

令和 4 年 5 月 21 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04387

研究課題名(和文)空間固有モードを活用した通信、センサー用デバイスの研究

研究課題名(英文)Research on devices for communication and sensing exploiting spatial eigenmodes

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：固有モードを用いた多重通信の性能改善、高情報密度センサーへの適用方法に関する研究を行った。OAMモードを活用した多重通信に関しては、近距離通信用ではアンテナ端子方位の制御で、遠距離通信用ではパラボラ構造の改善で、信号波と干渉波の比(SIR)の改善を行った。センサーに関しては、OAMモードによる受信電流の変化を解析的に求め、これを用いた到来方向推定の手順を示した。固有モードにはOAMモード(m)以外に軌道角運動量子数(l)の自由度も有るが、球面アレイを活用し、(l,m)両方とも単一となる上の電流分布を解析的に求めるとともに、高精度に単一モードを合成する手法を数値計算で検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度情報社会で要請される通信の高速化やセンサーの取得情報量増大のためには、周波数帯域の増大が有効であるものの、周波数は貴重で有限な資源であるので、有効利用が重要である。独立な通信路は使用モード数に比例するので、nモードを使用すると周波数利用効率はn倍になり、大幅な周波数利用効率の向上が期待できる。またセンシングでも複数のモードの応答の違いを活用することで、得られる情報量の大幅な増大が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Research on devices for multiplexing communication and more detailed sensing was carried out by exploiting spatial eigenmodes. For OAM communication, signal to interference ratio was improved, where port directions of loop antennas were optimized for short-range communication and configuration of paraboloids were optimized for long-range communication. For sensing application, received currents by loop antennas were analytically derived, and a procedure of the back-annotation was examined. The order and degree for the spatial eigenmodes are the magnetic quantum number (m) and orbital angular momentum quantum number(l). The OAM communication exploits only the eigenmodes for the magnetic quantum number. In this research, eigenmode unique both for l and m is synthesized by the current distribution on the spherical array. The current distribution to radiate the eigenmode is analytically derived, and the eigenmodes are shown to be accurately synthesized by numerical calculation.

研究分野：通信工学

キーワード：情報通信工学 アンテナ理論 MIMO 軌道角運動量

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、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。またコンテンツ充実の一環として、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。これらの一翼を担う無線システムには、携帯電話等多様なものが提供されているが、いずれも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である。一方マイクロ波帯のレーダ、センサーは、材料の多様な評価量や透過距離という点でカメラ等の光学機器を補完する重要な役割を担っているが、分解能の向上等の観測情報量増大の観点からは広い周波数帯域を用いることが有利である。高度情報社会ではこのような情報の採取・伝送量は年々指数関数的に増大していくと考えられ、貴重で有限な資源である周波数の有効利用に関しては、抜本的で多様な施策を施していくことが求められている。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^①があり、同じ時間内に同じ帯域内で、空間通信路特性の違いを活用して、自由空間でも混信なく複数の通信路を生成する空間多重化の手法が、周波数利用効率の抜本的改善に対する有効な対策となっている。しかしこの場合、通信路は特定のものに制御するわけではないので、通信路特性を評価するための複雑な信号処理を要するとともに、その伝搬環境によっては一部の通信路しか使えない場合も多い。

一方、同一の周波数における多重化の手法として、近年軌道角運動量を有する電磁界モード間の直交性を活用した、OAM(Orbital Angular Momentum)通信が注目されている。この技術は、軌道角運動量 (P_ϕ) が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^②、主に光通信の分野で開発が進められてきたが、最近ではマイクロ波通信にも展開されている。通常の波がその振幅・位相が一定であるのに対し、OAM 波の位相面は、円筒座標または極座標系の ϕ 方向に $\exp(jm\phi)$ (m は OAM 波のモード次数) に従い線形に変化し、らせん状に運動量が進行する波動と説明される (図 1)。この波動は、周波数が同じでも異なる m については空間的に直交しているため、同一の周波数でも通信路多重化が可能である。

