

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04468

研究課題名（和文）可変指向性アンテナと信号多重技術の融合による指向性多重アンテナに関する研究

研究課題名（英文）Antenna Pattern Multiplexing Based on Fusion of Variable Directivity Antenna and Signal Multiplexing Technology

研究代表者

齋藤 将人 (Saito, Masato)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：30335476

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、アンテナの指向性形成に信号多重の概念を取り入れた「指向性多重アンテナ」の実現を目指した。「指向性多重アンテナ」とは、複数の指向性アンテナが同一地点に同時に設置されたかのように振る舞う小型アンテナである。指向性多重アンテナの指向性形成法と、指向性多重化を実現するための印加電圧の生成および実験による検証を行った。研究の一環として、2素子可変指向性アンテナにおいて、所望の指向性を形成するためのリアクタンスを解析的に導出する手法を確立した。また、同帯域のアンテナでリアクタンス時系列を導出し、指向性の多重化を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

指向性多重アンテナの学術的意義は、アンテナ工学および通信技術の進展に寄与する点にある。同一地点に複数の指向性アンテナが存在するかのような効果を小型アンテナで実現することは、アンテナの設計と配置の新しい可能性を開拓する。

社会的意義としては、通信インフラの効率化と高性能化が挙げられる。小型で高機能なアンテナは、スマートフォンやIoTデバイスの通信性能を向上させるだけでなく、基地局や衛星通信の装置も小型化し、設置や運用コストを削減する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to realize a "directivity multiplexing antenna" that incorporates the concept of signal multiplexing into forming antenna directivity. A "directivity multiplexing antenna" is a compact antenna that behaves as if multiple directional antennas are installed simultaneously at the same location. We investigated the directivity formation method of the directivity multiplexing antenna, the generation of applied voltages to achieve directional multiplexing, and the experimental verification of these methods. As part of the research, we established a method to analytically derive the reactance required to form the desired directivity in a two-element variable directivity antenna. Additionally, we derived the reactance time sequences for the same band antenna and demonstrated the multiplexing of directivity.

研究分野：無線通信システム工学分野

キーワード：指向性多重アンテナ 受信ダイバーシチ 多入力多出力（MIMO） アンテナパターン 符号分割多重（CDM）

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) スマートフォンや Wi-Fi を始めとする無線通信機器は、今日通信インフラとして社会に浸透している。また、第 5 期科学技術基本計画において、IoT (Internet of Things) は、Society 5.0 の中核を担う技術と位置づけられており [1]、あらゆるものに、無線通信機器が搭載される可能性がある。このような社会的背景から、小型無線通信機器においても、通信性能の向上が期待されている。

(2) 受信性能向上を目指す上で、最も有効な方法の一つが受信アンテナ数の増加である。アンテナ数の増加により、きめ細かい指向性形成が可能となる。このことにより、所望信号の受信電力を高めることや、干渉をキャンセルすることができ、受信性能を向上させることができる。しかし、アンテナ素子は互いに一定距離以上離さないと十分な利得が得られないため、アンテナ数の増加は設置面積の増大という問題を引き起こす。

(3) 一方、受信信号を伝送するためにアンテナ素子と受信機はケーブルで接続される。したがって、アンテナ数の増加はケーブル数の増加に伴うコスト増につながる。これらの理由により、特に小型端末においては、アンテナ数の増加は適用が困難である。そこで本研究では、既存研究のアンテナについて動作原理を明らかにする過程で得られた知見を基に、指向性多重アンテナを用いて無線環境の変化に追従可能であり、アンテナ・ケーブル設置コストの少ないアンテナについて検討する。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、指向性多重アンテナ、すなわち異なる指向性 (アンテナパターン) を持つ複数のアンテナが、同一地点に同時に設置されたかのような (物理的には存在し得ない) アンテナを、理論および実験により実証することである。その上で、指向性多重アンテナにおける指向性形成に関する基礎理論の構築および多重指向性の実験による検証を行う。

