

ループアンテナアレイを用いた軌道角運動量超多重通信方式の研究開発 (175003001)

Research of Super Multiplicity OAM Communication Using Loop Antenna Arrays

研究代表者

石川 亮 電気通信大学大学院情報理工学研究科

Ryo Ishikawa, Graduate School of Informatics and Engineering,
The University of Electro-Communications

研究分担者

本城 和彦[†] 鈴木 博[†] 斉藤 昭[†]

Kazuhiko Honjo[†] Hiroshi Suzuki[†] Akira Saito[†]

[†]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

[†]Advanced Wireless Communication Research Center, The University of Electro-Communications

研究期間 平成 29 年度～平成 30 年度

概要

電磁界の軌道角運動量(OAM)固有モードを活用し、空間的に直交した OAM 各モードの電磁界に変調信号を乗せることで、同一空間・同一周波数・同一変調方式の信号の載った波動間に対しても、信号処理を要することなく受信点での信号分離・識別を可能とし、伝送路多重化ができることを実証した。OAM 単一モードを送受信するアンテナを開発し、異なるモードに対応する複数のアンテナをアレイ化した通信モジュールを開発した。このモジュールを用い、近距離超多重通信方式の実用性を、またパラボロイドと組み合わせて OAM 遠距離超多重通信方式の有用性を実証した。

1. まえがき

IoT の時代を迎える中で、イノベーションのシーズを生み出すための未来への投資として、基礎的・基盤的な研究開発を着実に推進してゆく必要がある。その一環として、統合 ICT 基盤分野における、5G/Beyond5G に向けた無線通信の大幅な大容量化・高速化を実現するための研究開発が求められている。OAM (軌道角運動量 Orbital Angular Momentum) 通信は、MIMO と同じく同一周波数で多重化が可能な大容量高速伝送方式として近年開発が進められているが、ここではループアンテナアレイを活用した、干渉波補償信号処理を行わなくても多重化が可能な、新規 OAM 通信方式の研究開発を行った。

2. 研究開発内容及び成果

本開発のループアンテナを用いた 4 素子 OAM 通信用アレイの開発では、干渉波の信号処理がなくても 4 伝送路多重 MIMO 通信ができることを目標にした。

そのために、ループアンテナが単一モード OAM 波を放射するポテンシャルを有することに着目し、信号波となる基本的には同一構造からなる送受ループアンテナ間の通過を大きく、干渉波となる異なるアンテナ構造からなる送受ループアンテナ間の通過を最小限にできるループアンテナアレイの開発を目指した。また、OAM 波はビーム中心がヌルという特徴があり、コリメートしても回折の影響で伝搬距離に伴う信号強度の低下が大きいことから、高周波化による改善度を評価するため、5GHz 帯の基本検討に加え 12GHz 帯用アレイも開発した。さらに多重化できる伝送路数をできるだけ大きくするため、偏波に対応する磁気量子数 $\pm m$ 次の縮退を解くことで、4 種類のループ半径で 2 倍の 8 伝送路多重を実現することも目標に挙げた。

干渉波と信号波の比を大きくする第 1 の方法として、ループアンテナの放射電磁界の解析から、ループアンテナ上の電流分布をフーリエ級数展開した係数がある次数のみが支配的になる場合、放射電磁界は単一の OAM モードに漸近することを見出し、その条件を一般化 Z 行列の手法を用いて解析した。この条件は信号波に関する入力インピーダンスの絶対値をできるだけ低くすればよいことを見出

した。そのためには、ループ周囲長を通信周波数における波長の概ね整数倍にすればよいこと、また入力インピーダンス実部を近接した反射板で低下させることでさらに改善できることを理論的に導出した。図 1 に反射板付き 4 素子ループアレイの構成を示す。図 2 はこれらの施策の効果を示すものである。左図は 4 素子アレイの i 番目アンテナ i のループ周囲長を各々波長の概ね i 倍としたものについて、放射電磁界に占める 0~7 次の OAM 次数の電力比 (電流アイソレーション IC) を最大の次数の電力を 0dB として比較したものを示す。ループ半径を最適化することでアンテナ i では信号波となる i 次の OAM 次数電力が最大(0dB)となっており、干渉波となるほかに次数の電力と比べて 14.5dB 以上のアイソレーション (SINR に相当) が取れている。図 2(b)はさらに反射板をアレイからの距離 d を 2mm としたもので、アイソレーションは 41dB と大幅に改善している。距離 d を近づけると入力インピーダンスが低下して整合が困難になるという実用的な制限はあるが、理論的には反射板を接近させることで無限に OAM 単一モードに近づけられる。