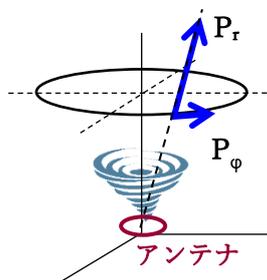


図 1 OAM 波のらせん状伝搬

MIMO では複雑なマルチパスの影響で通信路が仮想的に作成されるのに対して、OAM 波は自由空間の直交モードであるためシンプルな見通し内通信に好適である。また直交の在り方がシンプルなため通信路間の干渉を補償するための複雑な信号処理を要さないとともに、各通信路の特性はほぼ同じとなることから、すべての通信路が使用できるという特徴がある。これまで生成されていた OAM 波は、波動方程式の固有モードではなくアレイファクタにより近似的に回転する位相面を生成しており、光ではスパイラル位相板^③、マイクロ波ではアレイアンテナの各素子に離散的に位相差をつける位相器^④が用いられていた。

一方当グループでは、ループアンテナの構造を制御することで単一モード OAM 波動を直接放射する構成の OAM 通信方式を提案し、単一モードとなる構成をループ半径等の最適化等で実現する手法を開発し、試作により 4 通信路多重が実現できることを実証していた^⑤。

2. 研究の目的

本提案では、OAM モード(m)を活用した多重通信並びに高情報密度センサーへの適用方法に関する研究を行う。OAM 多重通信に関しては、通信性能で最も重要な信号波と干渉波の比 (SIR) の改善を図る。センサーに関しては、複数の OAM モードによる受信電流の違いを活用した高精度な到来方向推定を目指した。更に、空間固有モードには軌道角運動量子数 l の自由度も有ることから、これを含めたすべての空間固有モードを活用した、類を見ない超多重通信・超高情報密度センサーの基礎研究を行った。

3. 研究の方法

アンテナの OAM モードの通信性能改善のために、近距離通信に関しては OAM 次数ごとに定義される一般化 Z 行列を活用し、干渉波が打ち消すアンテナ端子方位を解析する。また遠距離通信に関しては、回転放物面で構成されるビーム集束器 (パラボロイド) の構造の最適化を、シミュレーション並びに実測評価で検討する。OAM 波を用いたセンサーに関しては、異なる次数の単一モード OAM 波を放射するループアンテナをアレイ化し、次数により異なる“到来波方向と受信電流の関係”を活用して、受信電流から到来波の方向を高精度に評価する方法を解析する。

すべての空間固有モードを活用した超多重通信・超高情報密度センサーに関しては、パラボロイドを用いた通信では、送信領域と受信電領域では電磁界の波数ベクトル・電流の向きのみが符号が反転することに着目し、 l, m も単一モードを生成するアレイの構成を解析的に導出し、式を数値計算することで妥当性を検証する。そのために、電流分布並びに電磁界をモード展開することで展開係数間の関係を行列で表現し、その逆行列を用いることで単一モードを生成する電流分布を解析的に求める。

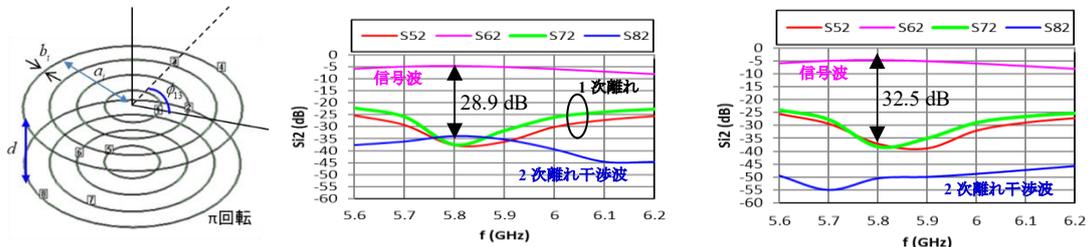
4. 研究成果

近距離 OAM 通信の性能改善のため、ループアンテナの端子方位と干渉波の関係を一般化 Z 行列 (OAM 次数ごとの端子電圧、電流の関係) を用いて解析した。図 2 は解析した送受とも 4 素子のループアレイを示す。ループ半径 a_i 、導体半 b_i 、通信距離 d 、アンテナ i の端子方位を ϕ_i 、 i, j 端子方位の差は ϕ_{ij} とおく。送受アレイとも 5.8GHz でほぼ単一 OAM モードを送受信するよう、ループ半径は 8.38/16.5/24.69/32.95mm、導体半径は 0.2mm とした。アレイの端子電圧・電流の関係を与える Y 行列(Y^{total})は、一般化 Y 行列(Y^n)の和で与えられ、 Y^n は端子方位が等しい場合の一般化 Y 行列(ξ^n)と、端子方位を対角項とする対角行列 A を用いて(1)のように与えられる。なお端子方位が等しい場合の一般化 Y 行列は、各素子の a_i, b_i, d を与えると一意に定まる。

$$\left. \begin{aligned} Y^{total} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y^n \quad Y^n = (A^n)^{-1} \xi^n A^n \\ [A^n]_{ij} &= \delta_{ij} \exp\{jn\phi_{ij}\} \quad i, j = 1, 2, \dots, 8 \end{aligned} \right\} (1)$$

