

# OAM 多重伝送の次世代移動通信システムへの適用性に関する研究

代表研究者 前 原文 明 早稲田大学 基幹理工学部 教授

## 1 はじめに

近年、デジタルコンテンツの大容量化や IoT (Internet-of-things) デバイスの急速な普及により、モバイルサービスの需要は、増加の一途を辿っている。我が国において 2020 年春に商用化が開始された第 5 世代移動通信システム (5G) では、第 4 世代移動通信システム (4G) の発展形としての eMBB (Enhanced Mobile Broadband) に加えて、URLLC (Ultra Reliable and Low Latency Communications) や mMTC (Massive Machine Type Communications) といった多様で新しい無線通信の利用シナリオが想定されており [1]、さらにその先の 2030 年の実現を目指す第 6 世代移動通信システム (6G) では、無人工場の遠隔制御や自動車・船舶・航空機の完全自動運転といった、サービスのさらなる高度化を目標に掲げ、1Tbps のピークデータレートを達成するテラビット級無線通信の実現が期待されている [2]。

このようなテラビット級の移動通信を実現するためには、アクセスリンク技術の高度化に加えて、5G で普及が進むスモールセルとコアネットワークとを接続するバックホール回線の拡充が不可欠である。特に、バックホール回線の構築には、光ファイバー等による有線通信に加えて、無線通信を適用することが柔軟性、スケーラビリティならびに設備コストの観点から重要となる [3]。このような背景の下、次世代移動通信の、とりわけバックホール回線を支える新たな伝送方式として、互いに直交した軌道角運動量の異なる信号を多重できる OAM (Orbital Angular Momentum) 方式 [4]–[6] が近年注目を集めている。

OAM 信号の生成方法としては、ホログラフィックプレート [4] や螺旋位相プレート [5] といった簡易な方法が知られているが、複数の信号を多重する際には、それらを各々離れた場所に設置することが求められる。一方、UCA (Uniform Circular Array) による方法 [6] は、単一の送受信アンテナ対で複数のモードを同時に信号多重できることから、複数設置の問題を解消でき、実用的なアプローチとして有力視されている。ところが、UCA による OAM 多重伝送では、その受信電力が、搬送波周波数、アンテナ素子数やアンテナ半径といった各種システムパラメータにより大きく変動することから [6]、受信特性に対するシステムパラメータ依存性を明確化することが必須となる。また、OAM 多重伝送の適用が想定される超高周波数帯では、パスロスの影響が大きく、高指向性アンテナの適用が必須となることから [7]、アンテナ指向性を含めた特性解析を行うことも重要である。さらに、風等により伝送装置が振動する現実的な環境下では、アンテナ軸ずれが生じ、受信特性の大幅な劣化といった問題が生じることも明らかとなっており [8]–[10]、このような実際の置局を想定した環境下において、アンテナ軸ずれに起因した受信特性の劣化をいかにして克服するかについても現実的な観点から取り組むべき重要な課題と考えられる。

以上の点に鑑み、本研究調査では、固定無線通信に OAM 多重伝送を適用したときのポテンシャルを定性・定量の両面から計算機シミュレーションにより把握するとともに [11], [12]、特にアンテナ軸ずれといった現実的な条件を考慮に入れたときの問題点を信号処理技術により克服することを目指す [12]。具体的には、まず、基本特性評価として、搬送波周波数、アンテナ指向性及びアンテナ軸ずれの影響を変化させたときのシステム容量評価を行い、現実的な環境下における OAM 多重伝送の振る舞いを把握する [11], [12]。さらに、特にアンテナ軸ずれに起因したモード間干渉の問題に焦点を当てて、生成されるモード間干渉の特徴に着目した簡易干渉キャンセラの提案を行い、その有効性を計算機シミュレーションにより評価する [12]。

## 2 OAM 多重伝送の概要と基本特性評価

本章では、OAM 多重伝送の技術的特徴について述べた後、現実的な環境下における OAM 多重伝送の基本特性を把握すべく、搬送波周波数、アンテナ指向性及びアンテナ軸ずれの影響を変化させたときのシステム容量評価を行う [11], [12]。

