

シーケンシャル配列を用いた非周期アレーアンテナの軸比特性

吉村 亮佑<sup>†</sup>      牧野 滋<sup>†</sup>      別段 信一<sup>†</sup>      片木 孝至<sup>††</sup>  
 廣田 哲夫<sup>†</sup>      野口 啓介<sup>†</sup>      伊東 健治<sup>†</sup>      佐竹 孝宣<sup>†††</sup>  
 渡辺 光<sup>††††</sup>

Axial Ratio Characteristics of an Aperiodic Array Antenna Using Sequentially Rotated Array Technique

Ryousuke YOSHIMURA<sup>†</sup>, Shigeru MAKINO<sup>†</sup>, Shin-ichi BETSUDAN<sup>†</sup>,  
 Takashi KATAGI<sup>††</sup>, Tetsuo HIROTA<sup>†</sup>, Keisuke NOGUUCHI<sup>†</sup>, Kenji ITOH<sup>†</sup>,  
 Takanori SATAKE<sup>†††</sup>, and Hikaru WATANABE<sup>††††</sup>

あらまし 素子アンテナの相互結合がなく放射特性が同じである場合、任意配列のアレーアンテナがシーケンシャル配列の条件を満足するとき、ブロードサイド方向で円偏波となることが理論的に示されている。しかし、相互結合を考慮すると、素子アンテナの放射特性が等しくならない場合があり、シーケンシャル配列の条件を満足するとは限らない。本論文では、円偏波用単一給電マイクロストリップアンテナ (MSA) の素子アンテナが周期的または非周期的に配列された場合における、シーケンシャル配列による軸比特性について相互結合を考慮して検討し、放射素子 (バッチ) のみならず給電ピンの相互結合を考慮した設計が軸比の広帯域化に必要であることを計算と実験から示した。

キーワード アレーアンテナ, シーケンシャル配列, 非周期アレー, 軸比

1. ま え が き

主ビームを高速ビーム走査できるアンテナとしてフェーズドアレーアンテナ (以下 PAA) があり、移動体衛星通信などに用いられている。PAA は素子アンテナ (以下素子) ごとに高価な移相器を設けるため、高コストとなる欠点がある。この欠点を解消する方法として、複数の素子をサブアレーアンテナ (以下サブアレー) としてまとめ、サブアレーごとに移相器を設け、制御を行う方法がある。しかし、一般に素子間隔はグレーティングローブ (以下 GL) を可視域に入れ

ないため  $1/2$  波長程度であるが、サブアレー化によりサブアレー同士の間隔が  $1/2$  波長以上となり GL が発生する。GL を抑圧するためにサブアレーを非周期的に配列する方法がある [1]。サブアレーの種類は少なく、かつ非周期的に配列できることが望ましく、非周期 PAA の種類としてダイヤモンド型 [2], ペンローズ型 [3], 風車型 [4] などが研究されている。

非周期 PAA の場合、サブアレーの向きはそれぞれ異なっており、直線偏波を使用するとサブアレーの向きに応じて、異なる種類のサブアレーが必要となる。しかし、円偏波を用いれば、1 種類のサブアレーで足りる。本論文では、複数の円偏波素子で構成されるサブアレーの軸比特性の改善を目的としている。円偏波アレーアンテナにおいて、インピーダンス特性と軸比特性を広帯域化する技術として、シーケンシャル配列が研究されている [5]。シーケンシャル配列は同一の素子で構成する任意配列の  $N$  素子アレーにおいて、各アンテナを  $P\pi/N$  [rad] ( $P$  は  $1 \leq P \leq N - 1$  の整数) ずつ素子 #1 (基準アンテナ) に対して回転させ、かつ、その回転に応じて  $P\pi/N$  [rad] ずつ励振位相を

<sup>†</sup> 金沢工業大学, 野々市市  
 Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ogigaoka, Nonoichi-shi, 921-8812 Japan

<sup>††</sup> 三菱電機株式会社, 鎌倉市  
 Mitsubishi Electric Corp., 325 Kamimachiya, Kamakura-shi, 247-8520 Japan

<sup>†††</sup> 三菱電機エンジニアリング株式会社, 春日井市  
 Mitsubishi Electric Engineering Company, 139 Azashimoyasiki, Shimoyashiki-cho, Kasugai-shi, 486-0906 Japan