誘導電流の解析には、ループ半径が異なるほどアンテナ間の相互アドミタンスが小さいことを活用した摂動法を用いることができる。1 次微小量の解析から、送受間の端子方位を π 回転させると OAM 次数が 1 次離れの誘導電流が低減され、図 2(b)に示すように信号波と干渉波の比 (SIR) は、アンテナ 2 を励振した場合が最悪で、5.8GHz で 28.9dB 以上であった。しかし 2 次離れの干渉波はこの手法では改善されず、SIR は 2 次離れの干渉波で抑制されていた。

本研究では 2 次の微小量の解析を行い、更なる SIR の改善を図った。2 次離れの誘導電流を与える解析式を導出し数値計算することで 2 次離れ干渉波が大幅に低減されることを確認した。この場合 1 次離れの特性もわずかに変化したので他の端子方位も微調整した場合の通過特性と図 2(c)に示すが、5.8GHz の SIR は 32.5dB に改善された。



(a) ループアレイの構成 (b) 端子方位 π 回転 (従来) (c) 2 次離れ干渉波も低減(本研究)
図 2 解析したアレイの構成と端方位制御による SIR 通信性能改善 (励振: アンテナ 2)

遠距離 OAM 通信の性能改善に関しては、ビーム集束に用いるパラボロイドの曲率を最適化することで SIR の向上を目指した。回折を無視するとパラボロイドではすべての OAM モードで平行電磁界に変換されるが、図 3 に示すように OAM 次数が高いほど回折が大きくなるので、高次の OAM 波では最大電界の位置が外側にずれ、有限サイズのパラボロイドでは高次の電磁界が収集できなくなる。この対策として、高次モードの最大電界の位置は外側にずれていることに着目し、外側のビームをより強く絞ることで同じパラボロイドで収集される電力を、OAM 次数によらず同等となるよう、外側の曲率が若干大きくなる構成を検討した。

評価用 12GHz 帯ループアンテナアレイは、実装精度を考慮し反射板と 4 素子ループアンテナを一体集積した。また端子方位に関しては遠距離 OAM 通信で良好な SIR が得られるよう、シミュレーションを用いて最適化した。パラボロイドの曲率を振ってビーム集束の程度を比較し、次数ごとの収集率が最良であった $y = 0.001893x^{2.2}$ を回転した疑似放物面を試作した。試作したパラボロイドとループアレイを図 4 に示す。試作したループアレイを用いて、通信距離 70cm で、通常のパラボロイドと試作したパラボロイドによる SIR を比較した。試作したパラボロイドの SIR は 12.2GHz で 18.3dB 以上で、通常のパラボロイドと比べ 3.1dB 向上していることを実測で確認した。

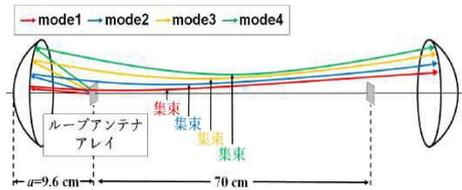


図 3 OAM 次数に 3 によるビーム集束の違い

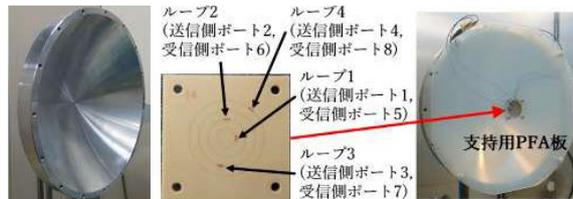


図 4 試作したパラボロイドとループアレイ

到来波を高精度に評価する OAM 波を用いたセンサーの研究に関しては、図 5 に示した 4 素子円形ループアンテナアレイに、 (θ_0, ϕ_0) 方向から平面波(遠方からの散乱波)が入射した場合の各アンテナ端子における受信電流を解析した。ループアンテナ間の相互インピーダンスも考慮した一般の場合に関して、各アンテナの受信電流を解析的に求めた。OAM 通信用のアンテナでは各アンテナは単一モードの OAM モードのみを受信するので、これを考慮すると各アンテナはその次数の OAM モード成分のみを受信する式が得られた。ループアレイを用いると入射方向、電界の大きさ、偏波の向きに関する連立方程式が得られ、大雑把にはこれら未知数の数と同じ素子数

