

令和元年5月23日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06337

研究課題名(和文) マイクロ波OAM通信用アンテナの研究

研究課題名(英文) Research on antennas for microwave OAM communication

研究代表者

斉藤 昭 (Saitou, Akira)

電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・客員教授

研究者番号：80536920

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：軌道角運動量を有するOAM波の生成・受信特性を解析し、ほぼ単一OAMモードを放射するループアンテナの構造を解明した。この構造の4素子アレイアンテナを試作し、5GHz帯近距離OAM通信評価(伝送距離3cm)から、信号波と干渉波の比(SIR)が20dB以上で、4伝送路多重のMIMO通信が可能なことを実証した。実際の通信性能の評価も行い、干渉波抑制MIMO信号処理を要することなく、2伝送路64QAM通信が可能なことを実証した。パラボロイドを用いてOAM波のビーム広がりを抑制した5GHz帯遠距離4伝送路OAM通信(通信距離90cm)の評価を行い、SIRが18dB以上の良好な特性を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまではあまり使用されることになかった軌道角運動量を有するOAM波動の物理的な生成方法を明確にした。OAM波動の直交性を活用し、信号処理を行わなくても伝送路多重通信が可能なことを示した。OAM通信は、周波数が同じでもOAM波の空間分布の違いで伝送路多重を行うもので、貴重で有限な資源である周波数の利用効率が飛躍的に向上される。さらに本提案の方法では、OAM波がアンテナ単独で放射できることからシンプルなシステムが実現できると期待される。また通信以外に、OAM波を用いたレーダ、センサへの応用があり、シンプルなOAM波生成方法を生かして、新たな特徴をもつセンサへの展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Physical mechanism of OAM (orbital Angular Momentum) communication characteristics has been analyzed for the generation and reception of OAM waves. Appropriate configurations of a loop antenna were clarified to radiate an approximately unique OAM mode. Four-element loop antenna arrays with the configurations were fabricated. For short-range OAM communication at a 5 GHz band for the distance of 3 cm, the measured signal to interference ratios were more than 20 dB, which is promising result for four-channel MIMO communication. For more practical estimate for the communication, two-channel 64 QAM communication was shown to be realized without the MIMO signal processing to compensate the interference. For long-range OAM communication at a 5 GHz band for the distance of 90 cm, paraboloids were utilized to suppress the expansion of the OAM waves. Measured signal to interference ratio was better than 18 dB.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：情報通信工学 アンテナ理論 MIMO 軌道角運動量

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

インターネットの豊富なコンテンツと、光回線による超高速ネットワークならびに最終ユーザへの無線ネットワークの普及で、“いつでも、どこでも、誰とでも”、さらには“いまだけ、ここのだけ、あなただけ”という個人のニーズに合わせた情報の提供を可能にする高度情報社会への進展が急速に進んでいる。さらに、センサーネットワークを用いた人を介さない通信によるビッグデータの収集も並行して進んでいる。これらを支える無線システムとして、携帯電話、WiMAX、無線LAN、ブルートゥース、UWB、ジグビー等多様なシステムが提供されている。加えて、これらのシステムを“シームレス”に接続し、各システムの“良いとこ取り”を提供するサービスも進展している。これらの無線システムは、固有の通信帯域を占有して通信を行うこと、また大量のデータを高速に伝送するためには広い周波数帯域を用いることが有利なことから、貴重な資源である周波数を有効利用することは重要な課題となっている。従って有効利用の指標として、伝送情報量を帯域幅で割った周波数あたりの伝送レート (bit/Hz) を向上できる技術の重要性が増大している。

このような技術として複数のアンテナを送受信側に配置した MIMO 技術があり、同じ時間内に同じ帯域内で、伝搬路の違いを活用して多重化する空間多重化の手法が有効な対策となっている。ここで、送受アンテナとも n 個の MIMO について考えると、送信アンテナの電圧電流と受信アンテナの電圧電流の関係は伝搬路の伝達関数例えば Z 行列で一意に定めることができ n 行 n 列の正方行列として表現される。この行列の固有ベクトルを用いると上記正方行列は対角化でき、 n 個の固有ベクトルに関する伝達関数は独立となるので、 n 重の多重化が可能となる。しかし本質的に混ざり合った信号を数学的に分離するため複雑な信号処理が必要となり、マルチパス、パス内での伝搬定数の擾乱等の影響でさらに複雑な信号処理を要するようになる。また複数のアンテナを協調させて動作させることになるので、システムとして複雑にならざるを得ない欠点があった。