<sup>††††</sup> 三菱電機株式会社, 鎌倉市  
 Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura-shi, 247-8501 Japan

変化させる。これは、素子に物理的回転を与え、その回転角に応じて励振位相を与えることで広帯域化を実現するものであり、相互結合がなく各素子の放射特性が同じである場合においては、素子のアレー配列に無関係に、シーケンシャル配列の条件を満たす場合にブロードサイド方向で良好な円偏波が得られることを理論式で示している [5]。しかし、非対称な有限地板上に非周期的に素子を配列した場合、素子配列の対称性が崩れるために、相互結合を考慮した素子の特性が同一ではなくなり、必ずしも、広帯域な特性とはならない。

本論文では、 $P = 2$ 、 $N = 4$  のシーケンシャル配列について、相互結合を考慮した場合の軸比特性について検討する。素子を周期配列した 4 素子アレーアンテナにおいて放射素子（以下パッチ）だけ回転対称なシーケンシャル配列にしても、給電点位置がほぼ回転対称でない場合、各給電ピン間の相互結合量が異なるために、必ずしもブロードサイド方向で良好な円偏波とはならないことを示す。更に、風車型アレーアンテナに使用する直角三角形型 4 素子サブアレーを例として取り上げ、完全に素子の対称性が崩れる素子を非対称な有限地板上に非周期配列した場合においても、ブロードサイド方向で完全な円偏波（軸比 0 dB）にはならないものの、通常配列と比べ、シーケンシャル配列が軸比広帯域化に有効であることを示す。

## 2. 4 素子アレーアンテナの特性計算

パッチの配列がシーケンシャル配列の条件を満足していると思われる 4 素子の周期型シーケンシャル配列を例として取り上げ、相互結合の影響を考慮して検討する。

パッチに使用する 1 点プローブ給電振動素子付左旋円偏波マイクロストリップアンテナ（以下 MSA）の設計パラメータを図 1 に示す。このパッチの状態をシーケンシャル配列における回転角 0 deg とする。設計周波数は 3 GHz、波長  $\lambda_0$  は 100 mm である。MSA のパラメータを表 1 に示す。計算は有限要素法（以下 FEM）を用いており、境界条件は放射境界条件とした。また、計算プログラムには HFSS（High frequency structure simulator）を用いた。計算に用いたアンテナ基板の比誘電率は 2.6、 $\tan \delta$  は 0.0016 でパッチと地板は銅（ $\delta = 5.8 \times 10^8$  s/m）ある。

図 2 に通常配列の場合の 4 素子アレーアンテナ (Model0) の計算モデルを示す。図 2 に示すように全ての素子の回転角は 0 deg としており、平行移動

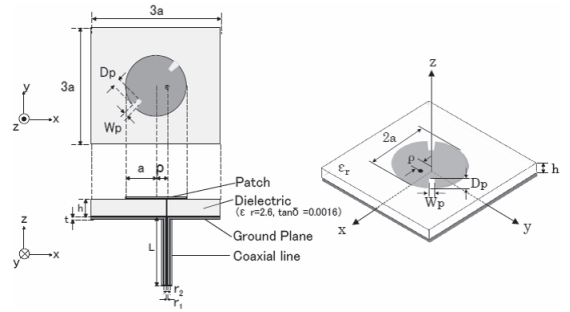


図 1 素子アンテナの設計パラメータ  
Fig.1 Design parameter of an element antenna.

表 1 MSA のパラメータ  
Table 1 Parameters of MSA.

Parameters	Symbol	Value
Patch radius	a	16.13 mm
Offset of feeding probe	$\rho$	0.36a
Conductor thickness	t	0.018 mm
Substrate height	h	3.164 mm
Radius of inner conductor	r1	0.64 mm
Radius of outer conductor	r2	2.05 mm
Perturbation amount	$2W_p D_p$	$0.023a^2 \pi$
Aspect ratio	$D_p / W_p$	3.36
Length of coaxial line	L	$\lambda_0 / 4$

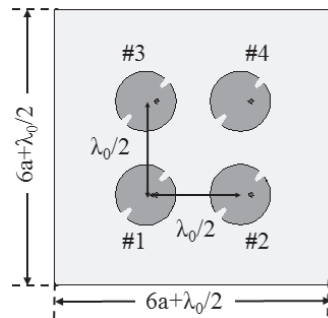


図 2 通常配列 4 素子アレーアンテナの計算モデル (Model0)  
Fig.2 Calculation model of the four elements array antenna (Model0).

