、空間ダイバーシチ効果が獲得できることから、モード間の SNR 特性の変動が軽減される ことがわかる。



(a)  $z = 10\text{ m}$



(b)  $z = 30\text{ m}$

図 10 各モードにおける SNR 特性

②アンテナ軸ずれ存在下における複数UCAを用いたOAM多重のシステム容量特性

図11は、搬送波周波数  $f_c = 28\text{GHz}$ 、通信距離  $z = 10\text{m}$  としたときの各OAMモードにおけるSINR特性をアンテナ軸ずれの有無の場合について示したものである。同図(a)において、アンテナ軸ずれがない場合、単一のUCA( $N_A = 1$ )のSINR特性が、複数のUCA( $N_A \geq 2$ )の場合よりも概ね良好となることわかる。これは、単一のUCAの場合、受信アンテナ素子数を複数UCAの場合よりも多く確保でき、受信電力を向上できるためである。但し、 $|l| \leq 2$ のような低次のモードに着目すると、複数のUCAのSINRが単一のUCAよりも良好となることわかる。これは、複数UCAにおける、受信素子数の減少の影響よりも複数UCAの空間ダイバーシチ効果獲得の影響が上回るためである。一方、同図(b)において、アンテナ軸ずれがある場合には、UCA多重数  $N_A$  にかかわらず、モード間干渉によりSINR特性が大幅に劣化することがわかる。また、この場合、複数UCAのSINRが単一UCAと概ね同等か、低次OAMモードでは上回ることが確認できる。以上の結果から、アンテナ軸ずれがある場合には、複数UCAの適用による空間ダイバーシチ効果の獲得がOAMモード数と受信素子数は減少するものの、システム容量の観点から有効となるものと結論づけられる。

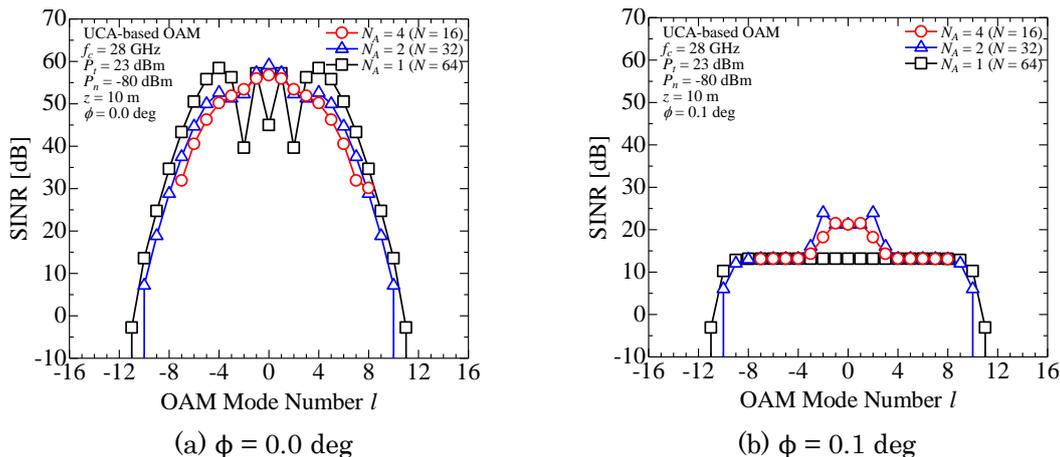


図11 各モードにおけるSINR特性

③SICを用いたOAM-MIMO方式の容量改善(RCSとVTC)

図12は、SICを適用する提案方式と通常方式のモード対SNR特性を示したものである。同図に示すように、提案方式では、SICにより空間ダイバーシチ効果が獲得できることから、OAMモード  $l$  によらずSNRの向上が確認できる。図13は、提案方式と通常方式の通信距離対システム容量特性を示したものである。同図より、空間多重を適用することにより、OAM多重伝送のシステム容量を向上させることができることわかる。また、提案するSICの適用により、空間ダイバーシチ効果を獲得できることから、システム容量を向上させることができることわかる。

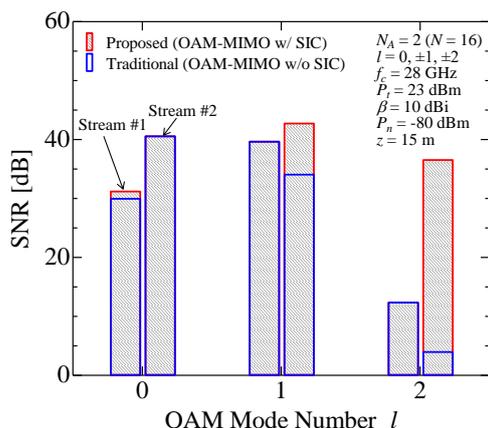


図12 各モードにおけるSNR特性

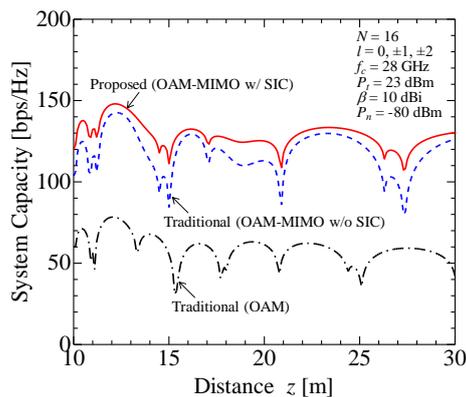


図13 通信距離対システム容量特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ayano Sakamoto, Kayo Ogawa	4. 巻 10770
2. 論文標題 Investigation of mode demultiplexer for Laguerre-Gaussian mode multiplexing in free space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE proceedings: Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII	6. 最初と最後の頁 1077011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2322070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齋藤彩, 小川賀代, 前原文明	4. 巻 2
2. 論文標題 ラゲールガウシアンビームを適用した光無線通信システムの特性評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 B	6. 最初と最後の頁 80-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2018GTP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 2件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 小川賀代
2. 発表標題 光無線通信におけるラゲールガウスモード多重分離システム
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Saito, H. Suganuma, K. Ogawa, F. Maehara
2. 発表標題 Performance Analysis of OAM-MIMO Using SIC in the Presence of Misalignment of Beam Axis
3. 学会等名 IEEE ICC2019 Workshop（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Suganuma, S. Saito, K. Ogawa, F. Maehara
2. 発表標題 Inter-Mode Interference Suppression Employing Even-Numbered Modes for UCA-Based OAM Multiplexing
3. 学会等名 IEEE Globecom 2019 Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Saito, Y. Ito, H. Suganuma, K. Ogawa, F. Maehara
2. 発表標題 Performance Analysis of Polarized OAM Multiplexing Considering the Effect of Polarization Interference
3. 学会等名 IEEE ICC2020 Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安国依子, 達富美樹, 小川賀代
2. 発表標題 大気乱流を伝搬したラゲルガウスビームのモード分布の検証
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 箭田こなみ, 小川賀代
2. 発表標題 ラゲルガウスビームを用いたモード多重通信における分離フィルタの設計
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ayano Sakamoto, Kayo Ogawa
2. 発表標題 Investigation of mode demultiplexer for Laguerre-Gaussian mode multiplexing in free space
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤周平, 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明
2. 発表標題 UCAによるOAM伝送においてモード多重数がシステム容量に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤周平, 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明
2. 発表標題 UCAによるOAM-MIMO伝送への逐次干渉除去の適用に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shuhei Saito, Hirofumi. Suganuma, Kayo Ogawa, Fumiaki Maehara
2. 発表標題 Influence of the number of uniform circular arrays on system capacity in OAM multiplexing
3. 学会等名 The 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川賀代
2. 発表標題 ラゲールガウスビームによる光無線伝搬特性
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ayano Sakamoto, Kayo Ogawa, Hiroshi Takahashi, Takeshi Ozeki
2. 発表標題 Evaluation of crosstalk in Laguerre-Gaussian mode multiplexing for optical wireless communication
3. 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Aya Saito, Kayo Ogawa, Fumiaki Maehara
2. 発表標題 Propagation Characteristics of Laguerre-Gaussian Beams through Atmospheric Turbulence in Optical Wireless Communication
3. 学会等名 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗原直己, 齋藤周平, 小川賀代, 前原文明
2. 発表標題 UCAアンテナによるOAM信号の受信特性に関する一検討
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川賀代, 齊藤彩, 前原文明
2. 発表標題 ラゲールガウスビームを適用した光無線通信における 大気乱流の影響
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安井碧空, 小川賀代
2. 発表標題 気乱流を考慮したラゲールガウスモード多重の基礎検討
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	前原 文明  (MAEHARA Fumiaki)  (80329101)	早稲田大学・理工学術院・教授   (32689)	