

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04154

研究課題名(和文)円偏波放射メタマテリアルラインを基礎とした特性再生可能アンテナの理論構築と実現

研究課題名(英文)Theory and Realization of Reconfigurable Antennas Based on Circularly Polarized Metamaterial Lines

研究代表者

中野 久松(Nakano, Hisamatsu)

法政大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00061234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：直線偏波を使用した通信系においては、送信アンテナ・受信アンテナの偏波面を合わせる必要がある。他方、円偏波を使用した通信系のアンテナでは、偏波整合を必要としない。このような優位性があるにもかかわらず、「円偏波放射ビーム走査・特性再生可能アンテナ(RecANT)」の実現例は皆無に近い。本研究では、円偏波メタアトムから成るRecANTを実現し、その特性を電気磁気学上から系統的に考察している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタアトムを使用して実現した本アンテナの放射パターン、入力インピーダンス、および利得は、ビーム方向が変わってもそのつど同じものとなる。つまり、ビーム走査時に固有の特性が再現される、という特長を有する。従って、この「円偏波放射ビーム走査・特性再生可能アンテナ」は、動きの激しい移動体と基地局との通信に対して有効であり、高度情報化社会に貢献する。

研究成果の概要(英文)：The transmitting and receiving antennas for communication systems using a linearly polarized wave need polarization alignment (PA). On the other hand, those using a circularly polarized (CP) wave do not need the PA. Although CP antennas have such an advantage, there are little data on a CP reconfigurable antenna, which reproduces the same antenna characteristics during the beam steering. In this context, this research presents a realization of the CP reconfigurable antenna, where metaatoms are used. A systematic investigation on the radiation characteristics is performed on the basis of electromagnetics.

研究分野：電磁波工学

キーワード：アンテナ 円偏波放射 特性再生

1. 研究開始当初の背景

従来のビーム走査アンテナは、移相器あるいはリアクタンス素子を装着した多数の直線偏波放射素子から構成されている。放射ビームを特定方向に向けるためには、各放射素子からの放射界の位相を移相器あるいはリアクタンス素子によって変える必要がある。この場合、放射ビーム方向がアンテナ正面からずれるにつれて、利得(感度)が落ちる等の不具合が生じる。つまり、従来の走査アンテナでは、ビーム方向が異なると同じアンテナ特性が再生されない、という欠点があり、特性再生可能アンテナ(RecANT)とは言えない。

さらに付け加えるならば、直線偏波放射素子を使用した通信では、「送信アンテナと受信アンテナの偏波面を同方向(平行)にしなければならない」という制約がある。もし、送信アンテナと受信アンテナとの関係が、偏波面に関して直交するような位置関係にあるなら、受信アンテナは信号を受信できない。従って、飛行体などの移動体に搭載された送信アンテナにおいては、受信アンテナに対して偏波面が時間とともに変わり、その結果、受信アンテナの受信効率は劣化する。

直線偏波放射素子を使用した通信に対し、円偏波放射素子を使用した通信では、「送信アンテナと受信アンテナの偏波面を合わせる必要がない」ことが学術上から知られている。この優位性があるにもかかわらず、円偏波走査アンテナの構築がむずかしい故に、これまでのところ、ビーム方向が変わっても、同じアンテナ特性(放射パターン、放射界軸比、入力インピーダンス、利得など)を再現する理想的な円偏波用・特性再生可能アンテナ(RecANT)の実現例は皆無に近い。

2. 研究の目的

本研究では、前記の困難を打破し、新たに円偏波用・RecANTを創造することを目的としている。このRecANTは、新人工材料であるメタマテリアルを使用し、薄型・低姿勢になる様に開発される。