のみで構成している。図 3 に素子 #1~#4 を 90 deg ごとに物理的回転角と励振位相を偏移させたシーケンシャル配列 (Model1~Model8) を示す。隣り合う素子が 90 deg 異なるように左回りに変化させた場合 (Model1~Model4) と右回りに変化させた場合 (Model5~Model8) の計 8 通りである。いずれの場合も、パッチの配列は回転対称となっており、パッチによる相互結合量及び地板の影響を考慮した放射特性は等しいものと考えられるが、給電点の配置が異なる。

図4に通常配列とシーケンシャル配列の軸比特性をFEMで計算した結果を示す。計算結果からシーケンシャル配列により、通常配列と比べシーケンシャル配列が、広帯域な軸比特性を示していることが分かる。また、同じシーケンシャル配列でも中心周波数で軸比特性0dBとなり広帯域を示しているものと、中心周波数においても軸比特性が0dBではなく周波数特性も悪いモデルがあることが分かる。計算した全ての周波数において良好な軸比特性を示しているModel1~4では、給電点位置に着目すると、各素子の給電点位置をつないだ線が正方形であるのに対して、Model5~8では菱形あるいは平行四辺形であることが分かる。また、計算モデルの摂動素子(切り込み)を給電点に対して90deg回転させ、右旋円偏波にした場合についても計算したが、給電点位置が正方形になるモデルが良好な軸比特性を示した。各給電点位置をつないだ線が正方形のとき、給電点位置についても回転対称となり、給電ピン間の相互結合の影響が等しく、素子の軸比特性が完全に同じ特性になったため良好な軸比特性が得られたものと考えられる。また、給電点位置が平

行四辺形となるモデルでは、パッチの配列は回転対称となっているが給電点位置が回転対称となっていないため、給電ピンの相互結合の影響により、素子の放射特性が等しくならず、軸比特性に劣化が見られたと考えられる。このため、パッチ間のみならず給電ピン間の相互結合を考慮した設計が必要であることが分かる。

### 3. 直角三角形型4素子サブアレーアンテナの特性計算

風車型アレーアンテナに用いる直角三角形型サブアレー内の非周期な素子配列に対するシーケンシャル配列の有効性を検討する。図5に示す風車型アレーアンテナは、2種類の1:2:√5の直角三角形のサブアレーをすき間なく配列した構成である。図6に直角三角形型4素子サブアレーの計算モデルを示す。ここでは、図6のように2種類のサブアレーを「Left triangle」, 「Right triangle」と呼称する。直角三角形

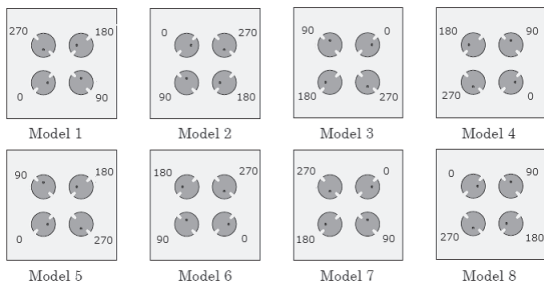


図3 シーケンシャル配列の計算モデル  
Fig. 3 Calculation models of sequential array.

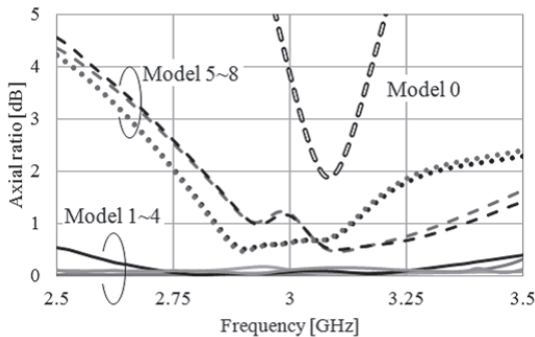


図4 4素子アレーアンテナの軸比特性  
Fig. 4 Axial ratio characteristics of the four elements array antenna.

