

1 種類の菱形タイルを用いた非周期アレーアンテナ

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^{†††}

An Aperiodic Array Antenna Using One Kind of Diamond Tile

Shigeru MAKINO[†], Motoi FUJIKATA^{††}, Keisuke NOGUCHI[†], Tetsuo HIROTA[†],
Shin-ichi BETSUDAN[†], Motoso MIZUSAWA[†], Tsutomu ENDO^{†††}, Masahito SATO^{†††},
and Takashi KATAGI^{†††}

あらまし フェイズドアレーアンテナに必要な移相器の数を低減するために、複数のアンテナ素子をサブアレーとし、サブアレーごとに移相器を設ける方法がある。通常の周期アレーでは、サブアレー間の間隔が $1/2$ 波長より大きくなるので、ビーム走査時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、複数個の形状や向きの異なるサブアレーを配列する非周期アレーが効果的であるが、このとき、サブアレーの種類は少ない方がよい。2 種類の菱形タイルをサブアレーとして用いるペンローズスタイルアレーについては既に報告されている。本論文では、1 種類の菱形タイルをサブアレーに用いる場合の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結果を示す。

キーワード 非周期アレーアンテナ, 菱形タイル, サブアレー, グレーティングローブ

1. ま え が き

フェイズドアレーアンテナは、多数の素子アンテナ（以後、素子）を周期的に配列して構成されたアンテナであり、各素子に設けられた移相器によって位相を変えることによりビームの方向や形状を高速で変えることができるという特長を生かし、主にレーダ用アンテナとして用いられている。その一方、各素子ごとに移相器を設ける必要があるため高価になるという欠点がある。この欠点を解決する方法として、複数素子をまとめてサブアレーとし、サブアレーごとに移相器を割り当てるという方法がある。しかし、素子を複数個まとめたサブアレー間の間隔は 0.5 波長を超えることになり、ビーム走査時にグレーティングローブ（以後、

GL）が発生しやすくなるという新たな問題が生じる。

一般に、GL の発生を防ぐには、サブアレーの配置を不規則にすればよい。これまで、サブアレーの位置を最急降下法を用いて調整し所望の特性を得る方法 [1] や、GA を用いて最適化する方法 [2] など数値計算に基づく方法が報告されている。また、藤方ら [3] は 2 種類の菱形タイルによって構成されるペンローズスタイルにおいて、各菱形タイルの中に複数個の素子を配置したサブアレーとすることによって実現できる非周期アレーアンテナ（以後、非周期アレー）について論じた。以下、本文においても、複数個の素子を配置したサブアレーのことを“タイル”と称することとする。また、1 種類のタイルのみで無限平面を満たすタイル配列において、一つのタイルの平行移動を繰り返すことで実現できる配列を“周期的なタイル配列”，平行移動に加えて回転移動を含むような配列を“非周期的なタイル配列”と称する。

本論文では、1 種類の菱形タイルの中に複数個の素子を配置してサブアレーとした非周期アレーを提案し、これにより実現できる GL について論じる。円形の開口の中心を原点として周方向に N 分割し、分割した

[†] 金沢工業大学, 石川県

Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ogaoka, Nonoichi, Ishikawa-ken, 921-8501 Japan

^{††} 新世代株式会社, 草津市

SSD Company Limited. 400 Yamadera, Kusatsu-shi, 525-8567 Japan

^{†††} 三菱電機株式会社, 鎌倉市

Mitsubishi Electric Corp. 325 Kamimachiya, Kamakura-shi, 247-8520 Japan

領域に1種類の菱形タイルを周期的に配列すると、平面をすき間なく充てんできる。このとき、同一領域に周期的に配列されるタイルからはGLが発生するが、GLが発生する方向は領域によってそれぞれ異なる。したがって、アレー全体から放射されるGLはN方向に分散されることとなり、GLに起因するサイドローブを低減すると予想できる。

2. 提案する非周期アレーアンテナ

2.1 タイルの配列法

GLの発生を抑圧するためにはサブアレーを非周期的に配列する必要がある、その方法としては、サブアレーの大きさ、形状、素子数等を変えて配列する方法が考えられる。しかし、この場合にはサブアレーの種類が増えることになり、設計が効率的ではなく、また、製作コストも上昇するため、サブアレーの種類はできる限り少なく、かつ、非周期的に並ぶことが望まれる。本論文では、円形の開口の原点を中心として領域をN分割し、その領域ごとに菱形タイルを周期的に配列することで、平面空間を1種類のタイルで充てんする方式を提案する。

周方向分割数 $N = 5$ の場合を例にして、1種類の菱形タイルを用いた非周期的なタイル張りの生成について述べる。図1はこのときのタイル張りの様子を示している。まず、図1(a)に示す開口系 D の円形アレー開口を、図1(b)に示すように周方向に5分割する。次に、図1(c)のように、分割された領域に菱形タイルを周期的に配列する。これより、周方向に分割された各領域においては菱形タイルは周期的に配列されるが、全体のタイル張りは非周期的となる。

このとき、非周期アレーに対する自由度のある設計パラメータは以下の3個である。

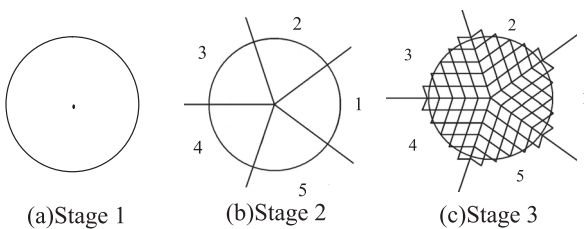


図1 1種類の菱形タイルを用いた非周期的なタイル張りの生成

Fig. 1 Formation of aperiodic tiling using one kind of diamond tile.

