

機関番号：33302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560377

研究課題名（和文） ペンローズタイルを用いた非周期アレーアンテナに関する研究

研究課題名（英文） Study of an aperiodic array antenna using Penrose tile

研究代表者

牧野 滋 (MAKINO SHIGERU)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：40393524

研究成果の概要（和文）：フェーズドアレーアンテナの低コスト化の方法として、複数のアンテナ素子（サブアレー）毎に移相器を設ける方法がある。しかし、サブアレー間の間隔が大きくなるためにグレーティングローブが発生する。これを避けるためには非周期アレーが効果的である。本研究では、菱形タイルを用いたダイヤモンドタイルアレー、および、直角三角形タイルを用いた風車型タイルアレーにつき、グレーティングローブレベルの低減効果について検討した。また、その効果を実証するためのアンテナモデルを製作した。

研究成果の概要（英文）：To reduce the number of phase shifter, an array antenna is divided into subarrays, and one phase shifter is attached to each subarray. In this case, grating lobes will appear when the beam is scanned because of the periodicity of the array. Random arrangement of element antennas is effective to prevent grating lobes. This study proposes an aperiodic array antenna using one kind of tile as subarrays, which realize both a low cost and low sidelobe characteristics.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2008年度 | 2,500,000円 | 750,000円 | 3,250,000円 |
| 2009年度 | 800,000円 | 240,000円 | 1,040,000円 |
| 2010年度 | 400,000円 | 120,000円 | 520,000円 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,700,000円 | 1,110,000円 | 4,810,000円 |

研究分野：無線通信工学，アンテナ工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク

キーワード：アンテナ，フェーズドアレーアンテナ，非周期アレーアンテナ

1. 研究開始当初の背景

フェーズドアレーアンテナは、周期的に配置した多数の素子アンテナそれぞれに適当な位相を与えることによって、アンテナのビーム方向やビームの形状を瞬時に制御することが出来るため、レーダ用として主に防衛の分野で用いられている。しかし、素子アンテナと同じ数の高価なRFモジュール（移相器、高出力増幅器，低雑音増幅器など）が必要となるため、特に低コスト化が要求される通信

用アンテナなどの民需分野への普及の妨げとなっている。RFモジュールの数を激減した安価なフェーズドアレーアンテナが開発されれば、衛星通信や移動体通信などの通信の分野にも高い機能を有するアンテナを適用でき、世の中に与えるインパクトは大きい。

2. 研究の目的

いくつかの素子アンテナをサブアレーとしてグループ化し、サブアレー毎にRFモジュ

ールを設けるようにすれば、RFモジュールの数は、サブアレーに含まれる素子アンテナ数分の一に減少する。また、例えば、三角形や四角形、六角形などをサブアレーとして用いれば、これらのサブアレーを隙間なく敷きつめることができる。しかし、これらのサブアレーは周期的な配列となるために、ビーム走査時にグレーティングローブが発生してアンテナの特性が劣化する。サブアレーの大きさや形、あるいはサブアレー内の素子配列を異なるものにすればグレーティングローブは抑えられるが、サブアレーの種類が増加し、コスト低減の観点から好ましくない。このような問題に対して、我々はペンローズスタイルに着目し、非周期アレーへの応用を提案、その有効性を検証してきた。

ペンローズスタイルは英国の物理学者 Roger Penroseにより提案されたもので、無限に広い平面を埋めても周期性が現れないという特徴を有する。物理現象との関連ではある種の合金のX線像が五角形の対称性を持ち、この現象はペンローズスタイルと関連付けられている。情報理論でもその応用が考えられている。アンテナに応用した例としては、タイル配列の頂点に素子アンテナを置いた場合、グレーティングローブレベルを軽減できることが報告されているが、ペンローズスタイルをサブアレーに適用した例はない。

我々は、fat、thinと名づけられる2種類のひし形タイルを組み合わせたペンローズスタイルのサブアレーへの適用について検討してきた。その結果、このタイルをサブアレーとして使い、円偏波を使用することにすれば2種類のサブアレーで済み、また、素子は非周期的に配列されるのでグレーティングローブの発生を抑えることができることをシミュレーションによって示すことにより、この提案の有効性を確認することができた。

本研究では、上記2種類のひし形タイルを組み合わせたペンローズスタイルについて性能限界を明らかにするための理論検討を行い、また、さらなるコスト低減を目指して1種類のサブアレーによる非周期配列についても検討すると共に、実際にアレーアンテナを試作し、実験的にもその有効性を実証する。