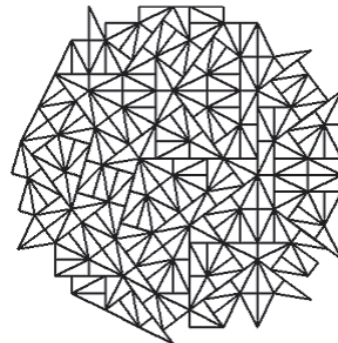


図5 風車型アレーアンテナ  
Fig. 5 Pinwheel array antenna.

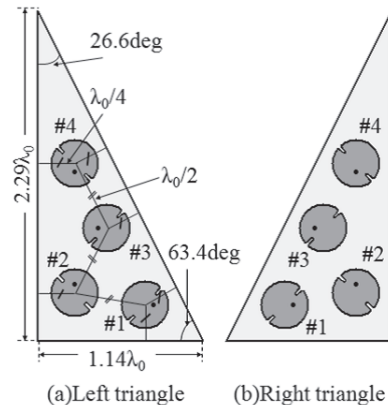


図6 直角三角形型サブアレーのモデル  
Fig. 6 Models of triangle subarray antenna.

型サブアレーの素子配列は、可視領域内に GL が発生しない  $\lambda_0/2$  の素子間隔で配列するために、素子中心から半径  $\lambda_0/4$  の円を描きその円がタイル外形に接し、かつそれらの円同士が 2 点で交わらないという条件のもとで、その直角三角形の大きさが最小となる配列にしており、その配列は図 6 のように一義的に決定される。また、MSA 単体の寸法、給電部の構造は図 1 と同様である。

計算したサブアレーのシーケンシャル配列のパターンは、素子#1~4 について 0 deg, 90 deg, 180 deg, 270 deg の 4 種からなる 24 通り全ての組合せである。計算では、給電回路の周波数特性は考慮しておらず、理想的な励振振幅位相としている。軸比特性の計算結果を図 7 に示す。図 7 において、破線が通常配列、その他の線が 24 通りのシーケンシャル配列の場合の軸比特性である。軸比特性 3 dB 以下を軸比帯域幅とすると、通常配列では軸比帯域幅 1.3% に対し、シーケンシャル配列では Left triangle, Right triangle とともに 25% 以上の軸比帯域幅となった。また、Left triangle, Right triangle の二つを合わせた全 48 通りのうち 38 通りが、計算周波数 2.5 GHz~3.5 GHz に対して軸比 3 dB 以下の値を示した。非周期サブアレーにおけるシーケンシャル配列の場合、パッチの配列、給電ピンの配列のいずれも対称性がとれず、パッチ間及び給電ピン間の相互結合量が異なり、また三角形の地板の影響も素子ごとに異なるためブロードサイド方向で軸比特性 0 dB とならないと考えられる。しかし、通常配列と比べるとブロードサイド方向で軸比特性が優れ、周波数特性も優れていることが分かり、非周期に素子を配列した場合においても、シーケンシャル配列が有効であることが分かる。

また、48 通りの軸比特性を全体的にみるとばらつきはあるが、その最悪値は 2.5 GHz で 4 dB 程度、中心周波数 3 GHz で 1 dB 程度、3.5 GHz で 2 dB 程度の軸比特性となっており、図 4 に示した Model5~8 と似た傾向となっている。このことから、パッチの対称性よりも給電点位置の対称性の方が重要であることが分かる。また、個別には 3 GHz より低い周波数帯域で軸比特性が良いもの、高い周波数帯域で軸比が良いものなど様々な特性を示しているが、これは設計の自由度であり、目的に応じて選択する必要がある。