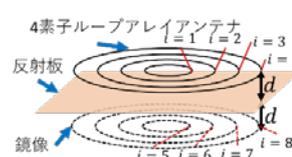
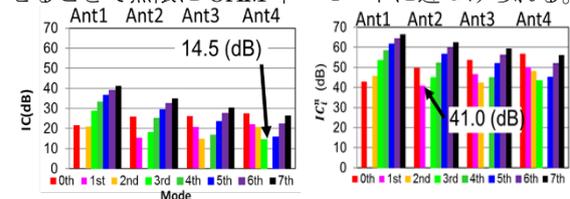


図 1 反射板付きアレイの構成

した。そのためには、ループ周囲長を通信周波数における波長の概ね整数倍にすればよいこと、また入力インピーダンス実部を近接した反射板で低下させることでさらに改善できることを理論的に導出した。図 1 に反射板付き 4 素子ループアレイの構成を示す。図 2 はこれらの施策の効果を示すものである。左図は 4 素子アレイの i 番目アンテナ i のループ周囲長を各々波長の概ね i 倍としたものについて、放射電磁界に占める 0~7 次の OAM 次数の電力比 (電流アイソレーション IC) を最大の次数の電力を 0dB として比較したものを示す。ループ半径を最適化することでアンテナ i では信号波となる i 次の OAM 次数電力が最大(0dB)となっており、干渉波となるほかに次数の電力と比べて 14.5dB 以上のアイソレーション (SINR に相当) が取れている。図 2(b)はさらに反射板をアレイからの距離 d を 2mm としたもので、アイソレーションは 41dB と大幅に改善している。距離 d を近づけると入力インピーダンスが低下して整合が困難になるという実用的な制限はあるが、理論的には反射板を接近させることで無限に OAM 単一モードに近づけられる。



(a)反射板なし (b)反射板あり (d:2mm)

図 2 放射電磁界に占める各 OAM 次数の比

単一 OAM 波を放射するアンテナができれば受信の際も単一 OAM 波しか受信しないので理想的な OAM 通信ができるが、入力インピーダンスが無限小では実用上は使えないので、干渉波が多少あっても SINR が良好となる構

成も検討した。OAM 次数ごとの受信電流の解析から、干渉波の原因となる、ループ半径が励振アンテナとは異なるアンテナ上の誘導電流には、電流分布に極小点が存在することがわかり、この点に端子を設けることで干渉波の受信電流を大幅に低減できることを解明した。特に送受アレイ間の端子方位を 180 度反転させた場合は、信号波の通過は同等で干渉波のみが大幅(10dB)に低減できる。この理由は、受信アンテナに誘導される電流は複数のアンテナを介して影響を受けるが、これらの影響が打ち消しあうことであることを解析的に示した。また同じく受信電流の解析から、OAM 次数が m となる同じループ半径間のアンテナでは、受信電流がほとんどヌルの点が $\pi/(2m)$ の端子方位に存在することを解析的に導出し、ループ半径が同じでも 2 伝送路の多重化が可能であることを解明した。またこの独立性は OAM 偏波の直交性であることも解明した。

次にこれらのループアンテナアレイを試作して、実測により、受信した信号波と干渉波の比を評価した。ループアンテナから放射される OAM 波は正面方向がヌルのリング状の電磁界分布をもち、距離とともに広がってしまうので、数 cm 以下の距離で通信性能を評価した。図 3 は近距離の OAM 通信の測定系と、反射板付きのアレイを用い、信号波と干渉波の比が最も悪かったアンテナ 4 を励振した場合の 4 素子受信アンテナへの通過特性を示す。通信距離は 3cm である。最悪の SINR でも 21.9dB と十分に干渉波が抑制されている。

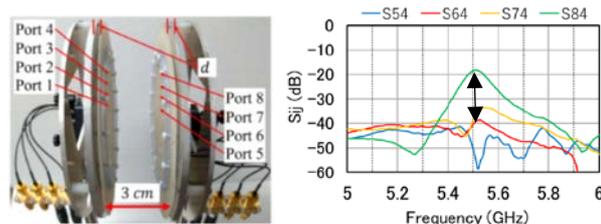


図 3 近距離 OAM 通信の測定系と実測値

なお端子方位を送受アレイで 180 度反転した試作アレイの実測評価では、5GHz 帯で SINR が 23.6dB、12GHz 帯で反射板($d=5\text{mm}$)と組み合わせた構成では 24.2dB と最も良い SINR が得られた。また偏波多重 8 伝送路多重では、ケーブル等の影響で干渉波が大きかったが、信号波は常に最大で、SINR は 3.5dB 以上の結果が得られた。