(2) 無給電素子 (寄生素子) 付きアンテナにおいて、無給電素子に印加する電圧を正弦波とすることにより、1 本のケーブルから複数の受信信号成分を取り出すことが可能であり、それがハードウェアコストの削減や通信性能の改善に一定の効果があることは示されていた。しかし、得られる受信信号成分がそれぞれどのような指向性により受信されたのか、ひいてはそれらの指向性が互いに独立した関係にあるのかは明らかにされていなかった。

(3) そこで、本研究では複数の受信信号を出力する多重指向性の解析を行い、信号多重方式に基づき、統計的に独立で互いに直交する指向性の形成および多重化について明らかにすることを目的とする。この検討を通して、指向性形成に関する基礎理論の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、アンテナの指向性形成に信号多重の概念を取り入れた指向性多重アンテナにより、小型でありながら、複数の指向性アンテナが同一地点に同時に設置されたかのようなアンテナの実現を目的としていた。本研究のテーマである (A) 指向性多重アンテナにおける指向性形成法の研究と (B) 指向性多重化を実現する印加電圧の生成および実験による指向性の検証について、研究方法を述べる。

(2) (A) 指向性多重アンテナにおける指向性形成法の研究：指向性多重アンテナでは、無給電素子のリアクタンスを印加電圧により周期的に変化させることにより指向性多重を行う。2 素子可変指向性アンテナに関して、所望の指向性を形成可能なリアクタンスを解析的に導出可能な手法を確立する。等価ウェイトベクトル法により、可変指向性アンテナのリアクタンスと得られるアンテナの水平面指向性とを関連付け、所望の指向性を形成するリアクタンスの時間変化を数式により導く。

(3) 加えて、指向性形成法として周波数分割多重の概念を取り入れた指向性多重アンテナを用いた場合における受信信号の合成方法および、同アンテナに特有の干渉信号を抑圧する手法を提案し、計算機シミュレーションにより、性能評価を行う。

(4) (B) 指向性多重化を実現する印加電圧の生成と実験による指向性の検証：提案する指向性多重効果を確認するため、地上デジタルテレビ放送信号波の受信を目的とした 2 素子 500 MHz 帯

アンテナ可変指向性アンテナを活用する。無給電素子と、無給電素子に直流と任意信号電圧波形を重畳した電圧を伝送可能な重畳器を用いて地上デジタルテレビ放送波を受信し、スペクトルアナライザを用いて受信スペクトルを観測することにより指向性多重の確認を行う。また、より複雑な指向性多重を行うために、無給電素子を作製する。

4. 研究成果

本研究で掲げるテーマである(A)指向性多重アンテナにおける指向性形成法の研究と(B)指向性多重化を実現する印加電圧の生成と実験による指向性の検証、に関して、主に(A)に関して得られた研究成果[2]について述べる。

本検討では、受信機に接続された受信アンテナ素子と、直流バイアスの周期電圧が印加される可変リアクタンスで終端された無給電素子を持つ、2素子ダイポール ESPAR アンテナの解析を行った。アンテナの解析には、等価ウェイトベクトル法を用いた。2素子 ESPAR アンテナのリアクタンス値 x に対する水平方位角 ϕ におけるアレイファクタ (指向性) $D(\phi, x)$ は、次式で表される。

$$D(\phi, x) = [1 \exp(j(2\pi d/\lambda) \cos(\phi))] \mathbf{w}(x)$$

ここで、 d は素子間距離、 λ は搬送波の波長、 $\mathbf{w}(x)$ は等価ウェイトベクトルであり、次式で示される。

$$\mathbf{w}(x) = 2z_s \left(Z + 2 \begin{pmatrix} z_s & 0 \\ 0 & jx \end{pmatrix} \right)^{-1} \begin{pmatrix} v_s \\ 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 z_s は出力インピーダンス、 Z はアンテナのインピーダンス行列、 v_s は内部電圧を表す。