D : アレー開口径

N : 周方向分割数

A : タイル面積

2.2 座標系の定義

図2で示すように、サブアレーを構成するタイルを $x-y$ 面に配列するものとし、水平面 ($y-z$ 面) 内での走査角 (z 軸から y 軸方向を見た角度) を Az 、垂直面内での走査角 ($y-z$ 面から x 軸方向を見た角度) を El とする。

このとき、配列中のサブアレー数を M とすると、対応するアレーファクターは次のように表される。

$$AF(Az, El) = \sum_{n=1}^M e^{jk(u_1+u_2)} \quad (1)$$

$$u_1 = x_n(\sin El - \sin El_0) \quad (2)$$

$$u_2 = y_n(\cos El \sin Az - \cos El_0 \sin Az_0) \quad (3)$$

ここで、 El_0 及び Az_0 は主ビームの走査方向、 $k = 2\pi/\lambda$ は波数、 λ は波長、 (x_n, y_n) は $x-y$ 平面中における n 番目のサブアレーの中心の座標である。

3. 一様分布による特性比較

3.1 解析の方法

タイル配列に起因する放射特性を比較するため、各タイルの開口上に電界が一様に分布している場合について検討する。図3に示す菱形タイルの各パラメータは、周方向分割数 N とタイル面積 A を設定すれば、次のように表される。

$$\alpha = \frac{2\pi}{N} \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\frac{A}{\sin \alpha}} \quad (5)$$

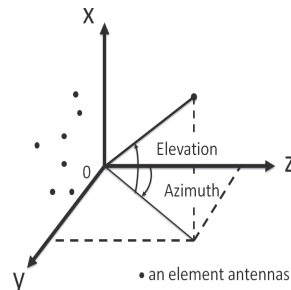


図2 $Az - El$ 座標系

Fig. 2 Coordinates of elevation and azimuth.

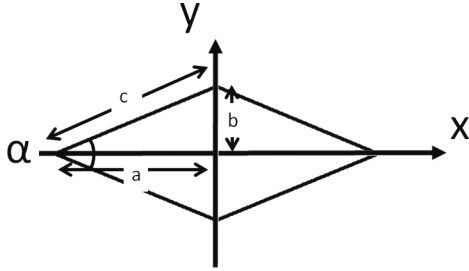


図 3 菱形タイルの形状
Fig. 3 Geometry of a diamond tile.

$$a = c \cos \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

$$b = c \sin \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

開口面分布法によると、タイルの開口上に電界が一樣に分布している場合の放射パターンは次のようになる。

$$\begin{aligned} f(\theta, \phi) &= \int_{-a}^0 \int_{-\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} e^{jk(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dy dx \\ &+ \int_0^a \int_{\frac{b}{a}x-b}^{-\frac{b}{a}x+b} e^{jk(x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi)} dy dx \\ &= 2ab \frac{\sin U_1}{U_1} \frac{\sin U_2}{U_2} \quad (8) \end{aligned}$$

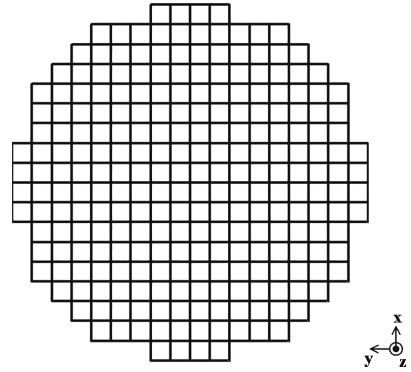
ただし

$$U_1 = \frac{kc}{2} \sin \theta \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \phi \right) \quad (9)$$

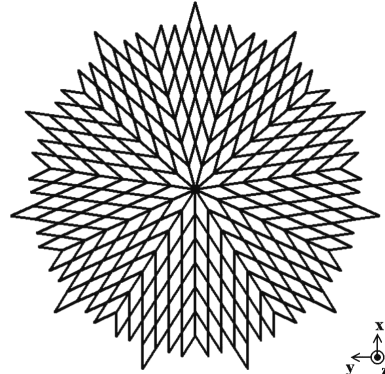
$$U_2 = \frac{kc}{2} \sin \theta \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \phi \right) \quad (10)$$

なお、放射パターン $f(\theta, \phi)$ は、 (x, y) 座標系に対応した (θ, ϕ) 座標系で与えられているが、実際の計算には (Az, El) 座標系に変換したものをを用いる。

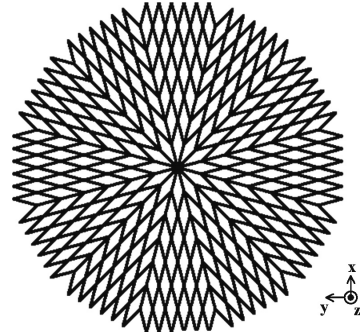
次に、解析モデルを示す。 $N = 4$ のときのタイル配列は、図 4(a) に示すように、周期アレーとなる。この図は、 $A = 1.87[\lambda^2]$ と設定し、タイル数を 248 個としたアレーアンテナである。図 4(b) に $N = 11$ と、図 4(c) に $N = 12$ とするタイル配列を示す。ここで、 A をともに $1.87[\lambda^2]$ としている。 $A = 1.87[\lambda^2]$ としている理由については 4. で記述する。このとき、図 4(b) は菱形タイルを 242 個、図 4(c) は 252 個用いたアレーアンテナであり、タイル数をほぼ等しくすることにより、 $D \simeq 24[\lambda]$ の円形開口となっている。



(a) $N = 4$



(b) $N = 11$



(c) $N = 12$

図 4 タイル配列
Fig. 4 Tile array.

