

放射散乱共用リフレクトアレーアンテナの設計の基礎検討

塚田隆平, 佐藤弘康, 陳強 (東北大学工学研究科)

概要: リフレクトアレーは, 周期的に並べられたアレー構造を用いて電磁波の散乱方向の制御を可能とする技術である. 応用として, 電波の不感地帯の解消, 平面型レンズ等が挙げられる. 従来, リフレクトアレーは散乱体として利用されており, 負荷や給電構造を持たせた場合の研究はほとんど行われていない. 本報告では, リフレクトアレーに放射機能を付与することを目的として, 2層正方形パッチリフレクトアレーについて, 負荷の有無及び給電構造を持たせた場合の散乱特性, 放射特性に対する基礎的検討を行った結果を述べる.

キーワード: リフレクトアレー, パッチアンテナ, 無限周期構造, フロケの定理

1. まえがき

リフレクトアレーは, 周期的に並べられたアレー構造を用いて, 入射波の散乱方向を制御することができる. 例えば, パラボラアンテナの放物鏡面の平面化が代表的な応用である. その他の応用として, ビルの屋上に設置された広告板等の平板にリフレクトアレーを設置することで, 基地局からの平面波の方向をビル直下の方向に向けることで市街地の電波環境を改善する応用に用いられている[1]. また, リフレクトアレーの広帯域化, 広角ビーム走査に関する研究も行われている[2]. しかしながら, これらの研究では一次放射器からの電磁波をリフレクトアレーで散乱させてビーム方向を制御する方法のみ行われており, リフレクトアレーには負荷や給電構造がない. 給電構造を持たせたリフレクトアレーが実現できれば, 例えば既存のフェーズドアレーのアンテナ構造に対して周期的な構造の変化を持たせることにより, 遠方からアレー方向に照射された電磁波の方向を変化させる機能を追加し, 自身のレーダー散乱断面積を抑圧することが可能となる等有効な応用分野が開かれるものと考えられる.

本研究ではリフレクトアレーに放射機能を付与した場合について検討した結果を述べる. まず基本的な無限周期2層正方形パッチアレーに対して, 負荷の有無に対する散乱特性解析を行い, 有限要素法を用いて散乱波の位相変化量の電磁界解析を行った. 得られた位相変化量特性を利用して, 数個の有限素子リフレクトアレーを設計し, これに負荷や給電構造を持たせた場合の散乱・放射特性を求めた.

2. リフレクトアレーの原理

パラボラアンテナの原理は, 放物鏡面の焦点から所望の方向に至る経路の位相が等しくなる特徴を利用し, 一次放射器からの電磁波を放物鏡面で反射させ, 所望の方向に対して放射電界を同相にするもの

である. 一方, リフレクトアレーは平面に周期的に

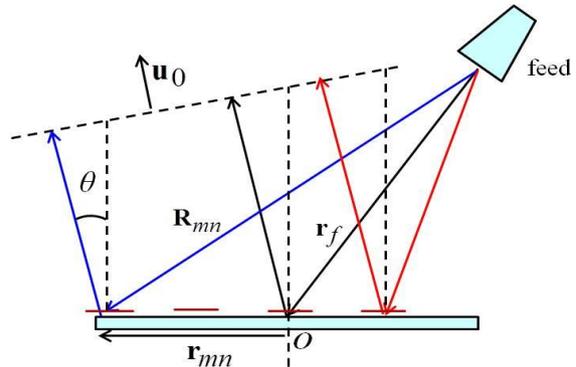


図1 リフレクトアレーの概念図

並べられたアレー素子の各構造をわずかに変化させることで各アレー素子からの散乱波の位相を制御し, 結果的に所望の方向において位相が揃うように設計し, パラボラアンテナのような立体レンズを平面レンズで実現可能な技術である. 一般に, リフレクトアレーの設計は各素子が無限に並べられたいわゆる無限周期構造からの散乱波の位相変化量の解析をフロケの定理を用いて行い, この位相変化量特性を参照して, 有限リフレクトアレーの各素子の構造を決定している. このことは, 厳密には無限に同一アレー構造が並べられていないことに起因する近似が含まれており, 完全に位相制御できるとは限らないことを前提としている. しかしながらこの近似による設計で概ね所望のアンテナ特性が得られていることから広く利用されてきた設計方法として認められている.