のアレイを用いると到来波の特性が求められ、さらに多くの素子数とするとその精度もあげられる。しかし、得られた方程式はベッセル関数を含む超越方程式で単純には解けない。

そこで、求めた方程式を用いて到来波を評価するバックアノテーションの手順を検討した。そのために、アレイを ϕ 方向に回転して測定することで得られる信号と ϕ_0 方向から入射した参照信号の積を積分することで、極大となる ϕ_0 の値を評価した。図 6 に解析例として $\phi_0=30^\circ$ から入射した場合について OAM 次数 1~6 を用いた場合の評価値を示すが概ね $\phi_0=30^\circ$ で評価値が最大となっている。なお右上の指標は到来 θ 方向並びに入射平面波の両偏波の相対値に関するパラメタでこの値により到来方向推定値は若干ずれてしまう。散乱体が複数の場合や両偏波の相対値の抽出等の手順も考えられるが、これらは検討未了で今後の課題である。

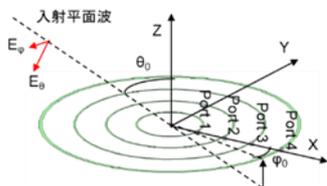


図 5 到来方向推定の構成

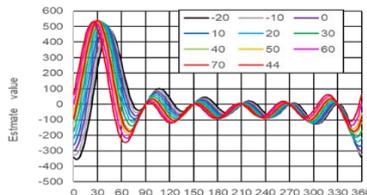


図 6 $\phi_0=30^\circ$ から入射した平面波の到来方向推定

すべての空間固有モードを活用した超多重通信・超高情報密度センサーに関しては、 l, m とも単一の空間固有モードの生成方法を検討した。一般に電流分布が与えられるとベクトルポテンシャルを用いて電磁界を求めることはできるが、その逆に所望の電磁界を与える電流分布を求める逆問題は難しい。そこで、図 7 に示したように球面アレイ上の θ 並びに ϕ 方向の連続電流分布を(2)のようにルジャンドル陪関数と指数関数で一般フーリエ級数展開し、固有関数の展開係数で離散的に表現した。

$$J_{\theta'} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_{\theta' m} \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)}{2 \cdot (n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) e^{jm\phi}, J_{\phi'} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_{\phi' m} \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)}{2 \cdot (n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) e^{jm\phi} \quad (2)$$

また、固有関数で与えられる電流分布から放射される遠方電界をベクトルポテンシャルを用いて導出し、さらに求めた遠方電界を空間固有モードで展開することで、遠方電界もその展開係数で離散的に表現した。この場合電界と電流分布の展開係数間の関係は行列で表現されることになる。これを用い、上記の逆問題は逆行列を求めることに帰着された。解析式から、 m 次の電流分布からは m 次の電界しか生成されないこと、 n 次の電流からは無数の l 次の電界が生成されることが示された。従って上記行列は電流の n 次展開係数と、電界の l 次展開係数間の関係のみ評価すればよい。なお、遠方界の電界が導出されているが、パラボロイドを用いた通信方式では、パラボロイドは遠方界をビーム集束するものであることを考えるとこれで問題ない。これは遠距離の OAM 通信でのシミュレーション・実験で確認済である⁶⁾。

求めた解析式を数値計算することで、求めた電流分布から、 l, m とも単一の固有モードの電磁界が生成され解析式の妥当性が確認された。図 8 に 6 種類の電流分布 ($m=1, \theta$ 方向電流 $n=1, 3, 5; m=1, \phi$ 方向電流 $n=2, 4, 6$) で 6 種類の電界 (TE11, TE31, TE51, TM21, TM41, TM61) を合成した場合について、固有モードの放射パターン (赤) と合成したパターン (青) の比較を示す。TM61 では $\theta=0^\circ, 180^\circ$ の近傍で誤差が大きかったが、他のパターンは TE31 と同様に概ねよく合っていた。誤差の大きい TM61 では所望のモードと他のモードの電力比は 10dB で、これは SIR に関係することを考えると十分な精度とは言えない。