3.2 周期アレーと非周期アレーの特性比較

タイル開口上に一樣分布を与えたとき、主ビームを正面方向へ向ける場合には、どのタイル配列においてもタイル開口上の振幅位相分布は連続、かつ、一樣となるので、GL は発生しないが、主ビームを走査するとタイル間で位相分布が不連続となるため、GL が発生する。主ビームを $Az_0 = 20[\text{deg}]$ に走査したときの二次元放射パターンを図 5 に示す。なお、計算にはパ

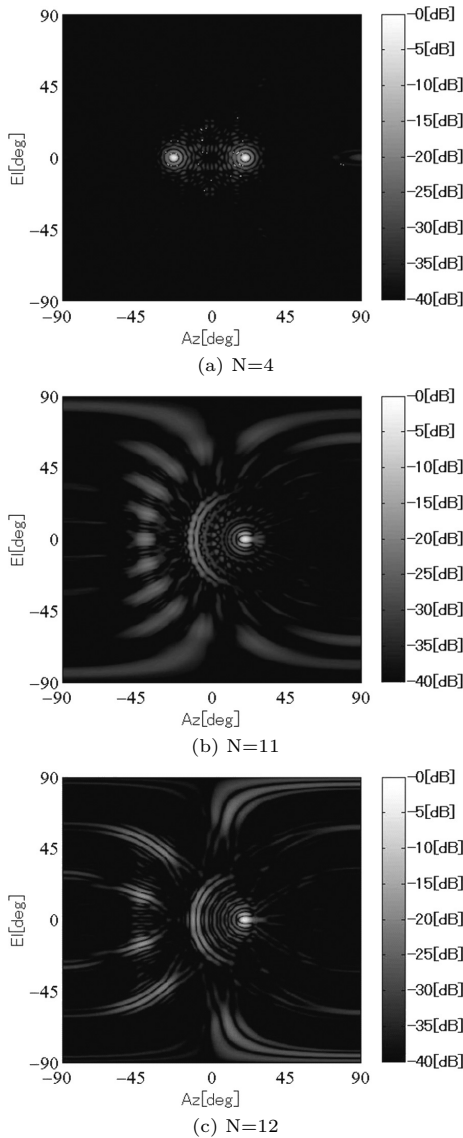


図5 二次元パターン ($Az_0 = 20$ [deg])
Fig. 5 Two dimensional pattern ($Az_0 = 20$ [deg]).

ターン乗積を用いている．周期アレー ($N = 4$) では主ビームと同レベルの GL が発生する．しかし，非周期アレー ($N = 11, N = 12$) ではタイルが周方向に回転しているので，GL が周方向に分散されていることが分かる．これにより，サイドローブレベルの最大値が低減できることを示している．

3.3 周方向分割数と相対利得，サイドローブ特性
 N を 4 から 15 まで変化させ，周方向分割数がサイドローブレベル特性，利得に与える影響について

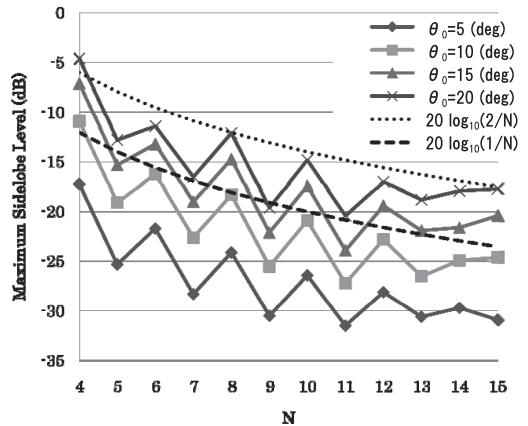


図6 一様分布による分割数-サイドローブレベル特性
Fig. 6 Aperture division to sidelobe level characteristic for uniform distribution.

検討する．アレー開口径 D は約 $24[\lambda]$ である．また， $A = 1.87[\lambda^2]$ と一定にすることにより N にかかわらず全タイル数のほぼ等しいアレーアンテナとしている．また，サブアレーの励振分布は，振幅は一樣，位相は所望のビーム走査方向で同相となるように決めている．

主ビームを $\theta_0 = 5$ [deg] から $\theta_0 = 20$ [deg] まで走査した際のサイドローブレベル計算結果を図 6 に示す．図には，各 θ_0 において $\phi_0 = 0 \sim 360$ [deg] で走査したときの最も高い値を示している．ここで，主ローブからビーム幅の 6 倍以上離れた角度領域のローブをサイドローブとし，主ローブ近軸のサイドローブは除いている．これは，本論文の目的がアレー配列によって発生する GL に起因するサイドローブを比較検討することにあるためであり，この操作により，アレーアンテナ開口上の電磁界分布（今回は一様分布）に起因する近軸のサイドローブを除去できる．