一方、同一の周波数における多重化の手法として、近年電磁界の軌道角運動量が保存されることを活用した、OAM (Orbital Angular Momentum) 通信が提案されている。この技術は、軌道角運動量が光 (電磁波) の新たな保存量として 1992 年に Allen により解明されて以来、主に光通信の分野で開発が進められてきた。レーザのようなビーム断面がガウス分布系の波動では、断面における方位 ϕ に関する位相空間分布は、通常の波では一定である。一方、OAM 波では $\exp(jm\phi)$ (m は OAM 波のモード次数) に従い方位 ϕ とともに線形に変化し、螺旋状に位相面が変化すると説明される。

波長の短い光ではこのような波動は、(1)レーザとホログラムやスパイラル位相板を用いると、比較的容易に作製できる(2)光ファイバを工夫することでモードが保存されたまま伝送できる(3)上記位相素子等でモード分離もできる等の特徴がある。このことから、同一周波数で多重化を可能にする新たな自由度として注目され、実用化に向けた実験でも多重化が可能なが確認されてきた。これに刺激され、この手法をマイクロ波でも使用して周波数効率を向上させようという研究が近年になって開始されている。しかしながら、固有モードの送信 (生成) 方法、受信 (分離) 方法、絞られたビームの伝送方法等が光とマイクロ波では大きく異なるため、実現に際してはマイクロ波独特のかなり異なった技術開発が必要になる。実際、OAM 波の送信に関しては、スパイラル位相板と収束機能を兼ねたスパイラル状に切込みを入れたパラボラアンテナが提案されているものの、量産的には容易ではなく非常に大きなシステムを除くと適用は難しい。また受信に関しても、位相面の回転を分離できるマイクロ波独自の受信方法を考える必要がある。これに対して、位相面が回転する電磁界をアレイファクタを用いて実現する手法も提案されている。これは、アレイアンテナを送信側に円周上に配置し、各アンテナ素子間の位相を一定の間隔でずらすことで、円周上の受信位置にも位相面が一定の差を有する電磁界を作り出す。このずらす位相量を離散的に変えることで異なる OAM モードを作り出し、モード間で多重化を行うもので、MIMO の手法を転用したものとも言える。しかし、OAM モードを用いた場合には、同心円上に配置された受信電界はアンテナの空間配置と一意の位相差となるため、信号処理は容易になるという長所を有していると考えられる。ただしこの場合でも一般の MIMO 通信の場合と同様、アンテナ間の受信信号間の相関から各モードの信号を取り出すための信号処理が必要であり、送信時には一定の位相差をアンテナ間に与えるため位相器が必要になる等、かなり複雑な通信システムになってしまう。

2. 研究の目的

高度情報社会の基盤の一翼を担う無線通信では、伝送速度・容量を増大させようと多様なシステムが帯域の確保を目指しているため、使用できる周波数が逼迫しており、周波数利用効率の向上が急務となっている。ここでは、電磁波の新たな自由度と考えられる軌道角運動量 (Orbital Angular Momentum) を用いた同一周波数で多重化する OAM 通信に関して、これまで主に光通信で研究されていたものをマイクロ波通信に拡張し周波数効率改善に有効なことを実証する。光とマイクロ波では必要な技術が大幅に異なることを考慮し、OAM モードの送受信のメカニズムを解析し、並行して経済的かつ有効なマイクロ波 OAM 通信用送受信アンテナを設計・試作・評価しその有効性を示す。

3. 研究の方法

アンテナの OAM モードの放射・受信特性の解析に関しては、電磁界の固有モード展開の手法を用いて OAM モードの放射性能、放物面鏡で収束させた場合の電磁界、受信時の端子電圧の振幅・位相を解明する。この理論解析と並行して、シミュレーションを用いて単一 OAM モードが支配的になるアンテナ構造を明らかにし、試作によってその有効性を実証する。また同一周波数で異なった OAM モードを放射させるために、アンテナ内部に集中定数素子、バラクタを配置して、単一 OAM モードが支配的になる周波数が制御できる集中定数素子内蔵 OAM アンテナの構造をシミュレーションで設計するとともに、試作して実証する。また開発した送受 OAM アンテナの通信性能を評価する。

4. 研究成果

ループアンテナの放射電磁界と OAM 波の類似性に着目し、本研究の目標として、第 1 にループアンテナの軌道角運動量 (OAM: Orbital Angular Momentum) モードの放射・受信特性の解析を挙げた。図 1 に示した円形ループアンテナ上の電流分布は、(1)式のようにフーリエ級数

$$I(\phi) = I_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\phi) \quad (1) \quad \text{展開できる。}$$