前述のアレイファクタを、メビウス変換の性質を用いて変形することにより、リアクタンスの変化に対して不変である項と、変化する項とに分類した。加えて、リアクタンスの変化に応じて変化する項を、所望の一定の角周波数 ω で時間変化するよう位相を構成した。これらの式変形により得られた周期的に変化する指向性は次式で表される。

$$D(\phi, t) = D_0(\phi) + D_r(\phi) \exp(j(\gamma_0 + \omega t))$$

ここで、 $D_0(\phi)$ は、リアクタンスの変化に対して不変な項の方位角特性、 $D_r(\phi)$ は、リアクタンスに応じて変化する項の方位角に対する大きさ (指向性利得)、 γ_0 は、リアクタンスに応じて変化する項の初期位相をそれぞれ表している。各定数の具体的な成分を示すことは割愛する。解析式の詳細は文献[2]に示されている。ここで、 $D(\phi, t)$ はフーリエ級数の形をしていることが分かる。すなわち、 $D_0(\phi)$ と $D_r(\phi)$ は、周期 $T = 2\pi/\omega$ に関して直交しており、前者は直流成分、後者は基本周波数成分とみなすことができる。

上の式から、時間変化に対して、ある方位角 ϕ におけるアレイファクタは、中心 $D_0(\phi)$ 、半径 $D_r(\phi)$ の円上を動くことが分かる。円上を一定の角速度 ω で変化させることにより、特定の周波数成分を持つ可変指向性を生成することが可能となる。

アレイファクタを指数関数の指数部に含まれるリアクタンス $x(t)$ について解くと、前述の、一定の角速度 ω でアレイファクタを変化させられるリアクタンス系列 $x(t)$ が次式のように得られる。

$$x(t) = -\frac{1}{2} \left(\operatorname{Re}(z_d) \tan\left(\frac{\omega t - \pi}{2}\right) + \operatorname{Im}(z_d) \right)$$

ここで、 z_d は、インピーダンス行列の成分で表される定数であり、 $\operatorname{Re}()$ 、 $\operatorname{Im}()$ はそれぞれ、複素数の実部、虚部を求める関数を表す。著者らは、このリアクタンス系列を、これまで数値計算を用いた近似により求めていた[3]。しかし、本検討により、解析式が得られたため、指向性形成を行うリアクタンス系列を容易に求めることができるようになった。また、この解析結果は、アンテナの素子数を増加させたとき、個々の無給電素子に与えるリアクタンス系列を生成する際に応用可能である。

表 1 アンテナパラメータ

Parameters	Values
Inner voltage v_s	1.0 [V]
Output impedance z_s	50 [Ω]
Target carrier frequency f_c	500 [MHz]
Wavelength of carrier λ	0.60 [m]
Length of antenna element	0.30 [m]
Radius of antenna element	0.0020 [m]
y_{00} ($d = \lambda/8$)	$4.84 \times 10^{-3} - j9.67 \times 10^{-3}$ [S]
y_{01} ($d = \lambda/8$)	$1.00 \times 10^{-3} + j8.83 \times 10^{-3}$ [S]

最後に、導出した解析式を用いて、可変指向性アンテナの多重指向性を数値例で示す。アンテナのパラメータとして、表 1 に示す値を用いた。ターゲット周波数は地上デジタルテレビ放送波の受信を想定して 500 MHz とした。アンテナの素子長は半波長としている。素子間隔は、 $d = \lambda/8$ としている。表中、 y_{00} と y_{01} は、それぞれ、給電素子の自己アドミタンスと給電素子と無給電素子間の相互アドミタンスを表す。

図 1 に、導出した解析式を用いて得られた、各方位 ϕ に対する多重化された指向性を示す。ここで、青色の曲線は、 $D_0(\phi)$ を、赤色の曲線は、 $D_r(\phi)$ を表す。大きさは線形スケールとしている。図より、直流成分の最大値と基本周波数成分の最大値は 1.7 倍 (2.2 dB) であり、ダイバーシチブランチとして有効に働くための利得差は 10 dB 以内と言われるため、十分指標を満足している。加えて、直流成分と基本周波数成分は、利得が最大となる方位角が 0° および 180° であり、2 素子で実現できるアンテナとしては、理想的な特性を持つ。以上より、得られた多重指向性を持つアンテナは、受信ダイバーシチや MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 受信において仮想的な受信アンテナとして有効であると言える。