3. 研究の方法

円偏波を放射する最小構成素子であるメタマテリアル細胞(メタセル、メタ細胞)を創造する。これを用いて、放射ビームの方向が変わっても、「同じ利得、同じ円偏波率、同じ放射パターン、同じ入力インピーダンス」を再現できる円偏波用・特性再生可能アンテナ(RecANT)を創造する。初めに、2方向ビーム走査RecANTを、次に4方向ビーム走査RecANTを創造する。最後に、4方向ビーム走査RecANTの水平面積を縮小化する(小型超薄型RecANTとよぶ)。

4. 研究成果

(1)円偏波用メタ細胞

図1に開発されたメタ細胞を示す。①メタ細胞はx方向の微小な金属小片と、y方向のスタブから構成されている。②金属小片は厚みが1/100波長程度の誘電体板の上面に印刷されている。③誘電体板の底面は金属板(地板GNP)によって裏打ちされている。④スタブはz方向の金属片によってGNPに短絡されている。図2にこの細胞の分散特性(dispersion diagram)を示す。ただし β はメタ細胞上を流れる電流の位相定数を、 k_0 は真空中の波数を示す。 β の決定には次式を基礎方程式[引用文献①-④を参照]としている： $\beta p = \cos^{-1}[(A+D)/2]$ 。ただしA、DはF-Matrixの要素、pはメタ細胞のx方向の微小長である。実際にはS-Parameterに変換されたAとDとを使用して式を計算する。位相定数 β は遷移周波数 f_t 以下では負の値をもつ。メタ細胞は「金属小片上の電流とスタブ上の電流によって円偏波を放射する」ように設計する。このためにスタブの長さを最適化して円偏波を獲得している。このメタ細胞による円偏波放射の実証・検証例は発表論文 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, DOI: 10.1109/LAWP.2019.2907533 の中に詳述している。

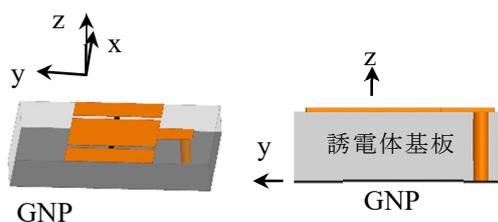


図1. メタ細胞.

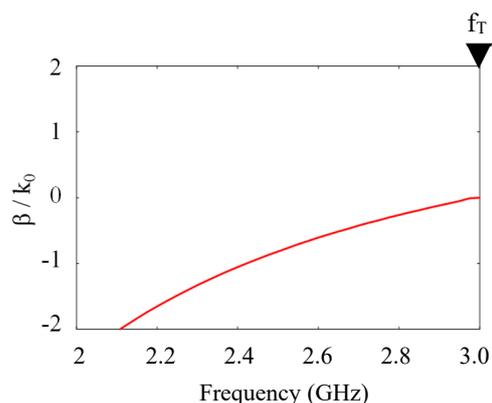


図2. メタ細胞の dispersion diagram.

(2) メタラインからの円偏波放射の実現

図3は上記のメタ細胞をつなぎ合わせてできた線状アンテナである。ここでは、メタ細胞とメタ細胞との間にチップキャパシタを挿入している。点Fを給電点、点Tを終端としている。終端から反射波を発生させないようにするため、点Tにはブロードインピーダンスを接続する。このようにして得られた線状体を「メタラインアンテナ」とよぶ。

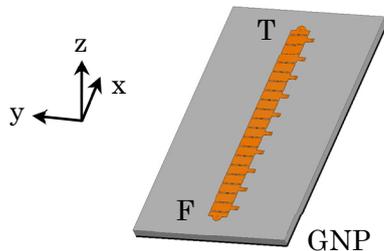


図3. メタライン.

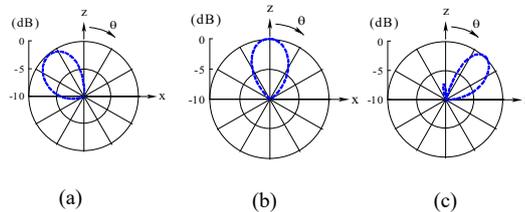


図4. メタラインからの円偏波放射. (a)後方放射. (b)垂直放射. (c)前方放射.