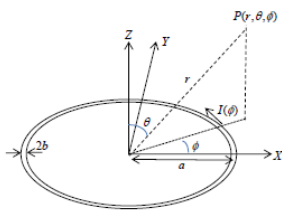
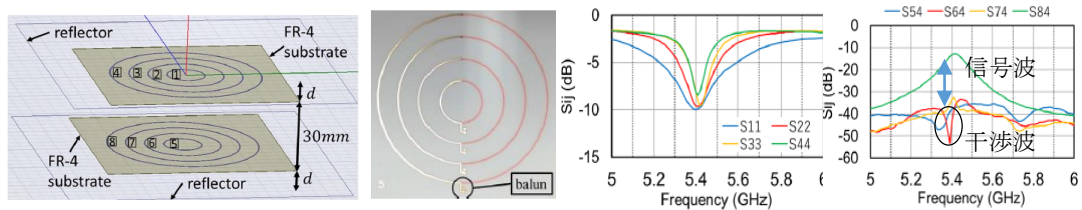


図 1 円形ループアンテナの構成

この電流展開係数 I_n を用いると、ループアンテナの放射電磁界を球面座標系の固有モードで展開でき、ループアンテナの放射電磁界は、磁気量子数 m 、軌道角運動量子数 l で規定される固有モードの 1 次結合で表される。ここで、次数 m の電流展開係数のみが 0 でなく、他の次数はすべて 0 である場合、放射電磁界の磁気量子数は m 次の単一モードとなることを示した。また、磁気量子数 m の単一モードの電磁界の運動量、軌道角運動量を評価し、OAM 波は電磁界の光子 1 個当たりの軌道角運動量が $m\hbar$ で均一な電磁界であることを示した。従ってループアンテナ上の電流分布を単一の次数に近づけることで、単一 OAM モード

の電磁界をループアンテナから直接放射できることを示した。

次に電流展開係数が単一の次数のみが支配的となり放射電磁界が OAM 単一モードとなる条件を求めるため、一般化 Z 行列を用いた解析を行い、モード単一性改善には(1)ループアンテナ導体周囲長をほぼ波長の整数倍とすればよいこと、また近接して反射板を付加することで一層の単一モード化が実現できることを解析的に示した。この結果を実験的に検証するため 4 素子ループアンテナを試作評価した結果を図 2 に示す。



(a)近距離 OAM 通信の評価 (b)4 素子アレイ試作品 (c)実測反射損失 (d)実測通過特性

図 2 近距離 OAM 通信用アレイとその特性

各アンテナのループ半径は 7.9 / 15.8 / 23.7 / 31.6 mm、反射板との距離は 5mm、通信距離は 3cm としたときの 5GHz 帯の通過特性を(d)に示す。同じループ半径間の通過である信号波が他のループからの通過より 19.2dB (信号干渉波比: SIR) 以上大きく、同じ空間を伝搬しているにも関わらずほぼ信号波のみが受信され、信号処理を要することなく MIMO 通信が可能なが実証された。なお図にはアンテナ 4 を励振した場合の通過特性を示しているが、他のアンテナを励振した場合はさらに SIR は大きく、この値が通信の最悪状態を示す SIR に相当する。

また、一般化 Z 行列の解析から、端子方位をアンテナごとに制御すると、通過特性が制御できることを解析的に明らかにし、送受アレイの端子方位を 180 度反転させた構成で、信号波が干渉波より 23.6dB 大きくできることを実験でも実証した。この手法は干渉波同士の強めあい、打ち消しがあることを活用して、端子方位を制御することで干渉波の打ち消しを最適化する手法であり、MIMO の干渉波抑制信号処理をアンテナで行わせることに相当すると考えられる。

さらに、 m 次の OAM 波では端子方位を $\pi/(2m)$ ずらすことで、受信電流は 0 にできることを解析的に求めた。この場合の受信電磁界は、端子方位をずらしていないものとは比べると直交した電磁界であり、OAM 波の直交偏波電磁界と解釈できることを明らかにした。これを用いるとループ半径が同じでも、偏波に基づく直交性によって伝送路多重化が可能で、用いるループ半径の種類数の 2 倍の多重度が可能なことを明らかにした。

第 2 に挙げた、放物面鏡を用いて OAM 通信距離を延伸させる研究に関しては、第 1 項で試作したループアレイを放物面鏡の焦点面に配置して、遠距離 OAM 通信性能を評価した。図 3 に遠距離 OAM 通信の測定系と、実測評価特性を示す。モード単一性を向上させるため、反射板との距離は 2mm に接近させ、この場合の 4 素子のループ半径は 7.99 / 15.93 / 23.88 / 31.83 mm とした。パラボロイドの焦点距離 22.5cm、半径は 30cm のものを使用し、伝送距離は 90cm とした。アレイとパラボロイドの中心軸合わせは性能に重大な影響を及ぼすため、レーザと XYZ

