

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13736

研究課題名（和文）-忍者アレーアンテナ-モノスタティックレーダーに不可視のビーム走査アレーアンテナ

研究課題名（英文）-Ninja Array Antenna- A Beam Scanning Array Antenna Undetectable for Monostatic Radar

研究代表者

今野 佳祐 (Konno, Keisuke)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20633374

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）：本研究においては、非同一形状の八木・宇田アンテナあるいは対数周期ダイポールアレーアンテナを用いた忍者アレーアンテナが提案され、その散乱特性と放射特性が明らかにされた。その結果、アレーアンテナとしてのビーム走査性能を損なうことなく、モノスタティックレーダーに不可視なアレーアンテナを実現できることが明らかになった。

関連研究として、アレーアンテナの電流分布推定法の研究、アレーアンテナの高速な数値解析法の研究、アレーアンテナを用いた無線電力伝送の研究、アレー水平方向へのビーム走査を行うリフレクトアレーの研究を実施した。これらは全て、本研究を進める中で得られた知見やアイデアがベースとなっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実現したアレーアンテナは、セキュリティ上の観点から重要な意義を持つ。アレーアンテナは、空港のボディスキャナーや航空・気象レーダーに用いられることが多く、その性能は秘匿すべきである。その一方で、このようなアレーアンテナは周期構造を持つので、後方散乱が大きくなり、モノスタティックレーダーに捕捉されやすい。本研究で提案する忍者アレーアンテナが実現されたことで、後方散乱の小さいフェーズドアレーを実現する見込みができ、レーダーとしての機能を損なうことなく、このようなセキュリティの脆弱性を解消することができる。したがって、本研究の果たす社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, ninja array antennas that are composed of non-identical Yagi-Uda array antennas or log-periodic dipole array antennas have been proposed, and their radiation/scattering performance has been clarified. As a result, it has been demonstrated that undetectable array antennas from monostatic radars can be realized without loss of their beam scanning capability.

As relevant studies, study on source reconstruction method and numerical analysis method for array antennas have been performed. Moreover, wireless power transfer technologies using array antennas and beam scanning reflectarray antennas towards their endfire direction have been developed. All of the relevant studies have been originated from knowledge and ideas obtained during this research project.

研究分野：電磁波工学，アンテナ

キーワード：フェーズドアレーアンテナ リフレクトアレー レーダー

1. 研究開始当初の背景

複数のアンテナから成るアレーアンテナは、鋭い指向性と高い利得を実現できることから、無線通信システムのみならず、レーダーやセンサ、スキャナなどに広く応用されている。中でも、航空管制や気象レーダー、あるいは空港のポディスキャナーに用いられるアレーアンテナは、以下に示すような2つの性能が要求される。

1. 最大放射方向を切り替えるビーム走査性能を有すること

被測定物へビームを自在に向けることで、その応答をリアルタイムで検知できる。

2. 広帯域の電磁波に対する不可視性が高いこと

アレーアンテナの偏波や動作周波数、利得などからシステムの性能が推定できるため、それらをテロリストなどに知られてはならない。そのため、モノスタティックレーダーなど、広帯域のパルス電磁波を用いた探知システムに対して不可視なアンテナが望まれる。

これまで、アレーアンテナのビーム走査の研究が数多く行われてきた。申請者らは、億単位の素子を有する超大規模なビーム走査アレーアンテナの設計法の研究や、機械的なビーム走査アンテナの研究を行ってきた。その他、国内外で様々なグループが関連の研究を進めている。これらのアレーアンテナは、同一の素子を周期的に並べた構造であり、結果的に入射波に対する後方散乱が強く、モノスタティックレーダーに対して探知されやすい。

その一方で、不可視性をはじめとした電磁波に対する特殊な応答を周期構造で実現する試みも行われてきた。申請者らは、入射電磁波を任意の方向に散乱させるリフレクタレーと呼ばれる準周期構造の広帯域化に成功するとともに、大規模な周期構造の数値解析法の構築も行ってきた。その他、三菱電機やピサ大学のグループをはじめ、数多くのグループが取り組んでいるのが、レドームと呼ばれるアンテナを覆うカバーによる不可視化の研究である。レドームは、金属や誘電体の素子から成る周期構造を採用していることが多く、周期構造の共振周波数付近では電磁波が透過せず、その内部を不可視化できる。しかしながら、観測・通信システムへの悪影響を避けるため、アレーアンテナの動作周波数では、レドームが電磁波を完全透過するように設計せねばならない。したがって、たとえレドームを用いても、アレーアンテナの動作周波数帯域内における不可視性を実現することはできない。