解析から「メタラインは円偏波ビームを形成する」ことがわかる。本研究に於いて実現したメタラインは、従来のメタライン(Composite Right/Left Hand Transmission Line)とは明らかに異なる偏波特性を有し、図4に示すように「円偏波放射ビームの方向は遷移周波数以下で後方放射、遷移周波数において垂直放射、遷移周波数以上で前方放射」となる。

(3) 2方向ビーム走査・円偏波用 RecANT

前記(2)の知見を基にして、同一周波数に於いて、円偏波ビームを2方向に走査するために、図5に示すアンテナ配列を検討する。ここでは2本のメタラインを使用している。これら2本のメタラインは同じ長さになっていて、x軸上に配置されている。F₁, F₂は給電用の点であり、T₁, T₂はメタラインの終端である。このようなアンテナ配列を「2メタライン配列」とよぶ。

F₁, F₂のいずれかを励振し、残りの点を開放とした場合の放射ビームを図6に示す。F₁を給電した場合を図6(a)に、F₂を給電した場合を図6(b)に示す。2本のメタラインは原点に関して点対称であるので、放射ビームの方向が変わっても、同じ利得、同じ円偏波率、同じ入力インピーダンスが再生される(図省略)。換言すれば、2方向ビーム走査・円偏波用 RecANT が実現できたことになる。

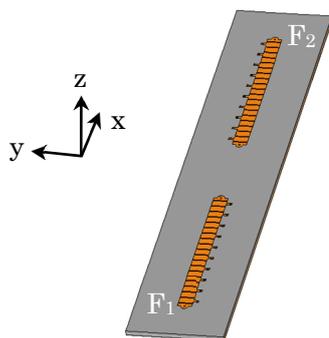


図5. 2メタライン配列.

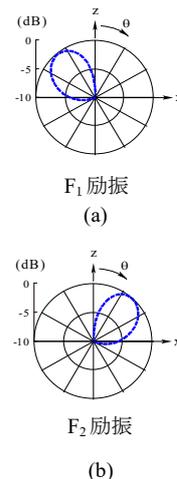


図6. 2メタライン配列からの放射.

(4) 4方向ビーム走査・円偏波用 RecANT

次に4方向円偏波ビームの特性再生を実現する。そのために図7の構造を検討する。x軸上に2本、y軸上に2本のメタラインを配置している。これら4本のメタラインの長さは全て等しく、かつメタラインは原点对称になっている。この配置を「4メタライン配列」とよぶ。ここでF₁, F₂, F₃, F₄は給電用の端子であり、T₁, T₂, T₃, T₄はメタラインの終端子である。これらの終端子はブ

インピーダンスを経て地板に接続されている。給電は F_1, F_2, F_3, F_4 から一つを選んで遂行する。この場合、他の給電用端子を開放状態にする。

図 8 に給電点を F_1, F_2, F_3, F_4 の順で変えた場合の放射ビームを示す。方位方向を円偏波ビームが移動することがわかる。この場合、4 個のビームは同一のパターンとなっている。しかも軸比、入力インピーダンス、利得は給電点が変わっても変わらない(図省略)。つまり、ビーム方向が変わってもアンテナ特性が再生されているので、4 メタライン配列は 4 方向ビーム走査・円偏波用 RecANT になっている。

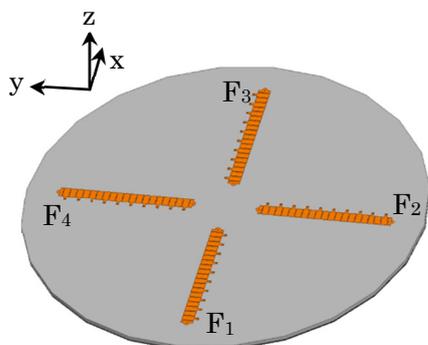


図 7.4 メタライン配列.