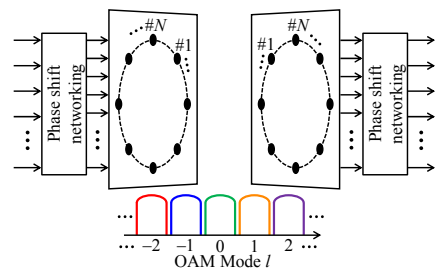


図 1 OAM 多重伝送のシステム構成

## 2.1 UCAによるOAM多重伝送のシステム構成と技術的特徴

図1は、UCAによるOAM多重伝送のシステム構成を示したものである。ただし、 $N$ はUCAにおけるアンテナ素子数である。同図に示すように、送信機側では、モード $l$ の信号に対して、隣接するアンテナ素子間の位相差が $2\pi l / N$ となるように位相回転を施すことにより、OAM多重が行われる。一方、受信機側では、モード $l$ の信号に対して、隣接するアンテナ素子間の位相差がそれぞれ $-2\pi l / N$ となるように位相回転を施すことにより、OAM信号の分離が行われる。ここで、送受信に用いるUCAが、それらの中心軸が一致するように配置されるものとする、異なるモード間の直交性により、単一の送受信UCA対で複数のモードを同時に送信できることから、最大 $N$ モードの多重伝送を実現できる。

図2は、UCAにより生成された各モードの位相及び電力分布を計算機シミュレーションにより取得したものである。ただし、搬送波周波数 $f_c = 28$  GHz、アンテナ素子数 $N = 16$ 、UCA半径 $R = 0.30$  m、及び通信距離 $z = 15$  mに設定している。同図に示すように、OAM信号の位相及び電力分布は、モード $l$ に関わらず、それぞれ伝搬軸に関して螺旋状及び一様分布となることがわかる。

図3は、各モードの信号対雑音電力比（SNR：Signal-to-noise Ratio）を示したものである。同図に示すように、 $|l| \leq 2$ のような低次モードのSNRが大きく変動することがわかる。これは、OAM信号が各アンテナ素子からの送信信号の重ね合わせにより生成されることに起因した結果である。また、通信距離 $z = 30$  mと大きくとると、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 $l$ 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。

## 2.2 搬送波周波数を変化させたときの伝送特性評価

OAM多重伝送では、搬送波周波数がOAM信号のビーム広がりに影響を与えることから、搬送波周波数を変化させたときのシステム容量を評価することは重要である。図4は、搬送波周波数 $f_c = 28$  GHzまたは80 GHzと設定した場合の通信距離対システム容量特性を示したものである。同図に示すように、通信距離が短い場合には、ビーム広がりの影響よりも伝搬減衰の影響が支配的となることから、搬送波周波数の低い $f_c = 28$  GHzの場合のシステム容量が $f_c = 80$  GHzの場合よりも良好となる。一方、通信距離が長い場合には、ビーム広がりの影響が支配的となり、搬送波周波数の高い $f_c = 80$  GHzの場合のシステム容量が $f_c = 28$  GHzの場合よりも良好となる。一方、通信距離が長い場合には、ビーム広がり

## 2.3 アンテナ指向性を変化させたときの伝送特性評価

OAM多重伝送の適用が想定される超高周波数帯では、パスロスの影響が大きく、高指向性アンテナの適用が必須となることから [7]、アンテナ指向性の影響を考慮した特性解析が重要である。図5は、アンテナ指向性を考慮したOAM多重伝送の特性評価のモデルを示したものである。同図に示すように、本特性