リフレクトアレーの概念図を図1に示す. xy 平面において $m \times n$ 個のアレー素子が並べられている場合について考える. 一次放射器から (m, n) 番目の素子に入射する入射波の方向ベクトルの大きさを R_{mn} , 原点におかれた基準素子から (m, n) 番目の素子に至る位置ベクトルを r_{mn} , 一次放射器の位置ベクトルを r_f とすると, 補正位相 Ψ は

$$\begin{aligned} \Psi_{mn} &= k_0 (R_{mn} + r_{mn} \cdot \mathbf{u}_0) + 2p\pi \\ &= k_0 (R_{mn} + r_{mn} \cdot \mathbf{u}_0) + 2p\pi \end{aligned} \quad (p = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

となる[3]. ここで, k_0 は設計周波数における波数であり, \mathbf{u}_0 は同位相にする所望の平面電磁波の方向ベクトルの単ベクトルを表し, θ_s はベクトル \mathbf{u}_0 と z 軸のなす角を表す. 以上の方法を用いて, リフレクトアレーによって散乱される電磁波の位相が所望の方向で同相となるように位相を補正する方法で

は、各アレー素子の寸法の変更による散乱波の位相変化量が 360 deg. 以上あることが必要である。ただし、上述の近似には隣接アレー素子における大きな構造変化による不連続が含まれていないため、360 deg. 以上の位相変化量を実現することによって構造の不連続を持たせずにリフレクタレーを設計することが可能である。

散乱波の位相変化量に関する従来研究において、通常のマイクロストリップリフレクタレーでは、その散乱波の位相変化量が十分ではないためにリフレクタレーの大型化には向いていないことが明らかとなっている。そこで、マイクロストリップリフレクタレーに位相変化量を大きくする試みとして、正方形パッチアンテナアレーを2層化した構造が提案された[4]。そこで本研究では、この2層構造正方形パッチリフレクタレーを利用し、基本的な散乱特性とともに、2層正方形パッチアレーに負荷を装荷した場合、及び給電構造を装荷した場合の散乱・放射特性を解析した。

3.無限周期構造解析

3.1 解析モデル

無限周期構造解析には有限要素法 (HFSS) を用いた。無限周期構造の解析の特徴のひとつとして、各アレー素子の素子間相互結合が含まれることが挙げられる。この特徴は素子間相互結合が顕著な場合に有効な手法であり、例えば単一素子で設計されたアンテナにおいて素子間相互結合が小さい場合はアレー素子パターンの重ね合わせを利用した設計が可能であり設計が簡便となる。しかしながら一般にアレー素子間隔が1波長を超えるとグレーティングローブが発生する問題があるため、素子間相互結合が大きな1波長以下の素子間隔を選ぶ必要があり、無限周期構造解析が必要となる背景がある。

無限周期構造の単位セルの解析モデルを図2に示す。設計周波数を 12 GHz とする。単位セルの x, y 方向のピッチはいずれも L の正方形周期構造とする。ここで L は 12 GHz における波長 25 mm の半波長 12.5 mm よりわずかに長い $L = 14$ mm とする。2層正方形パッチアンテナの上方パッチ及び下方パッチの一辺をそれぞれ l_1, l_2 とし、 $l_1 = 0.7 l_2$ の関係を与える。グラウンド板からの下方パッチの高さ及び下方パッチから上方パッチの高さはいずれも h とし、各層の基板の比誘電率 ϵ_r は等しいものとする。負荷 Z_0 を装荷する場合は、図3に示すように下方パッチとグラウンド板の間において y 軸方向にオフセットした位置に $Z_0 = 50 \Omega$ の抵抗を与えた場合を y -offset モデル、 $-x$ 軸方向にオフセットした位置に $Z_0 = 50 \Omega$ の抵抗を与えた場合を x -offset モデルとする。

z 軸の周囲 4 面に対してフロケの定理に基づく周期境界条件 (Periodic Boundary Condition, PBC) を適用する。 $+z$ 軸の上面には完全整合層吸収境界条件 (Perfectly Matched Layer, PML) を適用し、 $-z$ 方向の $z=0$ の面は完全導体のグラウンド板とする。 E_y または