図より，ビームを走査する角度 θ_0 が大きくなるにつれてサイドローブレベルが高くなるのが分かる．また， N が奇数の分割に比べて，偶数の分割ではサイドローブレベルが高くなる．図 4(c) に示す $N = 12$ のタイル配列を見ると，偶数分割の場合，ある領域のタイル配列はこれを 180° 回転した位置のタイル配列と完全に重なっており，二つの領域から同じ方向に GL が発生するためにサイドローブレベルが高くなると考えられる．図には $10 \log_{10} 1/N$ と $10 \log_{10} 2/N$ のカーブを示しているが，特にビーム走査角 θ_0 が大きくなってサイドローブレベルが高くなるにつれて，その値は， N が奇数の場合には $10 \log_{10} 1/N$ のカーブ

に、 N が偶数の場合には $10 \log_{10} 2/N$ のカーブに一致してきており、奇数分割では GL を $1/N$ に抑圧する効果があるのに対し、偶数分割では $2/N$ の抑圧効果しかないといえる。

また、 N にはサイドローレベルを最小とする最適値が存在する。上記条件の場合にはビーム走査角度 θ_0 にかかわらず、 $N = 11$ のとき最もサイドローレベルを抑圧できる。なお、図にはアレー開口径 D を約 $24[\lambda]$ とした場合について示したが、アレー開口径 D を大きくすると、 N が大きい場合においてもサイドローレベルと N との関係が $10 \log_{10} 1/N$ あるいは $10 \log_{10} 2/N$ のカーブと一致する傾向であることを確認しており、サイドローレベルを最小とする最適値 N は 11 よりも大きくなっていく。逆の言い方をすると、アレー開口径 D/λ が十分大きい場合には N を大きくする方がサイドローレベルを下げるができるが、アレー開口径が小さくなるにつれてサイドローレベルを最小とする N が小さくなっていくため、アレー開口径に応じて N を適当に選択する必要がある。

図 7 に、サブアレー放射パターンを乗積して求めた相対利得の計算値を示す。相対利得はビームを正面方向 ($\theta_0 = 0$) に向けた場合を基準としている。なお、 N にかかわらずアレー開口面積をほぼ一定にしているため、 $\theta_0 = 0$ における絶対利得は N に依存しない。図より、ビーム走査角 θ_0 が大きくなるにつれて、また、 N が大きくなるにつれて、利得が低下することが分かる。これは、 N が大きくなるとサブアレーを構成する菱形タイルの長軸と短軸の比 a/b が大きくなり、その結果、サブアレーからの放射パターンが菱形タイルの長軸方向に狭く短軸方向に広い楕円形状となり、ビーム走査角 θ_0 が大きくなると、ビーム走査方向 ϕ_0 に近

い方向の領域のサブアレーが利得に寄与しなくなってくるからであると考えられる。

4. 素子配列による特性比較

4.1 タイル上の素子アンテナの配列

菱形タイルの中に複数個の素子を配列したサブアレーとすることにより、1 種類の菱形タイルによって非周期的なサブアレー配列が得られることになる。タイルの向きは、周方向分割数の N 通り存在するので、直線偏波を使用すると、タイルの向きに応じて偏波変換が必要となる。しかし、円偏波を用いれば、励振位相の調整は必要であるが、タイルの種類は完全に 1 種類でよくなる。

各サブアレー中の素子の位置は、隣り合う素子間隔を半波長以上とし、サブアレー中であるべく疎密ができないように配置するのが妥当であると考えられる。ここでは、素子を中心として半径一定の円を描き、その円が重なることなく半径が最大となるように配置したとき、各サブアレー中で素子は最適に配置できたと考える。一例として、菱形タイルの中に素子を 5 個配列したサブアレーを図 8 に示す。ここで、タイル内の隣り合う素子を結ぶ矢印は最小素子間隔を示しており、これを半波長としている。これにより、サブアレーのタイル面積 A も決定される。図 8(a) より、 $N = 4$ の場合、 $A = 1.46[\lambda^2]$ で、タイルの一辺の長さは $1.21[\lambda]$ となる。また、図 8(b) より $N = 11$ の場合、 $A = 1.69[\lambda^2]$ で、タイルの一辺の長さは $1.77[\lambda]$ 、図 8(c) より $N = 15$ の場合、 $A = 1.87[\lambda^2]$ で、タイルの一辺の長さは $2.14[\lambda]$ となる。このとき、アレー全体を構成するサブアレーの個数 M は、アレー全体の面積をタイルの面積で割った値におおむね等しくなるため、上記のようにタイル内の素子配列を決定する

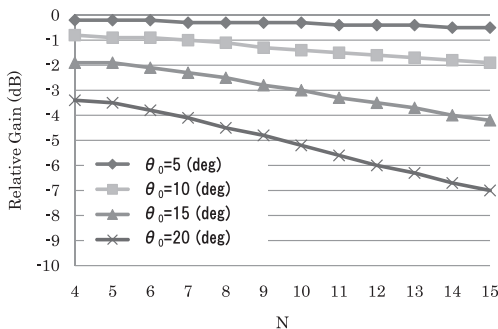


図 7 一様分布による分割数-相対利得特性

Fig. 7 Aperture division to relative gain characteristic for uniform distribution.

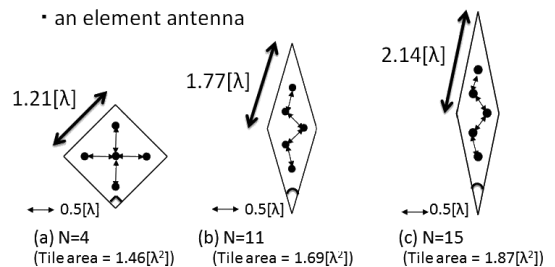


図 8 菱形タイル寸法と素子配列 (最小素子間隔 = $0.5[\lambda]$)

Fig. 8 Scale of diamond tile and element setting (Minimum element spacing = $0.5[\lambda]$).

表 1 分割数に対するタイル面積，サブアレー数（アレー開口径 $D \approx 24[\lambda]$ ）

Table 1 Tile area and number of subarray versus aperture division ($D \approx 24[\lambda]$).

N	変換前		変換後	
	A [λ^2]	サブアレー数	A [λ^2]	サブアレー数
4	1.46	316	1.87	248
5	1.69	270	1.87	245
6	1.62	282	1.87	246
7	1.57	287	1.87	252
8	1.54	288	1.87	256
9	1.62	306	1.87	240
11	1.69	264	1.87	242
12	1.74	252	1.87	252
13	1.79	273	1.87	247
14	1.83	210	1.87	238
15	1.87	225	1.87	255

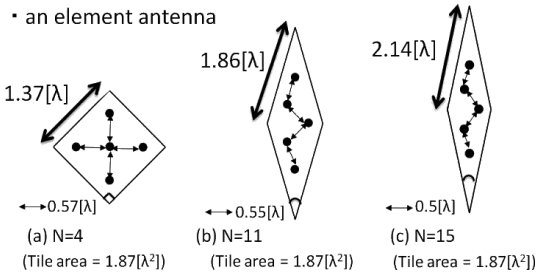
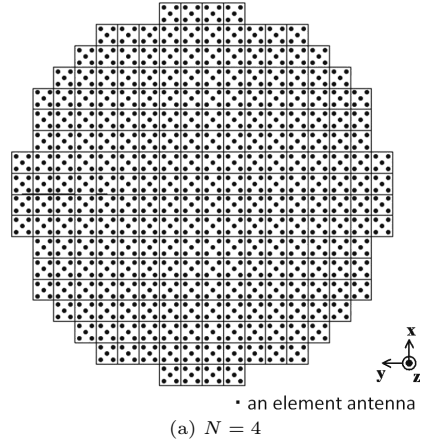


図 9 菱形タイル寸法と素子配列 ($A = 1.87[\lambda^2]$)

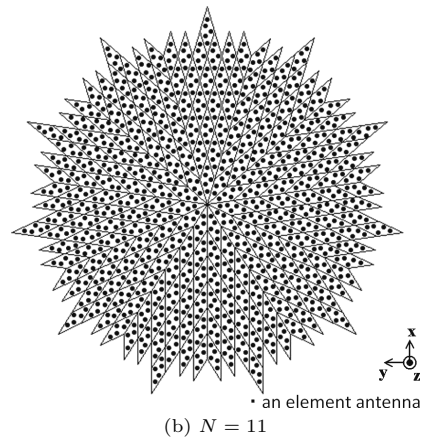
Fig. 9 Scale of diamond tile and element setting ($A = 1.87[\lambda^2]$).

と、 N によってサブアレーの個数，すなわち移相器の個数 M が異なることになる。アレーアンテナのコストは移相器の数に依存するため，サブアレー数が等しい条件で N に対する特性比較を行う方が望ましいと考えられる。

そこで、 N を 4 から 15 までとしたときのタイル面積 A を一定にすることで、アレー開口面積とサブアレー数をほぼ同じにした非周期アレーを考える。ここでは、 N が 4 から 15 において最も A が大きくなる $N = 15$ のときの $A = 1.87[\lambda^2]$ に設定する。表 1 に、タイル面積 A を変換する前と後のサブアレー数を示す。なお、アレー開口径 D は約 $24[\lambda]$ であり、タイル面積変換後のサブアレー数は 250 前後とほぼ同数となっている。3. においても、同様な理由で $A = 1.87[\lambda^2]$ と設定した。このときの素子配列を図 9 に示す。図 9(a) より、 $N = 4$ のとき、 $A = 1.87[\lambda^2]$ にすることで、タイルの 1 辺の長さが $1.37[\lambda]$ となり、また、タイル内の素子の最小素子間隔も $0.5[\lambda]$ から $0.57[\lambda]$ と大きくなる。図 9(b) は $N = 11$ の場合について、図 9(c)



(a) $N = 4$



(b) $N = 11$

図 10 配列パターン

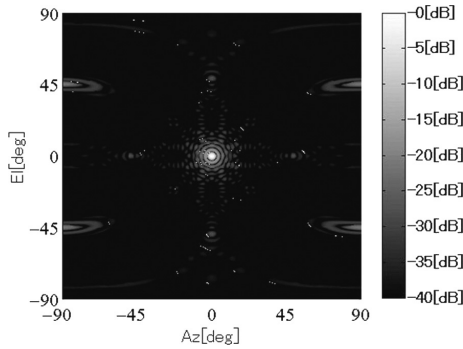
Fig. 10 Array pattern.