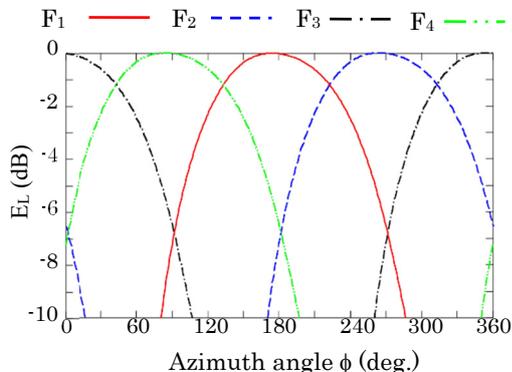


図 8.4 メタライン配列からの放射ビーム。ただし、 E_L は左旋円偏波成分を表す。

(5) 屈曲 4 メタライン配列、小型超薄型円偏波用 RecANT

飛行機、自動車、ドローン、ヘリコプター、人工衛星などの移動体にアンテナを搭載する場合、アンテナ設置に割り当てられる面積は一般に大きくない。それ故、①アンテナの小形化が望まれる。同時に、移動時の風圧の低減化や、アンテナの修理・取り換えの容易さを考えると、②アンテナの高さを低くすることも望まれる。前節(4)で実現した円偏波用 RecANT は、メタ細胞の厚みが 1/100 波長程度になっているので、明らかに薄く、要件②を満足している。そこで要件①に力点を置き、図 7 におけるメタラインを折り曲げた配列を提案する。図 9 参照。この配列を「屈曲 4 メタライン配列」とよぶ。図 9 に於いては、各メタラインはその中央から直角に折り曲げられているので、メタラインの占める投影長は元の長さの約 70% になっている。このことはアンテナ配列の小型化に貢献している。

給電方法は前節(4)と同じであり、 F_1, F_2, F_3, F_4 の順に励振していく。この場合の放射ビームの振舞いを図 10 に示す。メタラインの屈曲により、ビーム方位角が図 8 の場合のものとは異なることがわかる。ただし、円偏波ビームパターンそのものは、ビームの移動によって変わることはない。4 個のビームは同一のパターンとなっている。屈曲メタライン配列が原点に関して点対称になっているので、利得、軸比、入力インピーダンスの値にも変化がない。つまり、円偏波用 RecANT として作動することが導ける。次節で述べる実験値も図 10 に追加している。

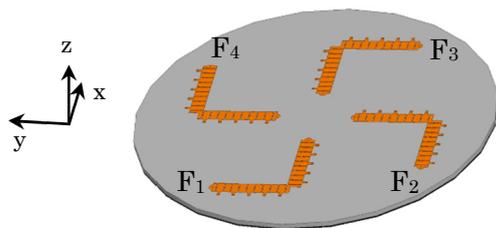


図 9. 屈曲 4 メタライン配列.

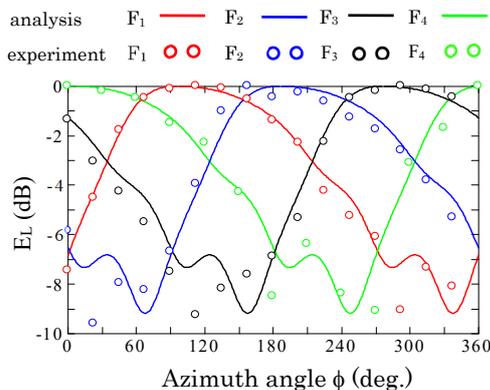


図 10. 屈曲 4 メタライン配列からの放射ビーム.