方向の微調器で慎重に目合わせを行った。

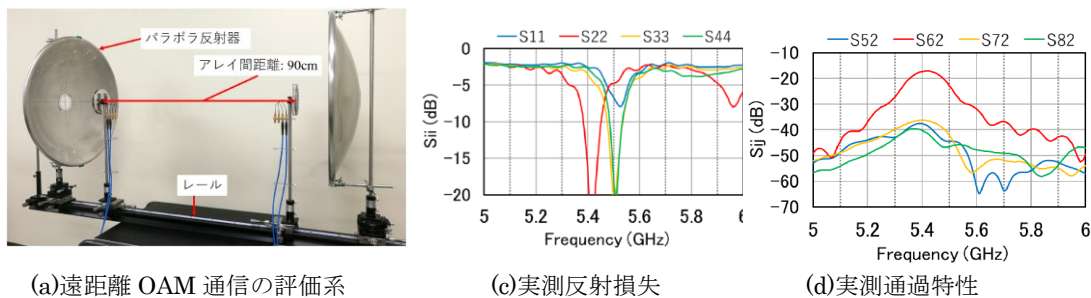


図3 近距離 OAM 通信用アレイとその特性

4 素子のうち信号波と干渉波の差が最も小さかったアンテナ 2 を励振した場合の通過特性を図 3(d)に示す。5.4~5.5GHz で信号波と干渉波の比は 19dB 以上が得られ、MIMO 通信時の干渉波抑制信号処理がなくても、4 伝送路 MIMO 通信が可能そうな特性が得られた。また回折を抑制するため 12GHz 帯の 3 素子アレイも試作し、伝送距離 3.2m で 9.5dB の SIR が得られた。通信周波数を 100GHz 程度のミリ波に周波数を向上させることで 100m 程度の伝送距離も期待できる。

第 3 に挙げた、集中定数素子内蔵 OAM アンテナで共振周波数を可変とする開発では、集中定数素子内蔵アンテナにおける、信号波の通過・干渉波の抑制とも集中定数素子のないものより劣ったこと、集中定数素子がなくても共振周波数は比較的制御性が良かったことを踏まえ有用性は小さいと判断した。

第 4 に挙げた通信性能の評価に関しては、5GHz 帯近距離 OAM 通信性能に関して、試作したアレイで変調信号を送受する評価を行った。使用したアレイは反射板アレイ間距離 2mm、ループ半径 7.99 / 15.93 / 23.88 / 31.83 mm の試作品を用い、通信距離は 3cm とした。ベクトル信号発生器(キーサイト製 N5172B)は 2 台しか準備できなかったため、アンテナの端子送信側はアンテナ 1 と 3、受信側はそれぞれループ半径の等しいアンテナ 5 と 7 を用いた。他の端子は 50Ω 終端しており、アンテナ 2,4 も誘導電流が流れるため干渉波を放射していると考えられる。受信側の 2 端子は高解像度オシロスコープ (キーサイト製 MSOS804A) に接続し、QAM 信号の分離度を評価した。オシロスコープ側では、干渉波補償の信号処理は行っていない。変調信号の中心周波数は 5.47GHz、帯域幅は 10M Symbols/s の 64QAM 信号を、端子 1 に入力した場合並びに端子 3 に入力した場合の、受信信号のコンスタレーションを右に示す。このときの EVM は、端子 5 の受信信号では 4.0%、端子 7 の受信信号では 3.4%で、64QAM 信号が 2 伝送路とも明瞭に分離でき、干渉波補償信号処理がなくても MIMO 多重通信が可能なることを実測で確認した。

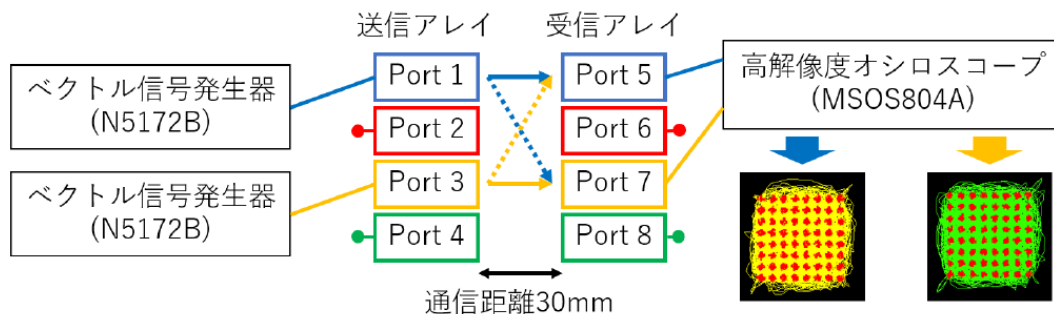


図4 OAM 通信性能の評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 14 件)