は $N = 15$ の場合について示している。これより、 $N = 15$ の場合のみ、最小素子間隔が $0.5[\lambda]$ となる。

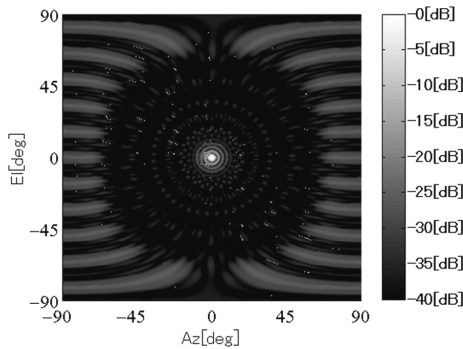
これにより得られるサブアレー配列を図 10 に示す。図 10(a) は $N = 4$ の場合であり、サブアレー数は 248 個、全素子数が 1240 個の周期アレーとなる。また、図 10(b) は $N = 11$ の場合であり、サブアレー数は 242 個、全素子数が 1210 個の非周期アレーとなる。

4.2 周期アレーと非周期アレーの特性比較

素子を無指向性の点波源とした場合の、放射パターンを比較した結果を示す。 $N = 4$ の周期アレーと $N = 11$ の非周期アレーについて、主ビームを正面方向へ向けた場合の二次元パターンは、図 11 のようになる。このとき、タイル面積が $1[\lambda^2]$ 以上となるので、素子を配列した際、開口面上の振幅分布の不連続によって GL が発生していることが確認できる。また、図 12 は図 11 の二次元パターンにおいて、 $Az[\text{deg}]$



(a) $N = 4$



(b) $N = 11$

図 11 二次元パターン (正面方向)

Fig. 11 Two dimensional patterns (boresight).

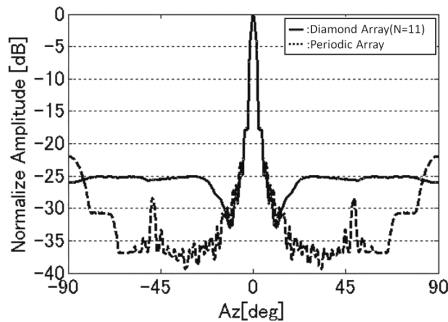


図 12 一次元パターン (正面方向)

Fig. 12 One dimensional pattern (boresight).

ごとに El [deg] を変化させたときのピーク値をサーチして描いている．本論文では，このように描いた放射パターンを一次元パターンと呼び，サイドローブレベルの最大値の特性比較に用いる．実線は非周期アレーの，破線は周期アレーの放射パターンを示している．主ビームを正面方向に向けた場合，サイドローブレベルの最大値は $N = 4$ のとき，約 -21.9 [dB] となり， $N = 11$ のとき，約 -25.1 [dB] となる．放射特性を評

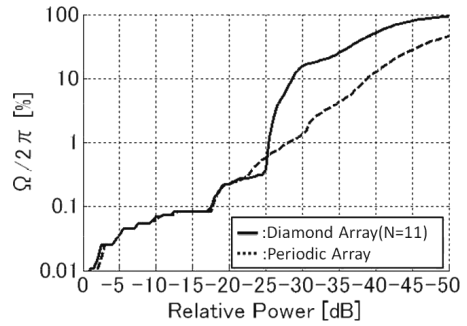


図 13 放射特性の評価 (正面方向)

Fig. 13 Evaluation of radiation pattern (boresight).

価するために，図 13 は，グラフの横軸を相対電力とし，縦軸は，横軸のレベルを超えるローブの角度範囲を Ω として，それを半球の立体角 2π で割ったものを表しており，実線は非周期アレー，破線は周期アレーの放射特性を示している．非周期アレーは周期アレーと比較すると，低いサイドローブが発生する範囲が広いために，約 -25 [dB] 以下の相対電力の角度範囲が広いことが示されている．

また，主ビームを $Az_0 = 20$ [deg] に走査した場合の二次元パターンを図 14 に示す．ビームを振ることにより，開口面上の振幅分布の不連続に加えて位相分布の不連続に起因する GL が加わることで，サイドローブレベル値が上昇することを示している．図 14 の一次元パターンを図 15 に示す．主ビームを $Az_0 = 20$ [deg] に走査した場合，サイドローブレベルの最大値は $N = 4$ のとき，約 -3.8 [dB]， $N = 11$ のとき，約 -18.2 [dB] となり，GL が抑圧されていることが分かる．次に，図 16 に放射特性の評価図を示す．非周期アレーではサイドローブレベルの最大値が低いために -20 [dB] 以上の高い相対電力の角度範囲が狭くなる一方，低いサイドローブが発生する範囲が広いために -20 [dB] 以下の相対電力の角度範囲が広いことが分かる．

4.3 周方向分割数と相対利得，サイドローブ特性

主ビームを $\theta_0 = 20$ [deg] に走査し， N に対する相対利得，サイドローブレベル最大値 ($\phi_0 = 0 \sim 360$ [deg] で走査したときの最も高い値) を計算した結果を，図 17 に示す．図より，3. で行った一様分布による N に対するサイドローブレベルの変化の計算結果と同様に， $N = 11$ のときサイドローブレベルが最小の値となるが，そのときのサイドローブレベルは約 -18.1 [dB] となり，一様分布の場合のサイドローブレベル約 -20.3 [dB] よりも上昇していることが分かる．

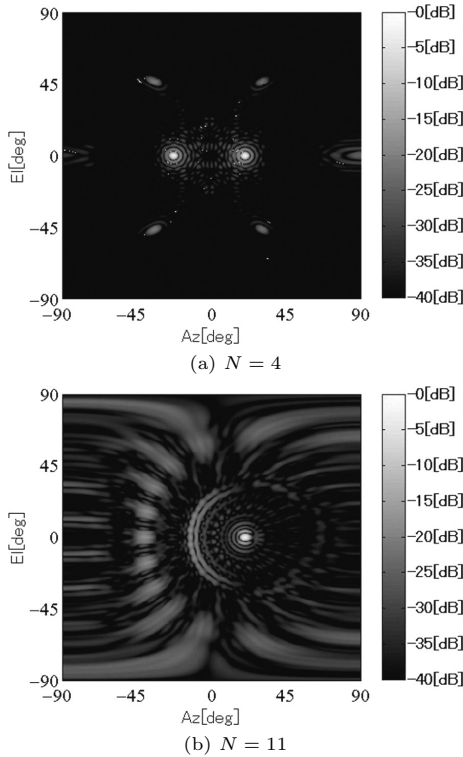


図 14 二次元パターン ($Az_0 = 20$ [deg])
Fig. 14 Two dimensional patterns ($Az_0 = 20$ [deg]).

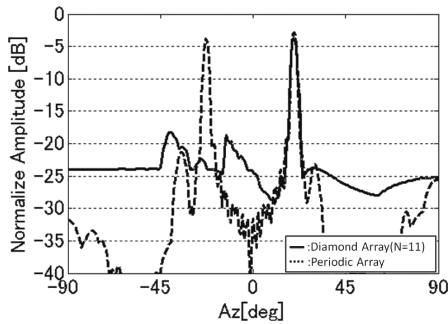


図 15 一次元パターン ($Az_0 = 20$ [deg])
Fig. 15 One dimensional pattern ($Az_0 = 20$ [deg]).

また、一様分布の場合と同様、 N が大きくなるにつれて相対利得は低下するが、一様分布の場合と比べるとその利得低下量は小さい。これは、素子を配置した場合のサブアレーからの放射パターンのビーム幅が、一様分布の場合と比べると広がるからであると考えられる。

4.4 非周期アレーから発生する GL の識別

これまで示した二次元パターンの図においては、

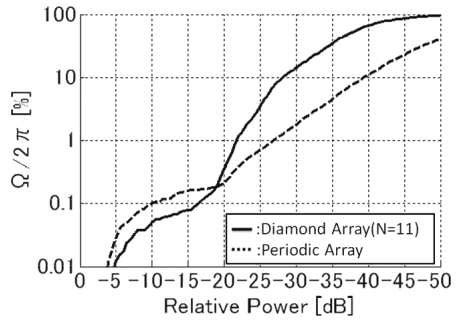


図 16 放射特性の評価 ($Az_0 = 20$ [deg])
Fig. 16 Evaluation of radiation pattern ($Az_0 = 20$ [deg]).

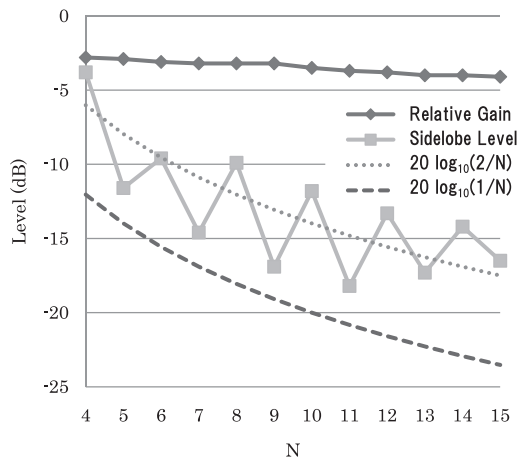


図 17 素子配列による分割数-相対利得，サイドローブレベル特性 ($\theta_0 = 20$ [deg])
Fig. 17 Aperture division characteristic for an element setting ($\theta_0 = 20$ [deg]).

高いサイドローブが、周方向に分割された各領域において周期的に配列された菱形タイルアレーによって発生する GL か、いわゆるサイドローブなのかの識別が困難である。ここでは、Floquet の理論 [4] を用いることにより、周期的に配列された菱形タイルアレーから発生する GL の発生する方向について検討する。

Floquet の理論を用いると、次式を満足する p, q ($p, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) に対応した $k_{T_{pq}}/k$ が可視領域に発生する GL (主ビーム ($p = q = 0$) を含む) の方向である。

$$k^2 - k_{T_{pq}} \cdot k_{T_{pq}} \geq 0 \quad (11)$$

ここで、

$$k_{T_{pq}} = k_T + pk_1 + qk_2 \quad (12)$$

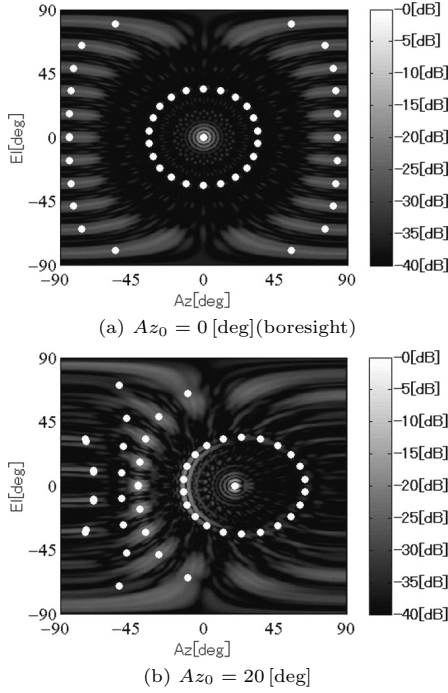


図 18 非周期アレーから発生する GL の方向 ($N = 11$, 素子配列)

Fig. 18 The angle domain which grating lobe generates for an aperiodic array ($N = 11$, element set).

$$\mathbf{k}_T = k \sin \theta_0 \cos \phi_0 \mathbf{i} + k \sin \theta_0 \sin \phi_0 \mathbf{j} \quad (13)$$

$$\mathbf{k}_1 = \frac{-2\pi}{A} \mathbf{k} \times \mathbf{d}_2 \quad (14)$$

$$\mathbf{k}_2 = \frac{2\pi}{A} \mathbf{k} \times \mathbf{d}_1 \quad (15)$$

なお、 θ_0, ϕ_0 は主ビームの方向、 \mathbf{d}_1 及び \mathbf{d}_2 は周方向に分割された各領域の菱形タイルアレーの配列の周期を表すベクトル、 A はタイル面積 ($= |\mathbf{d}_1 \times \mathbf{d}_2|$)、 \mathbf{i}, \mathbf{j} 、 \mathbf{k} はそれぞれ x, y, z 軸方向の単位ベクトルである。各領域の菱形タイルアレーより発生する GL の方向を合成することにより、アレー全体から発生する GL の方向を得ることができる。 $N = 11$ の非周期アレーの場合、計算した二次元パターン上に、GL の方向をプロットしたものを図 18 に示す。ここで、主ビームを正面方向に向けたとき、主ビームを中心にして GL が周方向に発生する。更に、主ビームを $Az_0 = 20$ [deg] 方向に向けるときに発生する放射レベルの高いサイドローブは GL であることが分かる。

5. むすび

1 種類の菱形タイルをサブアレーとして用いる非周期アレーアンテナを提案した。タイル開口上に一様分布を与えた場合、周方向分割数 N が奇数分割の場合は GL を $1/N$ に、偶数分割では $2/N$ に抑圧する効果があること、アレー開口径 D が約 $24[\lambda]$ の場合には $N = 11$ のとき最もサイドローブレベルを改善できることを示した。利得については、ビーム走査角 θ_0 が大きくなるにつれて、また、 N が大きくなるにつれて、低下することを示した。更に、菱形タイルの中に素子を 5 個配列することにより移相器の数を $1/5$ とした非周期アレーについて検討し、 N に対するサイドローブレベル、利得は一様分布の場合と同様の傾向を示すものの、一様分布と比較すると、サイドローブレベルは上昇すること、利得は一様分布ほどは低下しないことを示した。

今後は、指向性利得に関する検討や、サブアレー配列に間引きを用いることによる更なる低コスト化の検討が課題となる。

文 献

- [1] N. Toyama, "Aperiodic array consisting of subarrays for use in small mobile earth stations," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.53, no.6, pp.2004–2010, June 2005.
 - [2] M.G. Bray, D.H. Werner, D.W. Boeringer, and D.W. Machuga, "Optimization of thinned aperiodic linear phased arrays using genetic algorithms to reduce grating lobes during scanning," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.50, no.12, pp.1732–1742, Dec. 2002.
 - [3] 藤方 基, 片木孝至, 別段信一, 水澤丕雄, 広田哲夫, 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," 信学論 (B), vol.J90-B, no.10, pp.1019–1027, Oct. 2007.
 - [4] J.P. Montgomery, "Scattering by an infinite periodic array of thin conductors on a dielectric sheet," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.AP-23, no.1, pp.70–75, Jan. 1975.
- (平成 21 年 12 月 22 日受付, 22 年 4 月 24 日再受付)



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 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。



藤方 基 (正員)

平 17 金沢工大・工・電子卒。平 19 同大学院博士前期課程了。同年新世代(株)に入社。平 18 本会北陸支部学生優秀論文発表賞, 平 20 本会通ソ優秀論文賞受賞。



野口 啓介 (正員)

平 2 金沢工大・工・電子卒。平 4 東北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)。



廣田 哲夫 (正員)

昭 54 京大・工・電子卒。昭 56 同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。



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。



水澤 丕雄 (正員:フェロー)

昭 34 東北大・工・電気卒。同年三菱電機(株)入社。以来, 衛星搭載アンテナ, 地球局大形アンテナ, 新幹線アンテナ等の研究に従事。昭 60 宇宙通信(株)へ出向。衛星通信システムの開発に従事。昭 62 金沢工大・工・電子・教授。現在, 同数理工教育センター。昭 40 後期稲田賞, 昭 60 本会業績賞, 平 20 本会通ソ優秀論文賞受賞。IEEE Life Fellow。工博。



遠藤 勉 (正員)

平元東北大・工・電気卒。平 3 同大学院博士前期課程了。同年三菱電機(株)に入社。携帯電話, 車載等の移動体通信用小形アンテナ, レーダ用アンテナの研究, 開発, 設計に従事。平 10 年度本会学術奨励賞受賞。



佐藤 正人 (正員)

昭 60 法大・工・電気電子卒。昭 62 同大学院博士前期課程了。同年, 三菱電機(株)に入社。レーダ, 衛星搭載, 移動体通信用各種アンテナの研究, 開発, 設計に従事。現在, 同社鎌倉製作所技術部電子技術第四課長。



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。