アレーアンテナを構成するサブアレーの数および種類を減らすこととグレーティングローブの発生を少なくするという点とは相反する要求であり、これまでこういった観点での研究は、世界的にも十分にはなされていなかった。本研究は、ペンローズスタイルという異研究分野の発想をアンテナの分野に取り入れたところに独創性があり、これによって、大きなサブアレーを隙間なく配置しても、配列の周期性によるグレーティングローブが発生しにくいという点に大きな特色がある。

少ない数および種類のサブアレーでグレ

ーティングローブの発生しないアンテナを構成できれば、アレーアンテナに必要なRFモジュールの個数を激減でき、アンテナのコストも激減できる。また、特異な形状のサブアレー中の素子アンテナ配列自体も必然的に非周期となるため、素子アレー間隔を大きくしても、あるいは、周波数帯域が広がったとしても、サブアレーからのグレーティングローブの発生が抑えられる。従って全体の素子数を少なくできることによるさらなるコスト低減、アンテナの広帯域化にも効果がある。産業界に大きなインパクトを与える研究テーマであり、世界に先駆けて研究する意義は大きい。

3. 研究の方法

(1) タイル (サブアレー) の配列アルゴリズム開発と性能限界の把握

ペンローズスタイルは2種類の図形から構成され、相互の結合規則が定められている。しかし、これを適当に並べていくと何個か配列した後に矛盾が生じ、それ以上配列できなくなる。無限に並べるアルゴリズムとして、本研究ではタイルを配列する自由度に着目したアルゴリズムを開発する。配列できる自由度が1の頂点に順にタイルを付け加えていくというアルゴリズムである。

1種類のタイルの場合については、まずは方式検討を行い、その結果により、適切なアルゴリズムを開発する。円形アレーを等間隔の扇形に分割し、それぞれの扇形を2つの半径方向に平行な等間隔な直線で分割して菱形のサブアレーを構成する方法を考えている。それぞれの扇形の中は等間隔アレーとなるが、そこで発生するグレーティングローブの方向は各扇形で互いに異なるため、アレー全体としてのグレーティングローブは扇形の中心角を小さくすることによって低減されるものと思われる。なお、プログラム言語としてはMATLABを使用する。

さらに、これらのアルゴリズムを使用してアンテナの性能限界を見極めた上で、試作するモデルアンテナのアレー構成を決定する。

(2) サブアレー上の素子アンテナの配列と給電系の検討

ペンローズスタイルを構成する2種類のタイルは、それぞれ頂角が異なり辺の長さが等しい菱形である。面積比は黄金比 $1:1.618$ になっているので、これらのタイルの上に並べる素子アンテナの数もこの比に近づける必要がある。素子アンテナの間隔は相互結合を低減するためなるべく広くする必要はある。しかし余り広がるとサブアレーの放射パターンに乱れが生じる。このため、各素子アンテナの周囲に出来るだけ大きな半径の円が描けるような配列を求めるアルゴリズムを開発する。

また、配置された素子に給電するために、不等分配器を用いた給電系を設計する。

(3) 素子アンテナの形式選定

ペンローズタイルの向きは位置によって異なるので、直線偏波を用いるとタイルの位置によって偏波の方向を変える必要がある。素子アンテナとしては円偏波アンテナを用いれば位相の制御だけで良いので便利である。本アンテナに適した円偏波アンテナの形式について検討する。

(4) モデルアンテナの設計と放射特性の計算、測定法の検討

タイルの配列方法、素子アンテナの形式選定、タイル上への配列方法などの検討結果をもとにして、モデルアンテナの設計を行う。設計したモデルアンテナの放射特性を計算するプログラムを作成し、計算を実行する。また狭い電波無響室内でのアレーアンテナの測定法について検討を行う。測定に必要な移相器およびその制御装置について、仕様を固め購入する。

(5) モデルアンテナの試作と測定

設計に基づきモデルアンテナの試作を行う。また準備した移相器、制御装置などを用いて測定をおこない、理論計算結果と比較を行う。アレーアンテナとしては準備できる移相器の数の制約から、16素子を考える。サブアレーの放射パターン、アレーアンテナ全体の放射パターンの測定を行い、理論計算値と比較する。

4. 研究成果

(1) タイル（サブアレー）の配列アルゴリズム開発と性能限界の把握

ペンローズタイルよりもさらなる低コスト化が可能な1種類のタイルの場合について方式検討を行い、ダイヤモンドタイル、および、風車型タイルを考案した。また、いずれについても配列アルゴリズムの開発を完了した。この配列アルゴリズムを使用してパラメトリックスタディを実施し、その性能限界について検討した。