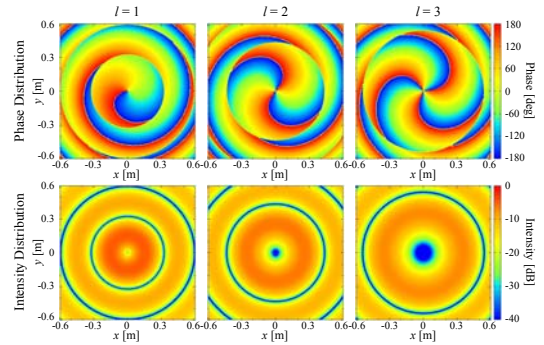


図2 OAM信号の位相及び電力分布

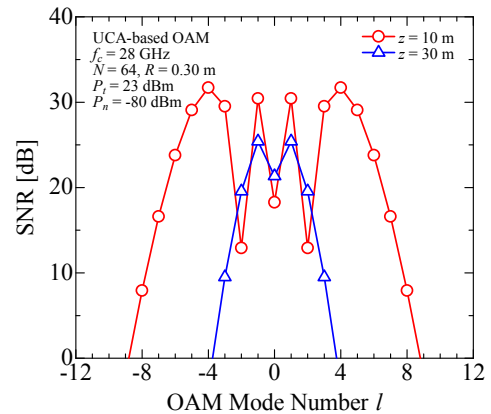


図3 各モードのSNR

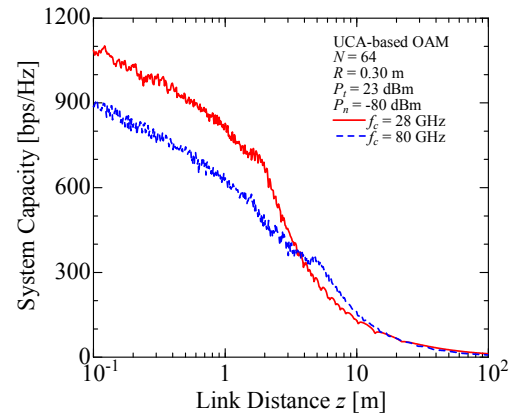


図4 通信距離対システム容量特性

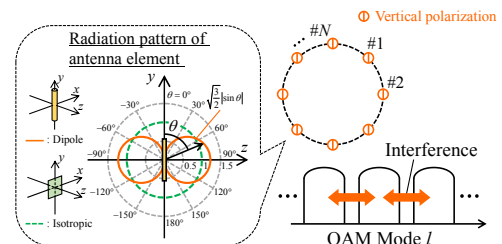


図5 アンテナ指向性の影響

評価では、アンテナ指向性がモード直交性に与える影響を把握すべく、指向性アンテナとしてダイポールアンテナを想定し、等方位アンテナを比較対象にとって、システム容量評価を行う。

図6は、垂直偏波を想定し、モード $l=2$ を所望信号とした場合の受信電力の構成を示したものである。同図に示すように、ダイポールアンテナを想定すると、アンテナ指向性により、等方位アンテナの場合と比較して希望信号電力が向上するものの、異なるモードからの偏波干渉が一定のモード間隔を隔てて生じることがわかる。また、通信距離が長くなると、角度スプレッドが小さくなることから、偏波干渉の影響が小さくなることもわかる。

図7は、垂直偏波を想定した場合のOAM多重伝送の通信距離対システム容量特性を、搬送波周波数をパラメータにとって示したものである。同図に示すように、通信距離が短い場合には、偏波干渉の影響が深刻となることから、ダイポールアンテナを想定したシステム容量が等方位アンテナを想定した場合よりも大幅に劣化することがわかる。一方、通信距離が長くなると、角度スプレッドの減少に伴い偏波干渉の影響が小さくなることから、アンテナ利得の大きいダイポールアンテナのシステム容量が搬送波周波数に関わらず良好となることわかる。さらに、搬送波周波数を大きくとると、2.2節で述べたように、ビーム広がりの影響が小さくなることから、システム容量をより一層向上できることもわかる。

## 2.4 アンテナ軸ずれが生じた場合の伝送特性評価

OAM多重伝送では、風などの振動によりアンテナ軸ずれが生じると、OAMモード間の直交性が崩れることによりモード間干渉が生じ、伝送特性が大幅に劣化する[8]–[10]。図8は、所望OAMモード $l=2$ として受信した場合における受信電力の構成を示したものである。同図に示すように、送信UCAの傾斜角 $\phi$ が増加すると、所望OAMモード $l=2$ の受信電力が低下するとともに、その周辺のOAMモード、とりわけ隣接OAMモード $l=1$ 及び3からの干渉電力が大きくなることわかる。

図9は、アンテナ軸ずれがあるときの各モードの信号対干渉及び雑音電力比(SINR: Signal-to-interference-plus-noise Ratio)を示したものである。ただし、送信UCAの傾斜角 $\phi=0.2$  deg及び $0.4$  degとし、アンテナ軸ずれのない $\phi=0$  degのSNRも併せて示している。同図に示すように、アンテナ軸ずれが生じる場合のSINRは、モード間干渉が生じることから、アンテナ軸ずれが生じない場合のSNRと比較して劣化することがわかる。さらに、傾斜角 $\phi$ の増加に伴い、モード間干渉の影響が大きくなることから、SINRの劣化が深刻となることわかる。

## 3 アンテナ軸ずれ対策技術の提案とその有効性評価

本章では、2章で述べたOAM多重伝送の基本特性評価を踏まえ、特にアンテナ軸ずれの問題に焦点を当てて、生成されるモード間干渉の特徴に着目した簡易干渉キャンセラの提案とその有効性評価を行う[12]。