- ① 斉藤昭, 山岸遼平, 大塚啓人, 石川亮, 本城和彦, “円形ループアンテナアレイに平面波が入射した場合の受信電流の解析,” 信学会総合大会, 査読なし, 3月 2019 年
- ② 山岸遼平, 大塚啓人, 斉藤昭, 鈴木博, 石川亮, 本城和彦, “円形ループアンテナアレイを用いた OAM 通信における反射板近接化の効果,” 信学ソサイエティ大会, 査読なし, 9月 2018 年
- ③ 大塚啓人, 山岸遼平, 斉藤昭, 鈴木博, 石川亮, 本城和彦, “12 GHz 帯 OAM 通信用ループアンテナアレイにおける遠距離通信評価,” 信学ソサイエティ大会, 査読なし, 9月 2018 年
- ④ 三宅久之助, 斉藤昭, 大塚啓人, 山岸遼平, 鈴木博, 石川亮, 本城和彦, “ループアンテナの直交偏波を活用した 8 チャンネル多重近距離 OAM 通信の実測評価,” 信学ソサイエティ大会, 査読なし, 9月 2018 年

- ⑤ 齊藤昭、山岸遼平、大塚啓人、石川亮、本城和彦、“アンテナ内 2 端子ループアレイを用いた OAM 通信における多重度倍増の検討、”信学会総合大会、査読なし、3 月 2018 年
- ⑥ Y. Yamagishi, H. Otsuka, A. Saitou, R. Ishikawa, K. Honjo, " Improvement of Mode Uniqueness for OAM Communication Using Loop Array with Reflector Plane," Proc. APMC, , 査読あり pp.1095-1098, 11 月 2017 年
- ⑦ 齊藤昭、山岸遼平、大塚啓人、石川亮、本城和彦、“ループアンテナアレイを用いた OAM 通信における多重度倍増の検討、”信学会ソサイエティ大会、査読なし、9 月 2017 年
- ⑧ 齊藤昭、大塚啓人、山岸遼平、石川亮、本城和彦、“円形ループアンテナの磁気量子数放射モード単一化の解析、” 信学会総合大会、査読なし、3 月 2017 年
- ⑨ 大塚啓人、山岸遼平、齊藤昭、石川亮、本城和彦、“ループアンテナアレイを用いた遠距離 OAM 通信の実測評価、”信学会総合大会、査読なし、3 月 2017 年
- ⑩ 山岸遼平、大塚啓人、齊藤昭、石川亮、本城和彦、“円形ループアンテナを用いた遠距離 OAM 通信における反射板による影響評価”信学総合大会、査読なし、3 月 2017 年
- ⑪ 齊藤昭、大塚啓人、山岸遼平、石川亮、本城和彦、“円形ループアンテナを用いた 4 値多重軌道角運動量通信方式、”信学会アンテナ・伝播研究会、査読なし、2 月 2017 年（推薦講演）
- ⑫ A. Saitou, R. Ishikawa, K. Honjo, "Four-value Multiplexing Orbital Angular Momentum Communication Scheme Using Loop Antenna Arrays." Proc. APMC, 査読あり、pp. 1-4, Dec. 2016
- ⑬ 齊藤昭、石川亮、本城和彦、“磁気量子数単一モードを放射するループアンテナアレイを用いた OAM 通信の解析、” 電信学会ソサイエティ大会、査読なし、9 月 2016 年
- ⑭ 大塚啓人、齊藤昭、石川亮、本城和彦、“ループアンテナアレイを用いた OAM 通信のシミュレーションならびに実測評価、”信学会ソサイエティ大会、査読なし、9 月 2016 年

〔図書〕（計 0 件）
なし

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）

(5)

名称：無線通信装置及びアンテナ装置

発明者：齊藤昭 本城和彦、石川亮

権利者：電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2016-87008

出願年：2016 年

国内外の別：国内

名称：無線通信装置及びアンテナ装置

発明者：齊藤昭、大塚啓人、本城和彦、石川亮

権利者：電気通信大学

種類：特許

番号：特願 2017-102931

出願年：2017 年

国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし