



Title	広帯域大容量無線伝送に向けた高周波帯空間多重伝送システムの高度化に関する研究
Author(s)	笹木, 裕文
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/103222">https://doi.org/10.18910/103222</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名（ 笹木 裕文 ）	
論文題名	広帯域大容量無線伝送に向けた高周波帯空間多重伝送システムの高度化に関する研究
論文内容の要旨	
<p>本論文は、将来の無線システムにおける無線伝送の広帯域大容量化に向け、高周波帯空間多重伝送システムの高度化に関する研究を行った成果をまとめたものである。</p> <p>第2章では、高周波帯無線システムの特徴と課題、および、無線伝送の大容量化に有効な空間多重化・広帯域化・高利得化それぞれに必要な要素技術について説明し、本研究の位置づけを明確化した。その上で、複数の空間モードを持つビームを同一方向に重ねて伝送可能な空間モード多重伝送、および高周波帯空間多重伝送システムの実用的・経済的なビームフォーミングシステム構成に関する技術動向を示した。さらに、光の広帯域性および低消費電力特性を活用し、光伝送ネットワークとのシームレスな接続および経済的な高周波帯空間多重伝送システムの構築を可能とする、フォトニクス技術の無線システムへの応用について紹介し、第3章以降の技術提案への導入を行った。</p> <p>第3章では、高周波帯空間多重伝送システムにおける空間多重化方式の高度化に向け、電波の軌道角運動量 (Orbital Angular Momentum : OAM) を用いた空間モード多重化方式について検討した。具体的には、多重円形アレーアンテナを用いてそれぞれのOAMモード内でさらに信号を空間多重することにより、空間多重数の飛躍的増大が可能なOAM-MIMO多重伝送技術を提案した。さらに、OAM-MIMO多重伝送の実用的・経済的なシステム構成として、OAMモード生成分離処理をアナログ回路 (Butler matrix回路) が担うことにより、デジタル処理とアナログ処理に効率的な機能配分を行う2つのデジタルアナログハイブリッドシステム構成を提案し、空間多重処理に係る演算量と高価なRFチェーンが大幅に削減できることを示した。28 GHz帯OAM-MIMO多重伝送システムを試作し、アンテナ間距離10 m、2 GHzの伝送帯域幅を用いて最大伝送速度200 Gbpsの無線伝送を実証した。さらに、フィールド環境において、750 MHzの伝送帯域幅を用いてアンテナ間距離20 mから100 mにおける総伝送容量を評価した結果、100 mまでの距離において20 Gbps以上の総伝送容量を実現し、実環境における提案システムの有効性を示した。</p> <p>第4章では、高周波帯空間多重伝送システムの広帯域化に向け、OAMモードの生成分離処理を担うButler matrix回路の高周波広帯域化について検討した。はじめに、Butler matrix回路の平面交差を排除する多層構造設計を行うとともに、多層Butler matrix回路を構成する移相器および3-dBカプラの広帯域化に関して、それぞれ中空方形導波管内の電磁波伝搬理論に基づく形状設計と、電磁界解析に基づく形状最適化による設計方法を提案した。設計および試作したButler matrix回路は、135 GHzから170 GHzの35 GHzの帯域幅にわたり、信号電力対モード間干渉電力比は15 dB以上であり、帯域内で平均19.2 dBから25.2 dBの極めて高いOAMモード生成分離性能を確認した。さらに、試作回路を組み込んだサブテラヘルツ帯OAM多重伝送実験評価により、32 GHzの伝送帯域幅を用いて1.58 Tbpsの無線伝送を実現した。</p> <p>第5章では、高周波帯空間多重伝送システムの高利得化に向けて、空間モード多重伝送を行う無線バックホール・フロントホールと、高密度ビーム形成を行う無線アクセスマッシュワークそれぞれのシナリオに対し、自由空間伝搬損失を補うアンテナ実効面積拡大のアプローチを検討した。空間モード多重伝送においては、アレーインテナの拡大像を形成するイメージングリフレクタアンテナ技術に着目した。空間モード状態を維持しつつ自己遮蔽や散乱の影響を排除するため、回転対称かつ焦点軸をオフセットしたイメージングリフレクタアンテナ形状を提案し、送受それぞれの実効アンテナ径の拡大に比例した伝送距離の延伸を実証した。さらに、無線アクセスマッシュワークにおける基地局技術として、光回路と潤沢な波長資源を活用した光領域信号処理により、従来の電気回路と比較して大幅に簡易な構成でフェーズドアレーリンテナが構築可能な2次元無線ビームフォーミング方式を提案し、固定または連続可変のビーム形成が可能であることを原理検証した。</p> <p>第6章では、以上の研究によって得られた成果を総括し、本論文の結論を述べた。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 笹木 裕文 )		氏名	
論文審査担当者	主査	教授	丸田 章博
	副査	教授	落合 秀樹
	副査	教授	滝根 哲哉
	副査	教授	田中 雄一
	副査	教授	宮地 充子
	副査	教授	清水 昌平
	副査	教授	駒谷 和範
	副査	准教授	三科 健

## 論文審査の結果の要旨

コンテンツやアプリケーションの多様化により継続的な増大が予測されるモバイルデータトラヒックに対応するため、将来の無線システムではさらなる大容量化が求められる。本論文は、無線伝送の広帯域大容量化に向けた高周波帯空間多重伝送システムの高度化に関して、三つの研究成果をまとめている。

- (1) 高周波帯空間多重伝送システムにおける空間多重化方式の高度化に向け、電波の軌道角運動量 (OAM) を用いた空間モード多重化方式について検討している。具体的には、無線伝送の空間多重数を飛躍的に増大するために、ビームの円筒座標系における径方向の自由度を用いて多重化を行う OAM-MIMO 多重伝送技術を提案している。そして、OAM-MIMO 多重伝送のビームフォーミングに係る機能をデジタル処理とアナログ処理に効率的に配分するデジタルアナログハイブリッド構成を提案している。また、提案構成を含む複数のアンテナ構成およびシステム構成における回路規模・演算量と伝搬環境変動への耐性を比較し、提案構成の実用性を示している。最後に、OAM-MIMO 多重伝送システムを試作して実験系を構築し、28 GHz 帯におけるシールドルームおよびフィールド環境における伝送実験により、提案システムの有効性を検証している。
- (2) 高周波帯空間多重伝送システムの広帯域化に向け、(1)で提案した OAM-MIMO 多重伝送システムの主要アナログ回路である Butler matrix 回路の高周波広帯域設計方法を提案している。具体的には、10 GHz 幅を超える超広帯域を利用するためサブテラヘルツ帯に着目し、Butler matrix 回路を構成する移相器および 3-dB カプラの導波管回路の形状設計を行っている。そして、設計した移相器および 3-dB カプラを組み合わせたサブテラヘルツ帯で動作する  $8 \times 8$  Butler matrix 回路を多層構造で設計および試作し、OAM モードの生成分離性能を信号対干渉電力比で示すモードアイソレーションを指標として評価している。その結果、モードアイソレーションはすべての OAM モードに対して 135 GHz から 170 GHz の範囲で 15 dB を超え、帯域内の平均値は 19.2 dB から 25.2 dB となり、極めて高い OAM モード生成分離性能を確認している。さらに、試作した Butler matrix 回路を組み込んだサブテラヘルツ帯 OAM 多重伝送システムを構築し、32 GHz の伝送帯域幅を用いて 1.58 Tbps の無線伝送速度を達成している。
- (3) 高周波帯空間多重伝送システムの高利得化に向けて、空間モード多重伝送を行う無線バックホール・フロントホールと、高密度ビームフォーミングを行う無線アクセスネットワークそれぞれのシナリオに対し、自由空間伝搬損失を補償するためのアンテナ実効面積拡大のアプローチを検討している。空間モード多重伝送においては、アレーランテナの拡大像を形成するイメージングリフレクタアンテナ技術に着目している。空間モード状態を維持しつつ自己遮蔽や散乱の影響を排除するため、回転対称かつ焦点軸をオフセットしたイメージングリフレクタアンテナ

形状を提案し、送受信それぞれの実効アンテナ径の拡大に比例した伝送距離の延伸を実証している。さらに、無線アクセスネットワークにおける基地局技術として、光回路と潤沢な波長資源を活用した光領域信号処理により、従来の電気回路と比較して大幅に簡易な構成でフェーズドアレーシステムが構築可能な2次元無線ビームフォーミング方式を提案し、固定または連続可変のビームフォーミングが可能であることを原理検証している。

以上のように、本論文は将来の無線システムにおける無線伝送の広帯域大容量化に向け、高周波帯空間多重伝送システムの高度化に関する研究を行った成果をまとめたものである。情報理論から導かれる通信路容量を増やすための、空間多重化・広帯域化・高利得化の三つの方向性の中で無線伝送の大容量化に向けたアプローチを整理し、周波数資源の潤沢な高周波帯における空間多重伝送システムの高度化を実現する技術を提案・実証している。これらの成果は広帯域大容量化が要求される将来の無線システムを構築する上で不可欠な成果であり、工学的な見地から非常に意義深い。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。