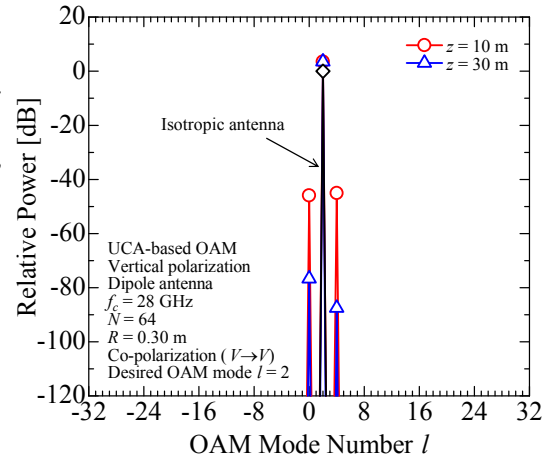
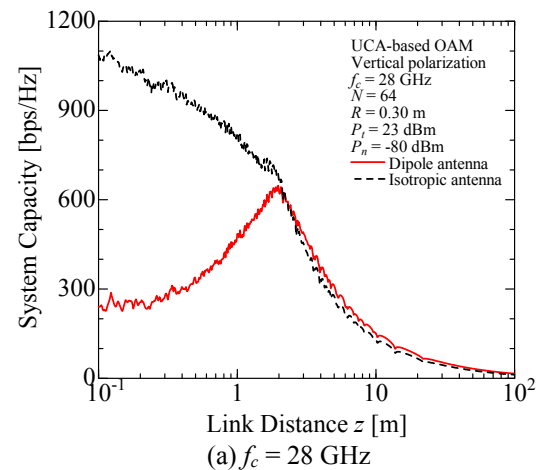
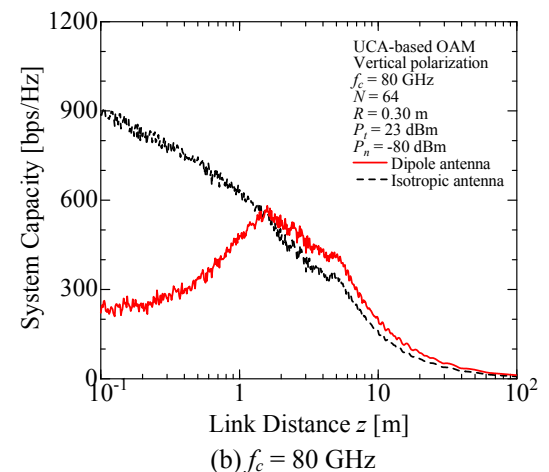


図6 受信電力の構成



(a)  $f_c = 28$  GHz



(b)  $f_c = 80$  GHz

図7 通信距離対システム容量特性

### 3.1 提案方式の概要

図 10 は、提案する簡易干渉キャンセラ概念を示したものである。同図に示すように、提案方式では、アンテナ軸ずれに起因したモード間干渉について、隣接 OAM モードからの干渉が深刻となる点に鑑み [9], [10], それら OAM モード  $l = l \pm 1, \dots, l \pm \Delta l$  からの干渉のみ等化処理により除去を行う。したがって、全てのモード間干渉を除去する従来方式 [8] と比較して、伝送特性を保持しつつ、干渉除去に要する計算コストの削減を実現できるものと考えられる。

### 3.2 提案方式のシステム容量解析

本節では、提案方式のシステム容量を、全てのモード間干渉を除去する従来方式 [8] を比較対象にとって解析する。図 11 は、等化処理として線形フィルタリングを適用した OAM 多重伝送のシステム構成を示したものである。ただし、 $N$  及び  $L$  は、それぞれアンテナ素子数及びモード多重数であり、送信電力は、OAM モードに関わらず等しく設定するものとする。

まず、従来方式のシステム容量を解析する。従来方式における等化後の受信信号ベクトルは、次式のように表される。

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W}(\mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{F}^H \mathbf{x} + \mathbf{n}) = \mathbf{W}\Sigma\mathbf{x} + \mathbf{W}\mathbf{n} \quad (1)$$

$$\mathbf{W} = \left( \Sigma^H \Sigma + \frac{P_n}{P_x} \mathbf{I}_L \right)^{-1} \Sigma^H \quad (2)$$