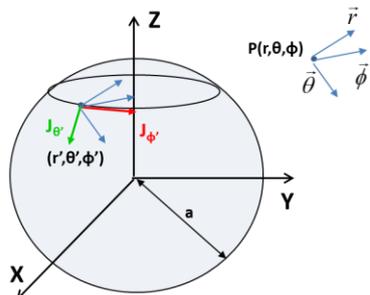
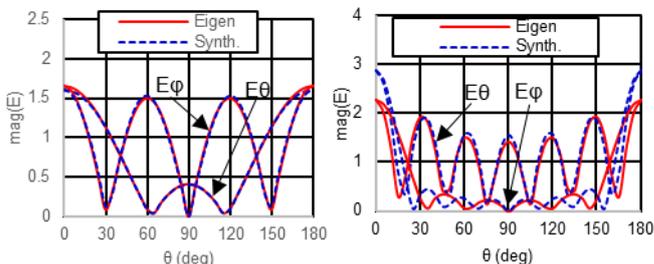


図 7 球面上の電流分布の構成



(a)TE31

(b)TM61

図 8 固有モードと合成した電磁界放射パターン

パターン合成の精度向上のため、固有関数の電流分布で生成される電界固有モードの比率を詳細に評価した。図 9 は次数が $n=2, m=1$ の電流で生成される電界固有モードの展開係数を示す。これは球面アレイの半径 a にも依存するので、波数 k を掛けた ka の依存性も示している。 ka 依存性に関しては、 l 次電界展開係数の大きさは $ka-l$ の近傍まで単調に増大し、以降は振動的に上下する。このことは、 l 次のモードを支配的にするには $ka \geq l$ となる大きな球面半径が必要であることを意味する。また TM 波では電流次数 $n=2$ と等しい $l=2$ 次の電界が支配的であり、TE 波では $n=2$ にもっと近い $l=1, 3$ 次が支配的である。なお TE 波で偶数次が生成されないのは、解析式から偶奇性の条件があることによる。ちなみに次数 m に関しては電流と電界の次数は同じになる。このことから、 (l, m) 次の電界を支配的にするには $ka \geq l$ を満たすよう球面アレイ半径を大

大きく選ぶとともに、電流の次数 n が l に近いものを選ぶ必要があることが分かった。また次数 n より大きな l の電界が支配的になることがあることも分かった。これは上記のパターン合成に際して、電流の選択で ϕ 方向の電流 $n=6$ を選ぶと TE51 以外に TE71 も支配的に放射されることを意味する。このことから、所望のモードでない TE71 が不要放射に大きく含まれたことで、所望のモードと他のモードの電力比が大きくなったことが、TM61 パターン精度悪化の原因であることが放射パターンの解析からも検証された。これを改善するには電流次数の種類を増やせばよく、2種類の電流分布 (θ 方向の電流で $n=6$ と ϕ 方向の電流で $n=8$) を追加した 8種類の電流分布で前記の 6種類の電界モードを合成する数値計算を行ったが、この場合の所望のモードと他のモードの電力比は 37.2dB となり、精度は 27.2dB 大幅に改善された。このことから高精度に固有モードを生成するには、所望の電界の種類数より、電流分布の種類数を大きくすることで達成できることが明らかになった。

ここまでは電流分布は連続として解析してきたが、製作上これは不可能なので、図 10(a)に示すように離散的に素子を配置した構成でも、同等のパターン合成精度が得られるかを検証した。図 10(b)は次数 $n=2, m=1$ で θ 並びに ϕ 方向の連続電流分布で生成される電界と、離散的な素子で生成する電界 (黄緑) を比較したものであるが十分な精度で一致しており、離散的なアレイでも単一空間モードが生成できることが確認できた。図の特性は、 θ 、 ϕ 方向にそれぞれ 10 度間隔で素子を配置したものであるが、この電流分布では 20 度間隔程度まではほぼ同様な特性が保たれた。