(2) サブアレー上の素子アンテナの配列と給電系の検討

素子アンテナの間隔は、相互結合の低減するためなるべく広くする必要があるのである。このため、各素子アンテナの周囲に出来るだけ大きな半径の円が描けるような配列を求めるアルゴリズムを開発した。

(3) 素子アンテナの形式選定

素子アンテナとしては、1点給電円形マイクロストリップ形式円偏波アンテナをタイ

ルの向きに応じて位相制御する方式に決定した。これにより、すべてのタイルを同一にできるため、さらなる低コスト化が実現できる。

(4) モデルアンテナの設計と放射特性の計算、測定法の検討

風車型タイルによりモデルアンテナを試作することを決定し、16個の移相器で実現できる16サブアレーよりなるアレーアンテナを概略設計し、放射特性計算により性能を確認した。

REV法によりアレーアンテナの測定法をすることに決定した。これに伴い、16個の移相器を同時に制御できるよう、パソコンからのシリアル信号をパラレル信号に変換する機能を有する非周期アレーアンテナ評価装置を開発した。この装置に測定用ソフトウェア（REV法）を組み込んだ。また、20個の移相器を、電源用ラック1台と4移相器用ラック5台とを製作して収納、これにより静電破壊防止、取り扱い簡易化、配線簡易化を実現した。

(5) モデルアンテナの試作と測定

風車型タイルに4個の円偏波アンテナ素子を配列したサブアレーを設計した。

H20年度に購入した16個の移相器で実現できる16サブアレーよりなるアレーアンテナを概略設計し、放射特性計算により性能を確認した。

また、モデルアンテナに使用する16電力分配機を試作、性能を確認した。

H21年度に設計した4素子配列サブアレーを試作・評価した。4分配回路をトリプレート線路で構成し4素子円偏波アンテナと一体化することにより、サブアレーの背面から1点給電とする構成とし、無限平面を隙間なく平面を充填できるサブアレーを実現した。また、開発したサブアレーが設計どおりの優れたVSWR特性、軸比特性を有することを確認した。

上記サブアレーを16個製作する予定であったが、サブアレー単体の平行平板モード抑圧のための試作・評価を数回実施したこと、構造が複雑で製作・評価に時間がかかったことにより、8個しか製作できなかった。サブアレー製作が遅れたため、REV法によるビーム走査方向に対応する移相器位相量の決定、放射パターン測定は23年度に自費で実施する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕（計1件）

①牧野 滋, 藤方 基, 野口 啓介, 廣田 哲夫, 別段 信一, 水澤 丕雄, 遠藤 勉, 佐藤 正人, 片木 孝至, “1種類の菱形タイルを用いた非周期アレーアンテナ”, 電子情報通信学会論文誌 (B), 査読あり, Vol. J93-B, No. 9, pp1219-1228, 2010.

〔学会発表〕（計9件）

①佐竹孝宣, 牧野滋, 別段信一, 水澤丕雄, 野口啓介, 遠藤勉・佐藤正人, 片木孝至, “サブアレーで構成される非周期アレーアンテナにおける性能比較”, 電子情報通信学会2010年総合大会, 2010年3月16日, 東北大学・宮城県仙台市.

② Shigeru Makino, Shogo Kadoguchi, Shin-ichi Betsudan, Motoo Mizusawa, Keisuke Noguchi, Tsutomu Endo, Masato Sato, Takashi Katagi, “An Aperiodic Array Antenna Using Diamond Tiles as Subarrays”, 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009/3/27, ESTREL HOTEL BERLIN・Berlin (Germany).

③門口彰吾, 牧野滋, 別段信一, 水澤丕雄, 野口啓介, 遠藤勉, 佐藤正人, 片木孝至, “1種類の菱形タイルを用いた非周期アレーアンテナ”, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, AP2008-108, 2008年10月17日, 東北学院大学・宮城県仙台市.

④門口彰吾, 牧野滋, 別段信一, 水澤丕雄, 野口啓介, 遠藤勉, 佐藤正人, 片木孝至, “風車タイルを用いた非周期アレーアンテナ”, 電子情報通信学会2008年ソサイエティ大会, 2008年9月17日, 明治大学・東京都.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：アレーアンテナ

発明者：遠藤勉, 佐藤正人, 片木孝至, 門口彰吾, 牧野滋, 別段信一

権利者：三菱電機株式会社, 金沢工業大学

種類：特許

番号：特願 2008-222140

出願年月日：平成 20 年 8 月 29 日

国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧野 滋 (Makino Shigeru)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：40393524

(2) 研究分担者

別段 信一 (Betsudan Shin-ichi)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：10298317

(3) 連携研究者

()

研究者番号：