以上のように、これまでの研究では電磁波に対する不可視性とビーム走査性能を両立したアンテナは実現されていない。そこで本研究では、電磁波に対する不可視性とビーム走査能力を両立したアンテナを実現し、それを「忍者アレーアンテナ」と名付けた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、忍者アレーアンテナ、すなわち広帯域のパルス電磁波を用いたモノスタティックレーダーに対して不可視なアレーアンテナの設計法およびそのビーム走査法の確立、である。「アレーアンテナ=同一素子のアレー」という常識を疑い、動作周波数帯域内での不可視性を持つ忍者アレーアンテナを、非同素子で実現する点に本研究の独創性がある。また、本研究は、非同素子から成る忍者アレーアンテナのビーム走査法を、申請者の得意とする電磁界数値解析法をベースにして確立する点に学術的独自性を有する。

3. 研究の方法

モノスタティックレーダーに不可視な(=後方散乱の小さい)忍者アレーアンテナの設計法・ビーム走査法を構築し、その有効性を解明した。設計にはリフレクタレーの設計法を応用し、ビーム走査法はモーメント法によって数値的に求めたインピーダンス行列(Z行列)と最小二乗法を組み合わせ構築した。忍者アレーアンテナの後方散乱が、その動作帯域内で小さいこと、および所望の方向に主ビームが出ていることを数値シミュレーションで示した。

4. 研究成果

八木・宇田アンテナを並べた忍者アレーアンテナの数値シミュレーション結果は図1および図2に示す。図1は散乱特性であり、アレーのブロードサイド方向($\theta=0$ 方向)からの入射波に対するBRCSパターンである。同一の素子から成るアレーは周期性があるので、散乱波の位相がブロードサイド方向で同相となり、その結果ブロードサイド方向で散乱波がピークとなる。その一方で、提案するアレーアンテナは非同素子から成り、その素子サイズはブロードサイド方向以外で散乱波の位相が揃うように設計されている。その結果、散乱波はブロードサイド方向で同相にならず、設計した方向($\theta=10^\circ$)で同相となっている。図2は放射特性であり、アレーのブロー

ドサイド方向へ主ビームが向くように給電した結果得られたものである。同一の素子からなるアレーアンテナであれば、ブロードサイド方向へ主ビームを向けるには同相給電すればよい。その一方で、提案するアレーアンテナは非同一の素子から成るので、同相給電してもブロードサイド方向へビームは向かない。そこで、アレーアンテナの素子間相互結合を表すZ行列を用い、希望のビーム方向を実現するような給電を得る方法を考案した。図2の放射特性は、このような方法で求めた給電から得られたものであり、非同一の素子から成るアレーにも関わらず、ブロードサイド方向へ主ビームが向いている。