#### 4. モデル実験

非周期サブアレーにおけるシーケンシャル配列の有

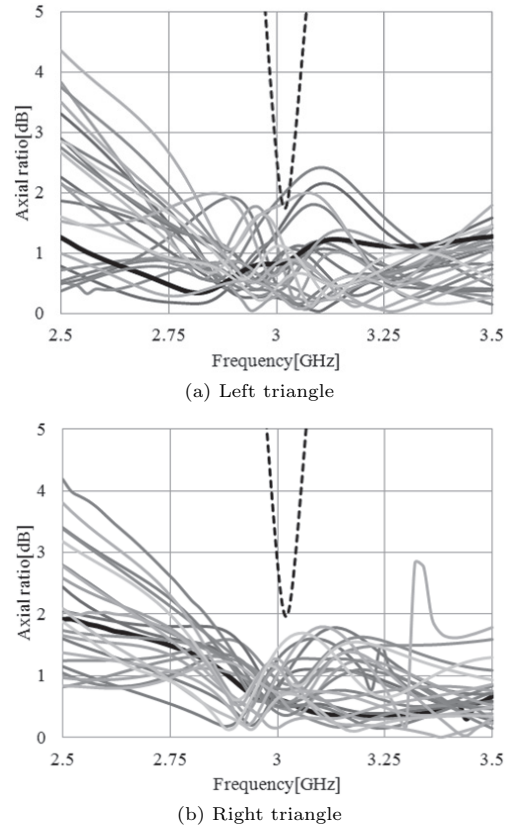


図 7 計算による軸比特性  
Fig. 7 Axial ratio characteristics (calculated).

効性を検証するため、モデル実験を実施した。製作したサブアレーは、図 8 に示す風車型アレーアンテナを構成する 2 種類の給電回路付き直角三角形型 4 素子サブアレーである。シーケンシャル配列のパターンは、前記 24 通りのうち軸比特性と給電回路の電力分配と位相設定のしやすさを考慮し選択し、給電回路を含んだ計算及び製作を行った。なお、選択した配列パターンでの給電回路を含まない計算結果は図 7 の太い実線である。図 8 (a) に示すようにパッチ#1~#4 に 90 deg ずつ物理的回転角と励振位相差を与えたシーケンシャル配列を用いる。図 8 (b) は給電回路のストリップ線路のパターンである。給電回路は、給電点から 50  $\Omega$  線路を 12.5  $\Omega$  にインピーダンス変換したのち T 分岐により 2 分配を 2 回行い、50  $\Omega$  線路に変換して各パッチに給電する構造で、更に各線路長を変化させることで励振位相差を与えている。図 8 (c) の断面図に示すように下面から同軸線路 1 点給電を行いスト

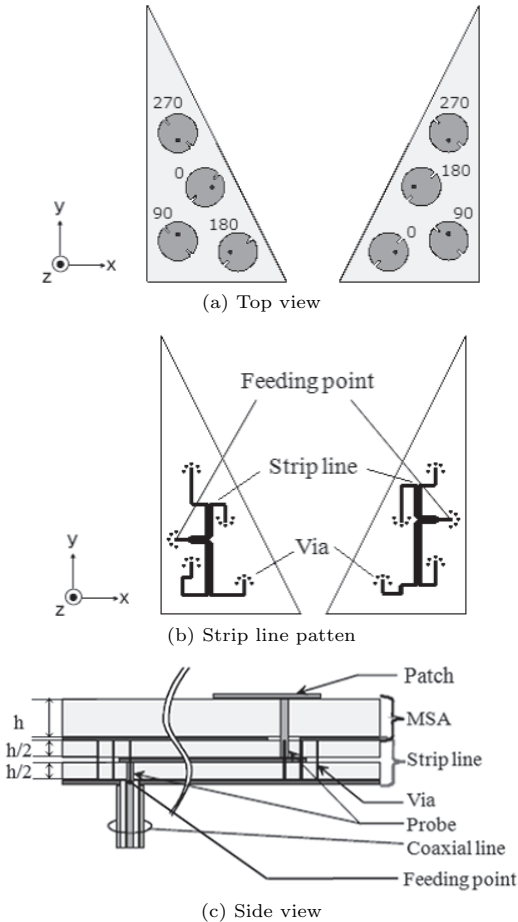


図 8 給電回路付き直角三角形サブアレーの構成  
Fig. 8 Configuration of triangle subarray with feed circuit.