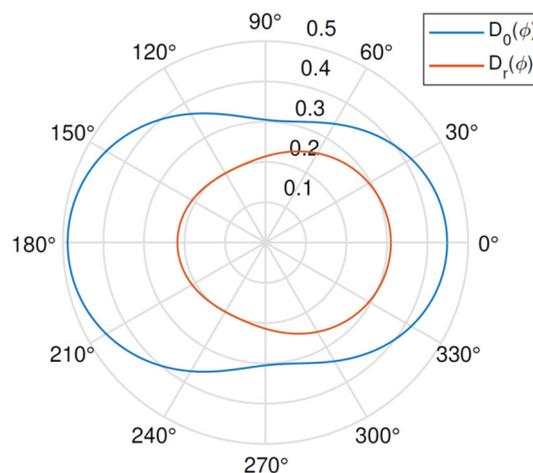


図 1 多重化された指向性の方位角特性

<引用文献>

- [1] 内閣府, Society 5.0, http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html.
- [2] Anand Mohan Gupta, and Masato Saito, “Analytical Derivation of Reactance Time Function Generating Multiplexed Antenna Patterns for Two-element ESPAR Antenna,” Proc. 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2023), Oct. 2023.
- [3] Kosei Kawano, and Masato Saito, “Periodic Reactance Time Functions for 2-Element ESPAR Antennas Applied to 2-Output SIMO/MIMO Receivers,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E102-B, No. 4, pp.930-939, Oct. 2018.

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 Nobuhide KINJO, Masato SAITO	4. 巻 E104-A
2. 論文標題 Diversity Reception and Interference Cancellation for Receivers Using Antenna with Periodically Variable Antenna Pattern	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 253-262
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2020WBP0006	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Moynul Hasan Akash, Masato Saito
2. 発表標題 Low Profile Single/Two-Element Dual-Band Array Antenna for 5th Generation Mobile Communications
3. 学会等名 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and ITNC-USNC-URSI Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Moynul Hasan Akash, Masato Saito
2. 発表標題 Wideband 1x2 Array Microstrip Patch Antenna for 5G-Millimeter-Wave Applications at 59 GHz
3. 学会等名 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and ITNC-USNC-URSI Radio Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Moynul Hasan Akash, Masato Saito
2. 発表標題 Design and performance analysis of an I-shaped slots array antenna for 5G mobile communications
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 2024年

1. 発表者名 Moynul Hasan Akash, Masato Saito
2. 発表標題 Evaluating a Microstrip Patch Array Antenna Operating Between 51.6 GHz and 60.2 GHz for 5G Communications
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 2024年

1. 発表者名 Anand Mohan Gupta, Masato Saito
2. 発表標題 Analysis of Multiplexed Antenna Patterns in a Two-element ESPAR Antenna
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Anand Mohan Gupta, Masato Saito
2. 発表標題 Analytical Derivation of Reactance Time Function Generating Multiplexed Antenna Patterns for Two-Element ESPAR Antenna
3. 学会等名 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Anand Mohan Gupta, Masato Saito
2. 発表標題 Spectral Analysis of Array Factor using Reactance Sequence in a Two-Element ESPAR Antenna
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Anand Mohan Gupta, Masato Saito
2. 発表標題 Analytical Reactance Time Function of Two-element ESPAR Antenna Generating Periodic Antenna Patterns
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤将人
2. 発表標題 アンテナパターン多重による大規模出力・低コスト受信アンテナに関する研究
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 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

琉球大学研究者データベース https://kenkyushadb.lab.u-ryukyu.ac.jp/html/100000512_ja.html Researchmap https://researchmap.jp/read0056087
--

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
---------	---------