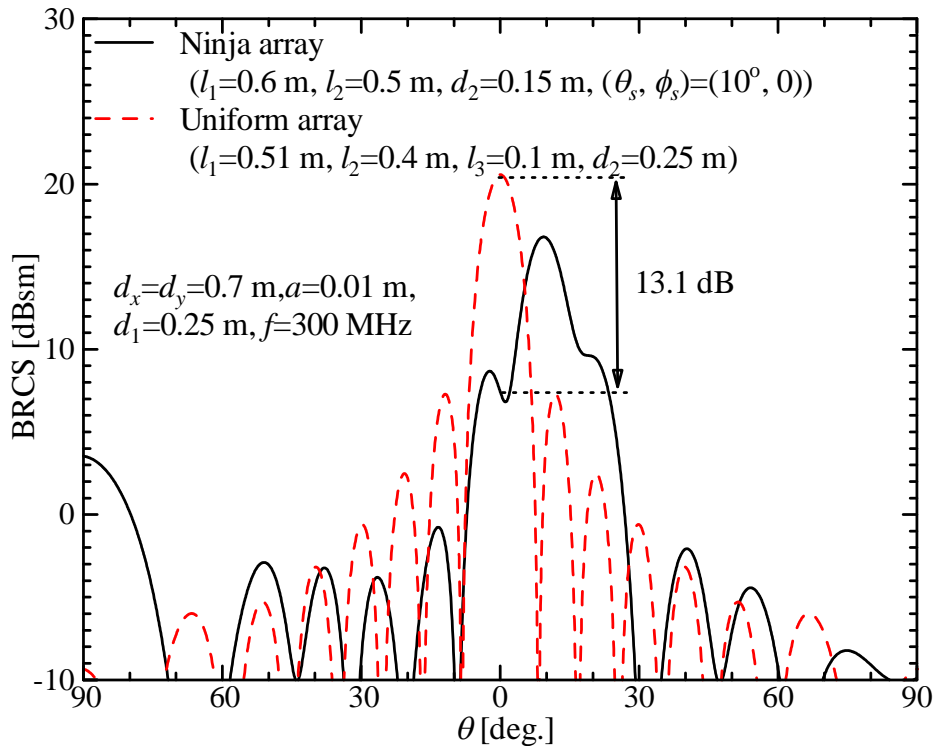


図1：八木・宇田素子から成る忍者アレーアンテナの散乱パターン(数値解析結果)。

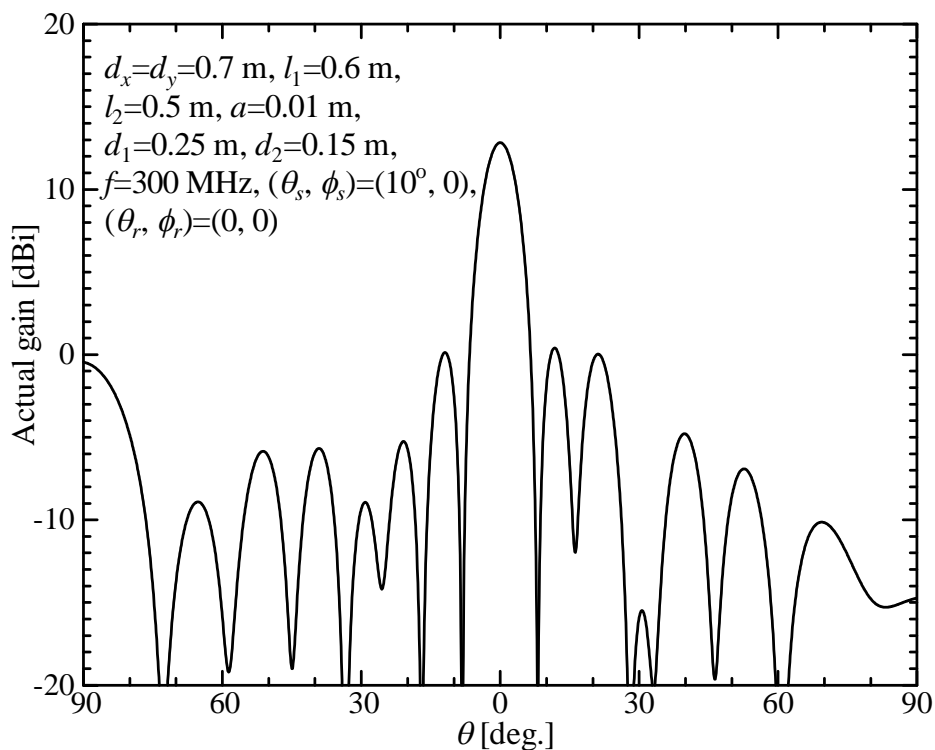


図2：八木・宇田素子から成る忍者アレーアンテナの放射パターン(数値解析結果)。

次に、試作と実験を行い、設計法とビーム走査法の有効性を実証した。図3に提案アレーの試作品を示す。アルミ板でできたグラウンド板の上に、モノポール形状の八木・宇田素子が8素子