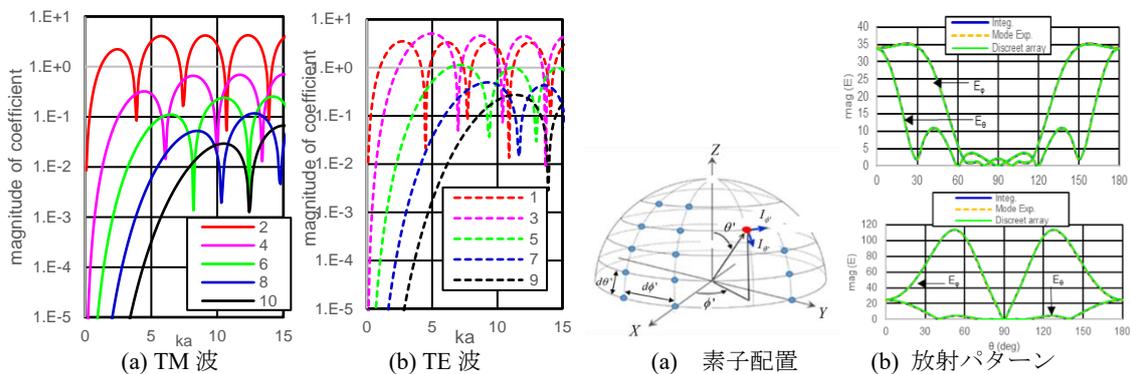


図 9 電流次数 $n=2, m=1$ で生成される $(l, 1)$ 次電界展開係数 各線は次数 l ごとの値
 図 10 球面アレイの離散的素子配置と放射電界放射パターン
 上: (2,1)次 θ 方向電流
 下: (2,1)次 ϕ 方向電流

引用文献

- ① V. Tarokh, N. Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction," IEEE Trans. Inform. Theory, vol.44, pp.744-765, March 1998
- ② L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," Phys. Rev. A., Vol. 45, No. 11, pp. 8185-8189, June 1992
- ③ X. Hui, S. Zheng, Y. Hu, C. Xu, X. Jin, H. Chi, X. Zhang, "Ultralow Reflectivity Spiral Phase Plate for Generation of Millimeter-wave OAM Beam," IEEE Ant. & Wir. Propag. Lett., Vol. 14, pp. 966-969, 2015
- ④ S. M. Mohammadi, L. K. S. Daldorff, J. E. S. Bergman, R. L. Karlsson, B. Thid é, K. Forozesh, T. D. Carozzi, B. Isham, "Orbital Angular momentum in Radio- A system study," IEEE Trans. Ant. & Propaga. Vol. 58, No. 2, pp. 565-572, Feb. 2010
- ⑤ A. Saitou, R. Ishikawa, K. Honjo, "Four-value Multiplexing Orbital Angular Momentum Communication Scheme Using Loop Antenna Arrays." Proc. APMC, pp. 1-4, Dec. 2016
- ⑥ H. Otsuka, Y. Yamagishi, A. Saitou, H. Suzuki, R. Ishikawa, K. Honjo, "High Performance OAM Communication Exploiting Port-Azimuth Effect of Loop Antennas," IEICE Trans. Commun. Vol. E102-B, No12, pp. 2267-2275, Dec. 2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Akira Saitou, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo	4. 巻 E105-B
2. 論文標題 Pattern synthesis of spatial eigenmodes exploiting spherical conformal array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transaction	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hisanosuke Miyake, Akira Saitou, Hiroshi Suzuki, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo
2. 発表標題 Improved Performance for 8-Channel Multiplexing OAM Communication by Suppressing Interference
3. 学会等名 APMC 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斉藤 昭、三宅 久之助、石川 亮、本城 和彦
2. 発表標題 円形ループアンテナアレイの端子方位制御による通過アイソレーション改善
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斉藤 昭、石川 亮、本城 和彦
2. 発表標題 / 方向電流を有する球面アレイの生成する電磁界の固有モード展開
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 2021年

1. 発表者名 石原克弥, 斉藤昭, 菊池晴貴, 和田渉, 本城和彦, 石川亮
2. 発表標題 多モードOAM波集束用反射鏡の曲率最適化に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Kikuchi, A. Saitou, W. Wada, H. Suzuki, K. Honjo, R. Ishikawa
2. 発表標題 Mode purity evaluation for OAM communication using integrated loop antenna array
3. 学会等名 EuMC32-4 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------