リップ線路で等電力分配し、所望の位相差を与えてプローブを介して給電する構造にし、平行平板モードの抑圧のため、各プローブの周囲にViaを付けている。

給電回路付き直角三角形サブアレーについて計算結果と測定結果を比較する。VSWR特性を図9に示す。図9から、実測値が計算値と比べモデルの製作誤差などで約0.1GHz高い周波数にシフトしたが、計算値と似た傾向であることが分かる。VSWRが2以下となるインピーダンス帯域幅がLeft triangleでは計算値の20%に対して実測値が18%、Right triangleでは計算値の16.2%に対して実測値は12.6%である。軸比特性を図10に示す。図10から、VSWR特性と同様に実測値が計算値と比べ約0.1GHz高い周波数にシフトしたが、計算値と似た傾向があることが分かる。

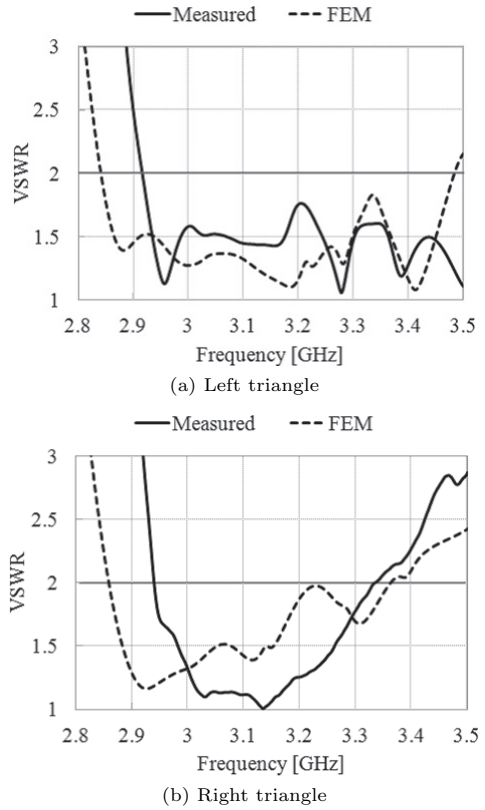


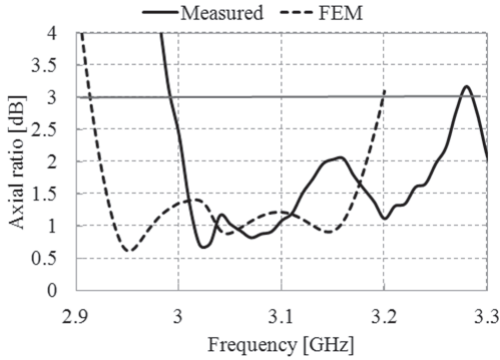
図 9 VSWR 特性  
Fig. 9 VSWR characteristics of subarrays.

軸比特性について、軸比3dB以下となる軸比帯域幅がLeft triangleでは計算値の9.2%に対して実測値が8.6%、Right triangleでは計算値の6.3%に対して実測値は6%である。

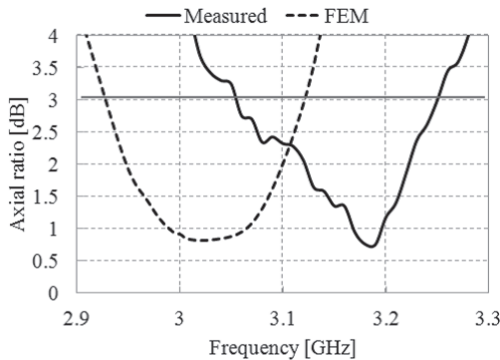
図11にスピリニア法による実測値とFEMによる計算値(破線)とを比較した放射パターンを示す。VSWR特性及び軸比特性が計算値と比べ実測値が約0.1GHz高い周波数にシフトしていたため、放射パターンの測定は計算(3GHz)より0.1GHz高い3.1GHzで行った。図11の実測値からブロードサイド方向での軸比が3dB以下であり、円偏波が放射されていることが分かる。

Left triangleとRight triangleで特性が異なるのは、シーケンシャル配列を行ったMSAの特性が異なることに加え、給電回路が異なっていることが原因として考えられる。また、計算値と実測値の差異の原因として、製作誤差やMSAと給電回路とを積層した基板間のすき間による基板の実効誘電率が変化したこと