配列されている．導波器の長さを素子ごとに変えることで，非同素子を実現している．

試作したアレーアンテナの BRCS パターンの測定結果は図 4 に示す．提案アレーは，アレーのブロードサイド方向からの入射波で励振されているが，ブロードサイド方向へ戻っている後方散乱波が小さいのが分かる．提案アレーは，ブロードサイド方向から 20° ずれた方向に散乱波の位相が揃うように設計されており，実験結果もそのようになっていることが分かる．

試作したアレーアンテナの放射パターンの測定結果は図 5 に示す．図 5 の結果は，測定したアレーエレメントパターンに，ビーム方向に対応した重みを乗じて加算して得られたものである．ビーム方向に対応した重みは，Z 行列を用いた手法で数値的に得られている．図 5 から，所望の方向にビーム走査ができていていることが分かる．広角にビーム走査をするにしたいが，利得が下がっていることも見て取れる．

以上の測定結果から，提案する忍者アレーアンテナは，後方散乱波を低減し，モノスタティッククレーダーに探知されづらい構造になっていることを明らかにした．また，非同素子から成るアレーアンテナにおけるビーム走査を実現するための給電ベクトルの計算法を構築し，その有効性を実験的に明らかにした．

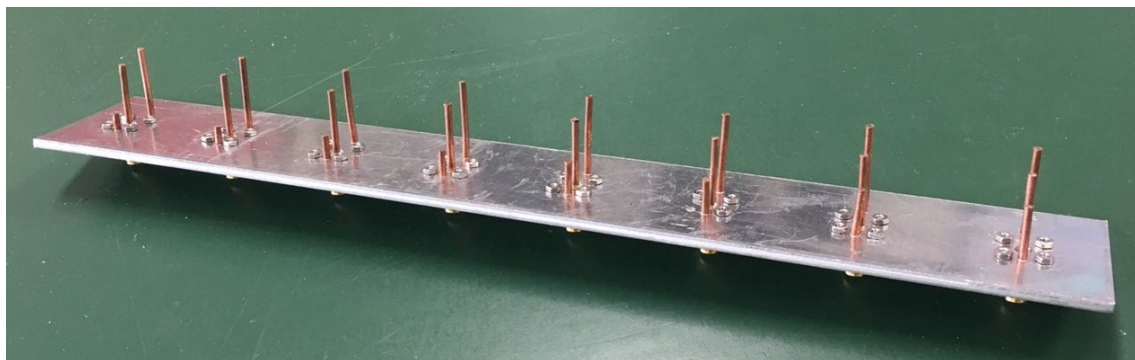


図 3: 八木・宇田アレーアンテナを用いた忍者アレーアンテナの試作品

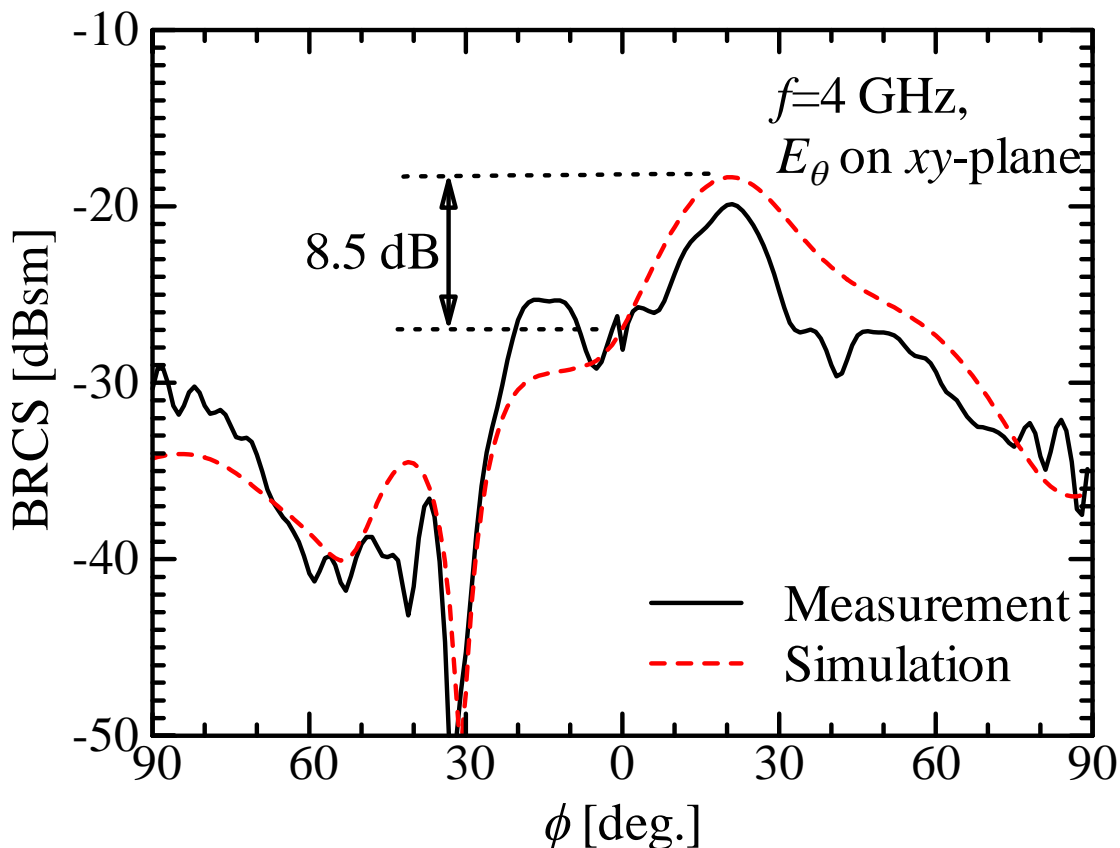


図 4: 八木・宇田素子から成る忍者アレーアンテナの散乱パターン(測定結果)．

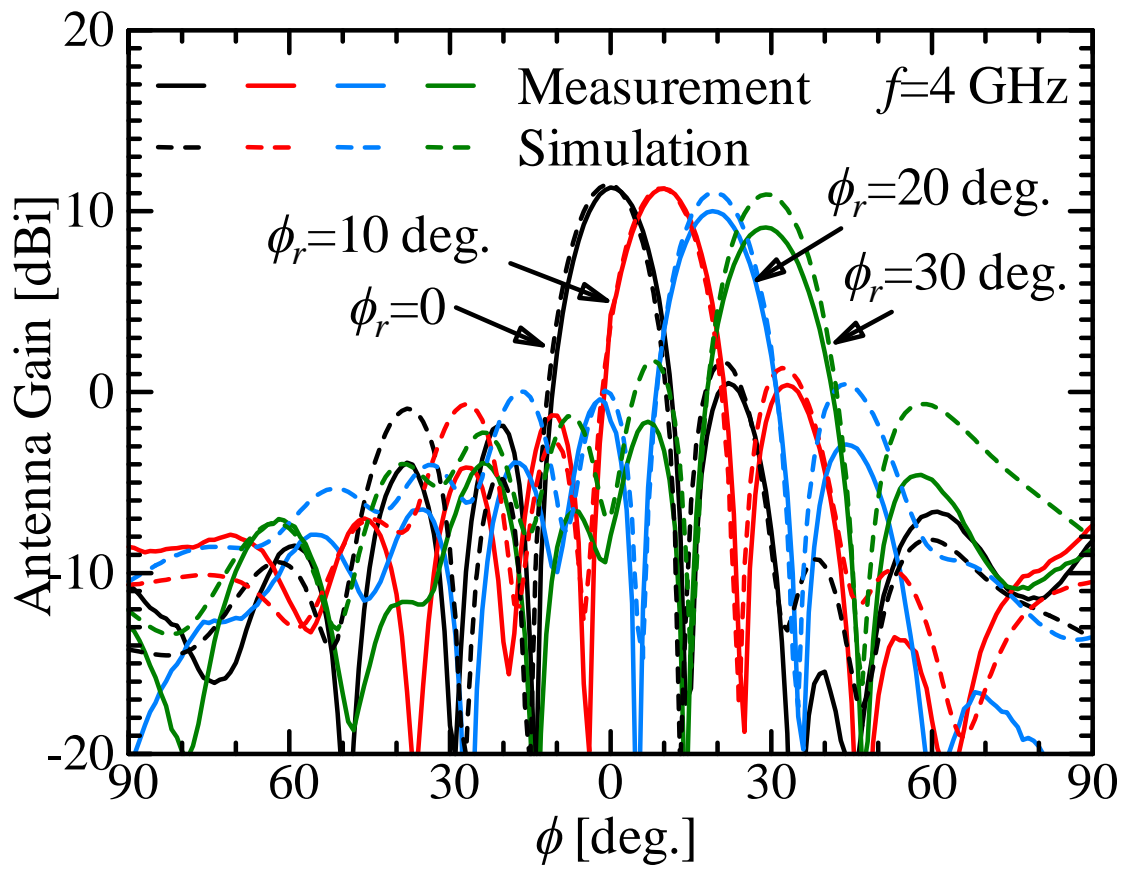


図5：八木・宇田素子から成る忍者アレーアンテナの放射パターン(測定結果)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Konno Keisuke, Yuan Qiaowei, Chen Qiang, Yokokawa Kei, Goto Jun, Fukawasa Toru	4. 巻 68
2. 論文標題 Efficient Method of Moments for Numerical Analysis of Antennas With Variable Load Impedance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 8233 ~ 8237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2020.2985979	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Konno, K. Morita, Q. Chen, and Q. Yuan	4. 巻 vol. 8 ,no. 12
2. 論文標題 Experimental Study of Ninja Array Antenna Composed of Yagi-Uda Antennas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Commun. Express	6. 最初と最後の頁 554-559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2019GCL0039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Nagae, S. Suzuki, K. Konno, H. Sato, and Q. Chen	4. 巻 vol. 8, no. 12