5GHz 帯反射板付きアレイを用いて伝送路多重通信性能を、64QAM 信号を用いて評価した。2 台のシグナルジェネレータから送信アレイの 2 端子に各 64QAM 信号を入力し、送信アンテナとループ半径が等しい 2 つの受信アンテナをオシロスコープに接続し、2 伝送路多重時のコンスタレーションを評価した。図 4 に各伝送路のコンスタレーションを示すが、干渉波抑制の信号処理は全く行っていないにも関わらず、各伝送路の 64QAM 信号が分離されており、OAM 多重が良好に行われていることがわかる。

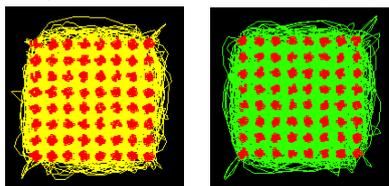


図 4 2 伝送路多重時の各伝送路のコンスタレーション

以上はループアンテナからの放射電磁界をそのまま使ったが、さらに遠距離では信号強度が低下してしまうため、パラボロイドを用いてビーム集束する遠距離 OAM 通信

の評価を行った。図 5 に測定系と 12GHz 用 4 素子アレイを用いた 4 伝送路 OAM 通信の実測結果のうち SINR が最も悪かったアンテナ 4 を励振した場合の通過特性を示す。遠距離 OAM 通信では送受アレイの中心軸、パラボロイドの軸を正確に合わせる必要があり、レーザと微調アライナーを用いて調整した。SINR 実測値は 17.6dB と良好な値が得られた。また 3 伝送路多重ではあるが、伝送距離 3.2m でも実測 SINR9.5dB が得られた。

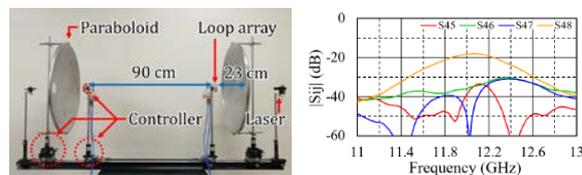


図 5 遠距離 OAM 通信の測定系と実測値

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

ループアンテナを用いた OAM 通信は、信号処理を要することなく伝送路多重 MIMO 通信が可能で、周波数有効利用に有用であることから、さらに実用化に向けて研究開発を継続してゆく。特に近距離 OAM 通信では回折の影響が小さく、マイクロ波でも有用性が大きいので実用化に向けた開発を進めたい。一方遠距離 OAM 通信に関しては、通信距離を延伸するには、回折が抑制される数十 GHz 以上の高周波での通信が有効で、この場合スケール則から 100m 程度の通信距離が見込まれるが、高周波のデバイス、測定装置を要するので、共同研究等を介して実用化の検討を継続したい。

4. むすび

ほぼ単一モードの OAM 波を直接放射する OAM 通信用アレイを開発し、干渉波抑制信号処理を行わなくても空間多重が可能通信方式の有用性を実証した。これを数 cm の近距離通信並びに 90cm の遠距離で検証した。なお周波数を n 倍すると通信距離も n 倍となるので高周波化の検討を今後進めて行く。

【誌上発表リスト】

- [1] H. Otsuka, Y. Yamagishi, A. Saitou, R. Ishikawa, K. Honjo, "Analytical and Measured Estimation for 4-value Multiplexing OAM Communication Using Loop Array Antennas," European Microw. Conf., pp.54-57, 2017.10.
- [2] 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, pp.1095-1098, 2017.11.16
- [3] A. Saitou, H. Otsuka, Y. Yamagishi, R. Ishikawa, H. Suzuki, K. Honjo, "Double Multiplicity Exploiting Orthogonal Polarizations of OAM-Wave for OAM Communication with Loop Arrays, Proc. APMC, pp. 494-496, 2018.11.8

【申請特許リスト】

- [1] 齊藤、本城、石川、鈴木、OAM 通信装置、日本、H30.2.28
- [2] 大塚、齊藤、本城、石川、ループアンテナの給電装置、日本、H30.8.27

【報道掲載リスト】

- [1] “軌道角運動量多重化ループアレイアンテナの開発に成功”、日刊工業新聞、2017.11.10