$$\Sigma = \mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{F}^H \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{n}$ , 及び  $\mathbf{I}_L$  は、それぞれ MMSE (minimum mean square error) フィルタ行列, DFT (discrete Fourier transform) 行列, 伝搬路行列, 変調信号ベクトル, 雑音ベクトル, 及び単位行列である。また、 $P_x$  及び  $P_n$  は、それぞれ送信電力及び雑音電力である。ここで、モード間干渉除去に要する計算コストについて、フィルタ行列  $\mathbf{W}$  の生成に要する複素乗積回数の観点から評価するものとする、従来方式の計算コストは、次式のように表される。

$$C_T = 7L^3 / 2 + L^2 / 2 \quad (4)$$

式 (1) より、等化後の OAM モード  $l$  の受信信号は、次式のように表される。

$$\hat{x}_l = \mathbf{w}_l \sigma_l x_l + \sum_{l' \in \mathcal{L} \setminus \{l\}} \mathbf{w}_l \sigma_{l'} x_{l'} + \mathbf{w}_l \mathbf{n}_l \quad (5)$$

$$\mathcal{L} = \{-L/2 + 1, \dots, L/2\} \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{w}_l$  及び  $\sigma_{l'}$  は、それぞれ  $\mathbf{W}$  の第  $l$  行ベクトル及び  $\Sigma$  の第  $l'$  列ベクトルである。式 (5) より、従来方式のシステム容量は、次式のように計算される。

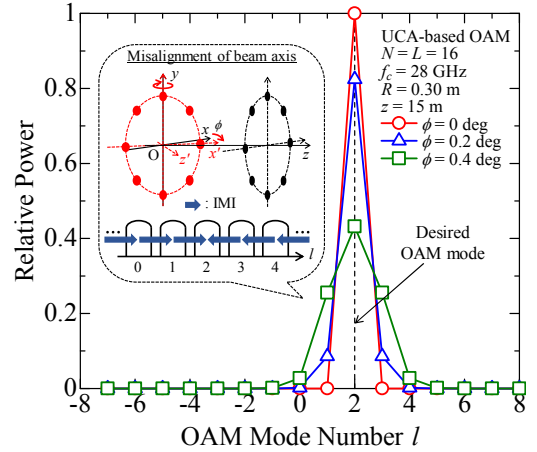


図 8 受信電力の構成

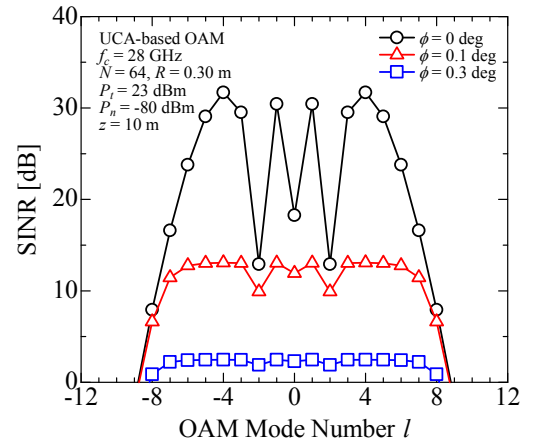


図 9 アンテナ軸ずれがあるときの SINR

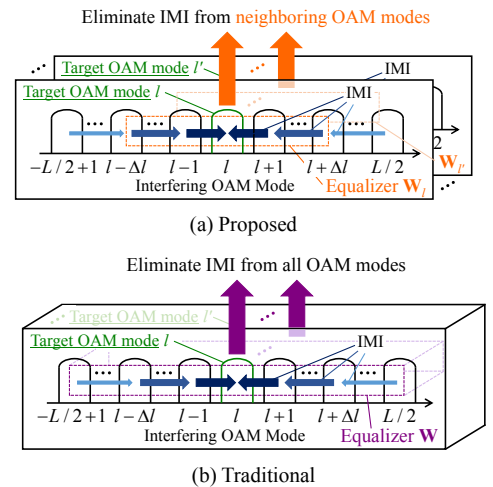
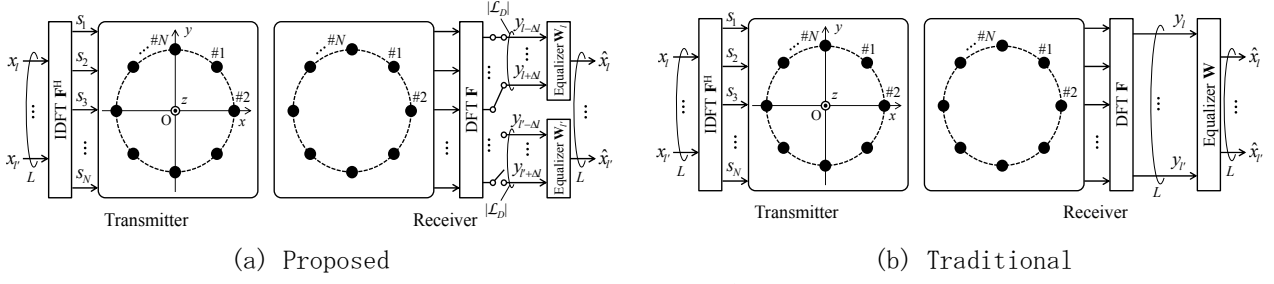


図 10 提案方式の概念





(a) Proposed (b) Traditional  
図 11 干渉キャンセラを具備した OAM 多重伝送のシステム構成

$$C_{sum} = \sum_{l \in \mathcal{L}} \log_2 \left( 1 + \frac{\left| \sum_{k \in \mathcal{L}} w_{l,k} \sigma_{k,l} \right|^2 P_x}{\sum_{l' \in \mathcal{L} \setminus \{l\}} \left| \sum_{k \in \mathcal{L}} w_{l,k} \sigma_{k,l'} \right|^2 P_x + \sum_{k \in \mathcal{L}} |w_{l,k}|^2 P_n} \right) \quad (7)$$

次に、提案方式のシステム容量を解析する。提案方式では、アンテナ軸ずれに起因したモード間干渉について、隣接 OAM モードからの干渉が深刻となる点に鑑み [6], [7], OAM モード  $l = l \pm 1, \dots, l \pm \Delta l$  からの干渉のみ除去を行う。したがって、式(1)における等化後の受信信号ベクトルは、次式のように書き換えられる。

$$\hat{\mathbf{x}}_l = \mathbf{W}_l \boldsymbol{\Sigma}_l \mathbf{x}_l + \mathbf{W}_l \mathbf{u}_l + \mathbf{W}_l \mathbf{n}_l \quad (8)$$

$$\mathbf{W}_l = \left( \boldsymbol{\Sigma}_l^H \boldsymbol{\Sigma}_l + \frac{P_n}{P_x} \mathbf{I}_{|\mathcal{L}_D|} \right)^{-1} \boldsymbol{\Sigma}_l^H \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_l = [\sigma_{l,k}]_{l,k \in |\mathcal{L}_D|} \quad (10)$$

$$\mathcal{L}_D = \{l - \Delta l, \dots, l + \Delta l\} \quad (11)$$

ただし、 $\mathbf{W}_l$ ,  $\mathbf{x}_l$ ,  $\mathbf{n}_l$ , 及び  $\mathbf{I}_{|\mathcal{L}_D|}$  は、それぞれ MMSE フィルタ行列、変調信号ベクトル、雑音ベクトル、及び単位行列である。また、 $\mathbf{u}_l$  は、非隣接モードからの干渉ベクトルであり、その成分  $u_l$  は、次式のように表される。

$$u_l = \sum_{l' \in \mathcal{L} \setminus \mathcal{L}_D} \sigma_{l,l'} x_{l'} \quad (12)$$

ここで、提案方式では、フィルタ行列  $\mathbf{W}_l$  がモード多重数  $L$  回だけ生成されることから、提案方式の計算コストは、次式のように表される。

$$C_p = L \times (7|\mathcal{L}_D|^3 / 2 + |\mathcal{L}_D|^2 / 2) \quad (13)$$

式(8)より、式(5)における等化後の OAM モード  $l$  の受信信号は、次式のように書き換えられる。

$$\hat{x}_l = \mathbf{w}_{l,l} \sigma_{l,l} x_l + \left( \sum_{l' \in \mathcal{L}_D \setminus \{l\}} \mathbf{w}_{l,l'} \sigma_{l,l'} x_{l'} + \mathbf{w}_{l,l} \mathbf{u}_l \right) + \mathbf{w}_{l,l} \tilde{\mathbf{n}}_l \quad (14)$$

ただし、 $\mathbf{w}_{l,l}$  及び  $\sigma_{l,l'}$  は、それぞれ  $\mathbf{W}_l$  の第  $l$  行ベクトル及び  $\boldsymbol{\Sigma}_l$  の第  $l'$  列ベクトルである。式(14)より、提案方式のシステム容量は、次式のように計算される。

$$C_{sum} = \sum_{l \in \mathcal{L}} \log_2 \left( 1 + \frac{\left| \sum_{k \in \mathcal{L}_D} w_{l,l,k} \sigma_{k,l} \right|^2 P_x}{\sum_{l' \in \mathcal{L} \setminus \{l\}} \left| \sum_{k \in \mathcal{L}_D} w_{l,l,k} \sigma_{k,l'} \right|^2 P_x + \sum_{k \in \mathcal{L}_D} |w_{l,l,k}|^2 P_n} \right) \quad (15)$$

### 3.3 特性評価

表 1 は、システム諸元を示したものである。本特性評価では、アンテナ素子数及びモード多重数  $N=L=64$  に設定するものとする。また、アンテナ軸ずれの影響については、実験的評価 [9] に基づき、送信UCAの傾斜角  $0 \leq \phi \leq 0.4 \text{ deg}$  を想定するものとする。

図 12 は、フィルタサイズ  $|\mathcal{L}_D|$  及び正規化計算量及びシステム容量特性を示したものである。ただし、送信UCAの傾斜角  $\phi = 0.2 \text{ deg}$  及び  $0.4 \text{ deg}$  を想定している。同図に示すように、 $|\mathcal{L}_D| = 64$  に相当する従来方式のシステム容量と同等となることがわかる。一方、 $|\mathcal{L}_D| \geq 17$  における提案方式の計算コストは、従来方式のそれと比較して大きくなることがわかる。これは、提案方式において、フィルタ行列がモード多重数  $L$  回だけ生成されることに起因した結果である。以上より、提案方式においてフィルタサイズ  $|\mathcal{L}_D| = 9$  と設定することにより、従来方式と同等のシステム容量を達成しつつ、計算コストを 80% 削減することが可能となる。

図 13 は、通信距離  $z$  対システム容量特性を示したものである。ただし、送信UCAの傾斜角  $\phi = 0.4 \text{ deg}$  を想定している。同図に示すように、通信距離  $z$  が比較的短い場合には、フィルタサイズ  $|\mathcal{L}_D|$  の増加に伴い提案方式のシステム容量が向上し、 $|\mathcal{L}_D| = 9$  の場合の提案方式のシステム容量は、従来方式のそれと同等となることがわかる。さらに、通信距離  $z > 50 \text{ m}$  のように比較的長い場合には、従来方式と同等のシステム容量を達成するのに必要となるフィルタサイズを  $|\mathcal{L}_D| = 7$  にまで削減することがわかる。これは、ビーム広がりの影響が増大することにより、高次のOAMモードからの干渉の影響が低下することに起因した結果である。

## 4 むすび

本研究調査では、OAM 多重伝送を対象として、固定無線通信への適用を想定した場合の基本特性を定性的・定量的に把握するとともに、現実的な環境下において特に課題となるアンテナ軸ずれを採り上げ、モード間干渉の特徴に着目した簡易干渉キャンセラの提案を行った。具体的には、搬送波周波数、アンテナ指向性やアンテナ軸ずれが伝送特性に与える影響を計算機シミュレーションにより把握するとともに、隣接モードからの干渉が支配的となることに着目し、効率的に干渉キャンセルを行う方式を提案した。OAM 多重伝送の基本特性評価については、搬送波周波数により、伝搬減衰とビーム広がりの影響が変化することから、想定する通信距離において適用する搬送波周波数の選択が重要となることがわかった。また、アンテナ指向性の適用は、特に通信距離が長い場合に有効であり、アンテナ軸ずれの影響については、それに起因したモード間干渉が、特に隣接モードから生じることが明らかとなった。さらに、アンテナ軸ずれ対策としての簡易干渉キャンセラの有効性については、干渉キャンセルの対象を適切に限定することにより、全てのモード間干渉を除去する従来方式と比較して、同等のシステム容

表 1 システム諸元

Carrier frequency $f_c$	28 GHz
Number of antenna elements $N$	64
Number of OAM modes $L$	64
OAM mode number $l$	$-31, -30, \dots, 32$
Radius of UCA $R$	0.30 m
Antenna gain	10 dBi
Total transmit power	23 dBm
Noise power	-80 dBm
Angle of transmitting UCA $\phi$	0.2 deg, 0.4 deg