2. 論文標題 Compact Design of Two-elements Cubic Yagi-Uda Array Antenna with High Gain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Commun. Express	6. 最初と最後の頁 652-656
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2019XBL0119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Konno, S. Asano, T. Umenai, and Q. Chen	4. 巻 66
2. 論文標題 Diagnosis of Array Antennas Using Eigenmode Currents and Near-Field Data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Antennas Propag.	6. 最初と最後の頁 5982-5989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2018.2866544	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Konno and Q. Chen	4. 巻 -
2. 論文標題 A Reflectarray Using Log-Periodic Dipole Array Element	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEEE-IWS.2018.8400794	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Konno, Q. Chen and Q. Yuan	4. 巻 -
2. 論文標題 Scattering and Radiation Performance of Ninja Array Antennas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)	6. 最初と最後の頁 1567-1569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/APMC.2018.8617501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 持木 和人, 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 仮想波源の固有モード電流を用いた波源分布推定法の高精度化
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Susuga, K. Konno, and Q. Chen
2. 発表標題 A Study on Fast Method of Moments for Large-Scale Reflectarrays
3. 学会等名 Proc. ICETC 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Konno, Q. Yuan, Q. Chen, K. Yokokawa, J. Goto and T. Fukasawa
2. 発表標題 Application of An Efficient Method of Moments to Numerical Analysis of 1-bit Transmitarrays
3. 学会等名 Proc. ISAP2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 知久 望海, 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 誘電体スラブによるリフレクタレーの高利得化に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Konno and Q. Chen
2. 発表標題 A Source Reconstruction Technique Using Eigenmode Currents
3. 学会等名 ISAP2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 持木 和人, 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 仮想波源の固有モード電流を用いた波源分布推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 煤賀 司, 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 自由空間のダイアディックグリーン関数の遠方界近似によるモーメント法の高速度化
3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今野 佳祐, Wang Xin, 陳 強
2. 発表標題 固有モード電流と人工ニューラルネットワークを用いたアレーアンテナの故障診断
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳 強, 今野 佳祐
2. 発表標題 アレーアンテナの素子間相関
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 Taylor展開を用いたSommerfeld積分の数値補間法とそのモーメント法への応用
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 2018年

1. 発表者名 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 固有モード電流を用いたアレーアンテナの電流分布推定法に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今野 佳祐, 陳 強
2. 発表標題 ラミネート型二次電池への無線充電の実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会無線電力伝送研究会
4. 発表年 2019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