(a) Left triangle



(b) Right triangle

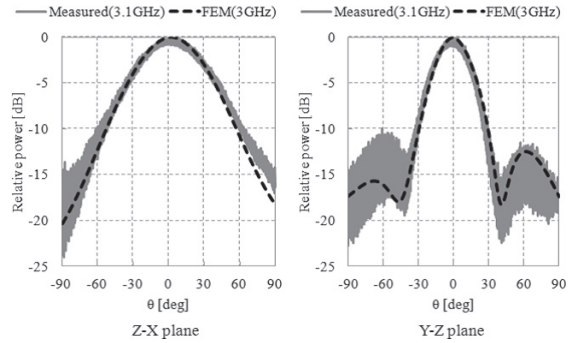
図 10 軸比特性

Fig. 10 Axial ratio characteristics of subarrays.

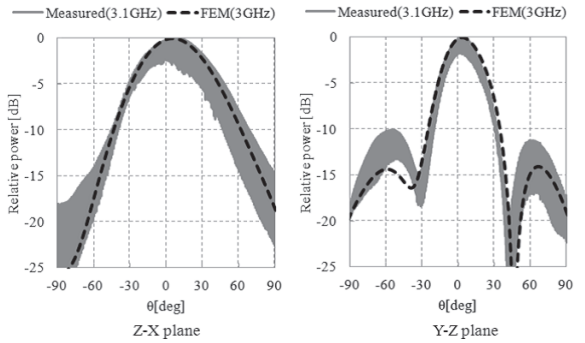
が考えられる。

## 5. むすび

本論文では、素子を周期配列した 4 素子アレーアンテナにおいてパッチをシーケンシャル配列しても、その給電点位置の対称性を考慮しない場合、相互結合が異なるために、必ずしも広帯域にはならない場合があることを示した。また、風車型アレーアンテナに使用する直角三角形 4 素子サブアレーを例として取り上げ、非周期配列した 4 素子サブアレーにおいても、ブロードサイド方向で完全な円偏波（軸比 0 dB）にはならないものの、通常配列と比べ、シーケンシャル配列にすることで軸比が広帯域化となり、シーケンシャル配列が有効であることを示した。給電回路を一体化した直角三角形サブアレーによるモデル実験により、0.1 GHz の周波数シフトがあるが計算結果の妥当性を示した。軸比 3 dB 以下の帯域幅が実測値で Left triangle 8.6%, Right triangle 6% となり、通常配列（計算値 1.3%）と比べ広帯域になることを示した。



(a) Left triangle



(b) Right triangle

図 11 放射パターン

Fig. 11 Measured pattern.

今回の検討では、パッチ及び給電プローブによる相互結合、基板の非対称性がシーケンシャル配列したアレーアンテナの軸比特性に与える影響について検討したが、給電回路を含めた検討が今後の課題である。また、本論文ではサブアレー内の非周期アレーアンテナについて検討したが、風車型アレーのような全体が非周期配列されたアレーアンテナでは、アンテナ全体がシーケンシャル配列に近い配列と考えるが、その効果については今後検討していく。

本研究は科研費（20560377）の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] V. Pierro, et.al, "Radiation properties of planar antenna arrays based on certain categories of aperiodic tilings," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.2, Feb. 2005.
- [2] 牧野 滋, 藤方 基, 野口啓介, 廣田哲夫, 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," 信学論 (B), vol.J93-B, no.9, pp1219-1228, Sept. 2010.
- [3] 藤方 基, 片木孝至, 別段信一, 水澤丕雄, 廣田哲夫, 野口啓介, "ベンローズタイルを用いた非周期アレーアンテナ

ナ,” 信学論 (B), vol. J90-B, no.10, pp.1019-1027, Oct. 2007.