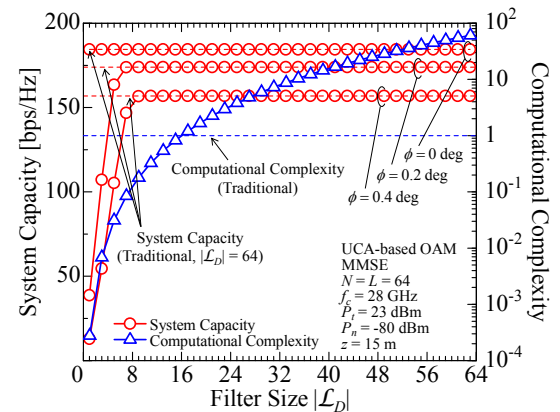


図 12 フィルタサイズの選定

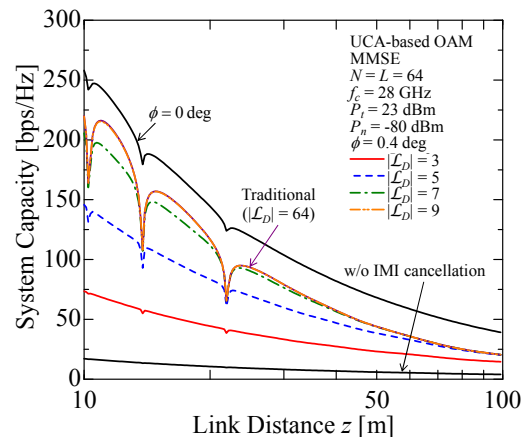


図 13 通信距離対システム容量特性

量を達成しつつ、干渉除去に要する計算コストを80%削減できることがわかった。また、通信距離を長くすると、ビーム広がりにより実効的なモード数が減少することから、フィルタサイズの低減が可能となることがわかった。

## 【参考文献】

- [1] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. D. Silva, F. Tufvesson, A. Ben-jebbour, and G. Wunder, “5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, June 2017.
- [2] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sept. 2019.
- [3] Z. Pi, J. Choi, and R. Heath, “Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5G: Fixed access and backhaul,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 4, pp. 138–144, Apr. 2016.
- [4] Y. Ren, L. Li, G. Xie, Y. Yan, Y. Cao, H. Huang, N. Ahmed, Z. Zhao, P. Liao, C. Zhang, G. Caire, A. F. Molisch, M. Tur, and A. E. Willner, “Line-of-sight millimeter-wave communications using orbital angular momentum multiplexing combined with conventional spatial multiplexing,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 3151–3161, May 2017.
- [5] F. E. Mahmoudi and S. D. Walker, “4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 223–226, Apr. 2013.
- [6] D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, K. Hiraga, and T. Nakagawa, “Orbital angular momentum (OAM) multiplexing: An enabler of a new era of wireless communications,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E100-B, no. 7, pp. 1044–1063, July 2017.
- [7] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, “Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges for 6G and beyond,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729–78757, June 2019.
- [8] R. Chen, H. Xu, J. Li, and Y. Zang, “Misalignment-robust receiving scheme for UCA-based OAM communication systems,” *Proc. IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC 2017-Spring)*, pp. 1–5, June 2017.
- [9] 佐々木英作, 平部正司, グェントウン, 善久竜磁, 田邊浩介, 田中宣幸, 木全祐介, “ミリ波帯における OAM モード多重伝送技術,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, CI-5-5, Sept. 2017.
- [10] H. Suganuma, S. Saito, K. Ogawa, and F. Maehara, “Inter-mode interference suppression employing even-numbered modes for UCA-based OAM multiplexing,” *Proc. 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2019)*, pp. 1–6, Dec. 2019.
- [11] S. Saito, Y. Ito, H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, “Performance analysis of polarized OAM multiplexing considering the effect of polarization interference,” *Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2020)*, pp. 1–6, June 2020.
- [12] S. Saito, Y. Ito, H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, “Efficient inter-mode interference cancellation method for OAM multiplexing in the presence of beam axis misalignment,” *Proc. 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2021)*, pp. 1–6, June 2021.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Effectiveness evaluation of polarization in OAM multiplexing	IEICE Communications Express, vol. 10, no. 4	2021年4月
Efficient inter-mode interference cancellation method for OAM multiplexing in the presence of beam axis misalignment	2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2021)	2021年6月
Effectiveness evaluation of polarization in UCA-based OAM multiplexing	2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020)	2020年12月
Performance analysis of polarized OAM multiplexing considering the effect of polarization interference	IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2020)	2020年6月
アンテナ軸ずれ存在下における OAM 多重伝送のモード間干渉抑圧に関する一検討	2021 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-3-5	2021年9月
OAM 多重伝送への偏波多重の適用効果に関する検討	電子情報通信学会技術研究報告, SRW2020-32	2020年11月
OAM 多重伝送への偏波多重の適用効果に関する基礎的検討	2020 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-8	2020年9月