(6) 実験検証

本学の電波暗室を使用して実験を行い、理論値の正当性を検証した。その際の給電法を図 11 に示す。

周波数 2.4 GHz に於ける放射パターンを前述の図 10 に示している。実験値は理論値の正当性を確認している。周波数 2.4 GHz 付近に於ける利得および入力特性(VSWR)を、それぞれ図 12, 13 に示す。両特性に対する実験値は理論値とよく一致している。

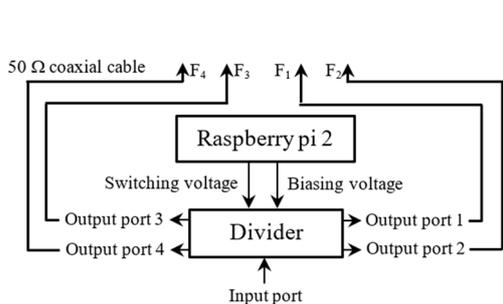


図 11. 給電法.

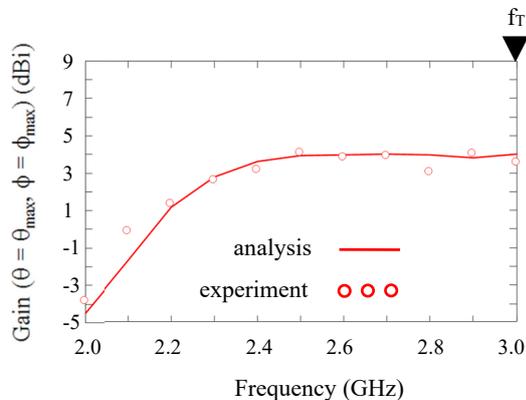


図 12. 利得の周波数特性.

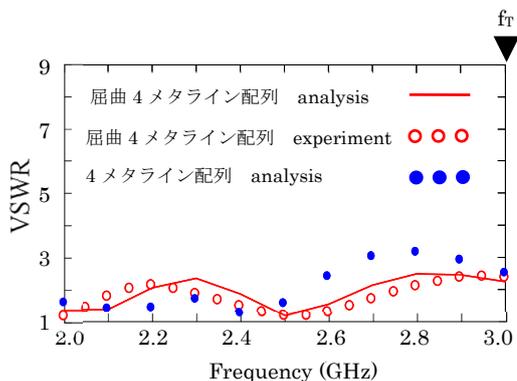


図 13. 入力特性(VSWR)の周波数特性.

<引用文献>

- ①C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic metamaterials, Wiley, NJ, 2006.
- ②G. Eleftheriades and K. Balmain, Negative-Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications. Wiley, NJ, 2005.
- ③ N. Engheta and R. W. Ziolkowski, Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, Wiley, NJ, 2006.
- ④H. Nakano, Low-Profile Natural and Metamaterial Antennas, IEEE Press, Wiley, NJ, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Amit Mehta, Junji Yamauchi	4. 巻 8
2. 論文標題 Compound metacurl antenna with C- and N-type metaatoms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 51703-51712
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.2980052	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 該当する

1. 著者名 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Junji Yamauchi	4. 巻 18
2. 論文標題 Planar reconfigurable antennas using circularly polarized metalines	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	6. 最初と最後の頁 1006-1010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LAWP.2019.2907533	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 5件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Junji Yamauchi
2. 発表標題 Radially arrayed CP metamaterial lines
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部智希, 山内潤治, 中野久松
2. 発表標題 円偏波メタライン8素子配列
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 阿部智希, 山内潤治, 中野久松
2. 発表標題 低姿勢円偏波ヌルステアリングアンテナ
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Junji Yamauchi, Arpan Pal, Amit Mehta
2. 発表標題 Metalines with a patch antenna
3. 学会等名 EuCAP (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Junji Yamauchi
2. 発表標題 Short circularly polarized metaline antenna
3. 学会等名 IEEE APWC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Amit Mehta, Junji Yamauchi
2. 発表標題 Application of a circularly polarized metaline to beam-steerable antennas
3. 学会等名 EuCAP (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------