- [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,” 2008 信学ソ大 (通信), B-1-10, Sept. 2008.
- [5] T. Teshirogi, et.al, “Wideband circularly polarized array antenna with sequential rotations and phase shift of elements,” Proc. 1985 Int. Symp. AP., ISAP'85, pp.117-120, Kyoto, Aug. 1985.  
(平成 23 年 12 月 28 日受付, 24 年 3 月 17 日再受付)



吉村 亮佑 (学生会員)

平 22 金沢工大・工・情報通信卒。同年同大大学院博士前期課入学。



牧野 滋 (正員：フェロー)

昭 52 京大・工・電気第二卒。同年三菱電機 (株) に入社。地上マイクロ波回線用アンテナ, レーダ用アンテナ, 地球局用アンテナ, 衛星搭載用アンテナなどの研究に従事。同社情報技術総合研究所アンテナ技術部長を経て, 平 19 年金沢工大教授。昭 62, 平 8, 平 9, 平 10 関東地方発明表彰発明奨励賞, 平 10 R&D100 賞, 平 17 第 16 回電波功績賞電波産業会会長表彰, 平 18 市村産業賞貢献賞, 平 21 本会通ソチュートリアル論文賞など受賞。IEEE Senior member. 工博。



別段 信一 (正員)

昭 38 東北大・工・通信卒。同年三菱電機 (株) 入社。同社通信機製作所にて, レーダ用アンテナ, 衛星通信地球局アンテナ及び電波望遠鏡の開発・設計に従事。同社通信機製作所技師長を経て, 平 9 金沢工大・工・電気電子系・教授。現在, 同電気系・教授。平 20 本会通ソ優秀論文賞受賞。IEEE 会員。工博。



片木 孝至 (正員：フェロー)

昭 38 京大・工・電気卒。同年, 三菱電機 (株) に入社。地上マイクロ波回線用アンテナ, レーダ用アンテナ, 地球局用アンテナ, 衛星搭載用アンテナなどの研究に従事。同社電子システム研究所所長, 情報技術総合研究所所長を経て, 平 12 金沢工大教授。平 20 三菱電機 (株) 鎌倉製作所顧問。昭 41 後期稲田賞, 昭 61 本会業績賞, 昭 53 恩賜発明賞, 平 6 全国発明賞, 平 9 科学技術功労者表彰, 平 20 本会通ソ優秀論文賞, 平 21 本会通ソチュートリアル論文賞など受賞。IEEE Fellow. 工博。



廣田 哲夫 (正員)

昭 54 京大・工・電子卒。昭 56 同大大学院博士前期課程了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。マイクロ波～ミリ波回路の研究に従事。この間, 平 3~4 米 UCLA 滞在研究員。(株) NTT ドコモ勤務を経て, 平 15 金沢工大・工・電気系・教授。現在に至る。昭 63 年度本会学術奨励賞, 平 20 本会通ソ優秀論文賞受賞。IEEE 会員。工博。



野口 啓介 (正員)

平 2 金沢工大・工・電子卒。平 4 東北大大学院博士前期課程了。同年 (株) 日立製作所入社。平 7 金沢工大・工・電子・助手。現在, 同電気系・教授。移動体通信用小形アンテナの研究に従事。平 10 電気学会論文発表賞, 平 20 本会通ソ優秀論文賞受賞。IEEE 会員。博士 (工学)。



伊東 健治 (正員)

昭 58 同志社大・工・電子卒。平 9 東北大学工学研究科・電子工学専攻・後期博士課程了。昭 58 三菱電機 (株) に入社。衛星通信地球局, 衛星搭載中継器, レーダ装置などに用いられるマイクロ波・ミリ波送受信機の研究・開発, RF-IC, 携帯電話機の開発に従事。同社モバイルターミナル製作所・ハードウェア技術部長を経て, 平 21 金沢工大教授。平 12, 平 17 関東地方発明表彰発明奨励賞, 平 18 近畿地方発明表彰発明奨励賞, 平 14 第 50 回オーム技術賞など受賞。平 16~20 IEEE Trans. MTT の Associate Editor, 平 18~20, 平 22, 平 24~現在 IEEE MTT-S elected ADCOM member. 平 20~23 URSI-C 委員長。著書「モバイル通信の無線回路技術」(本会, 共著)。IEEE Senior member. 博士 (工学)。



佐竹 孝宣

平 21 金沢工大・工・情報通信工卒．平  
23 同大学院博士前期課程了．現在，三菱  
電機エンジニアリング（株）．



渡辺 光 （正員）

平 21 金沢工大・工・情報通信工卒．平  
23 同大学院博士前期課程了．現在，三菱  
電機（株）．