E_x の偏波成分を有する平面波をアンテナに入射して散乱させ、反射係数 Γ

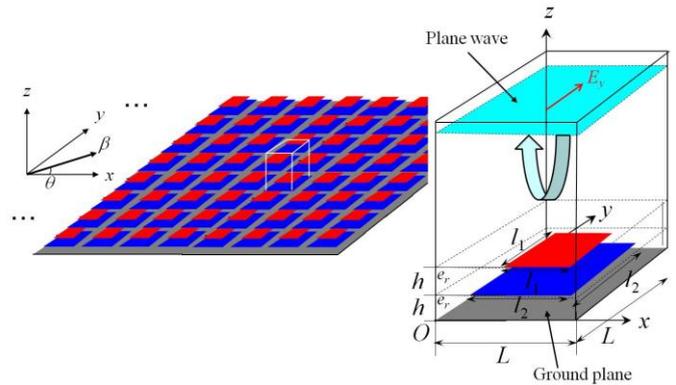


図2 無限周期構造とその単位セル

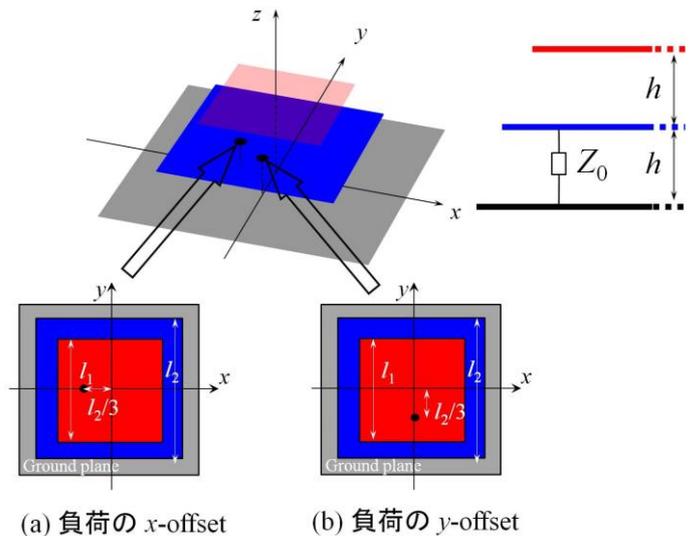


図3 単位セルにおける負荷 Z_0 の装荷位置

$$\Gamma(0, 0, z_{plane-wave}) = \frac{E_s}{E_i} = \left| \frac{E_s}{E_i} \right| e^{j\psi} \quad (2)$$

で定義される反射位相 ψ について、パッチアンテナの一辺の長さ l_2 を変化させて反射位相の変化量を解析する。

3.2 反射位相特性

開放時 ($Z_0 = \infty$) 及び負荷 $Z_0 = 50 \Omega$ 装荷時の、 l_2 を変化したときの反射係数の位相特性を図4に示す。 l_2 が 6 mm から 14 mm まで変化させた場合、いずれも 450 deg. 近い位相変化量が得られた。これらの結果から、負荷抵抗の付与による位相変化量には大きな影響を与えないものの、位相の変化率は異なり、負荷を与えない場合の設計値からの寸法の変更が必要となることが明らかとなった。

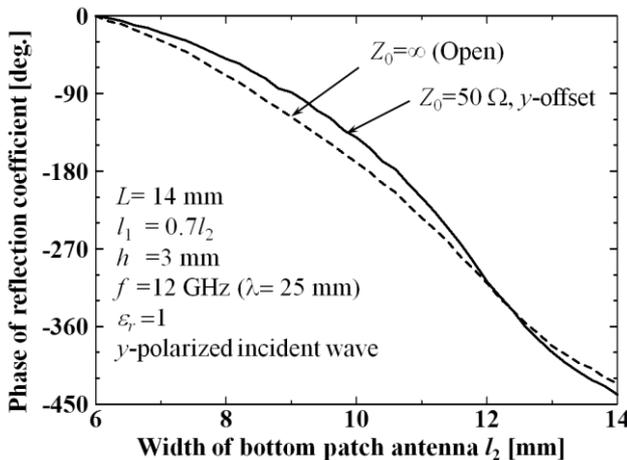


図4 パッチアンテナの寸法に対する反射係数 Γ の位相特性（負荷装荷時，開放時の比較）

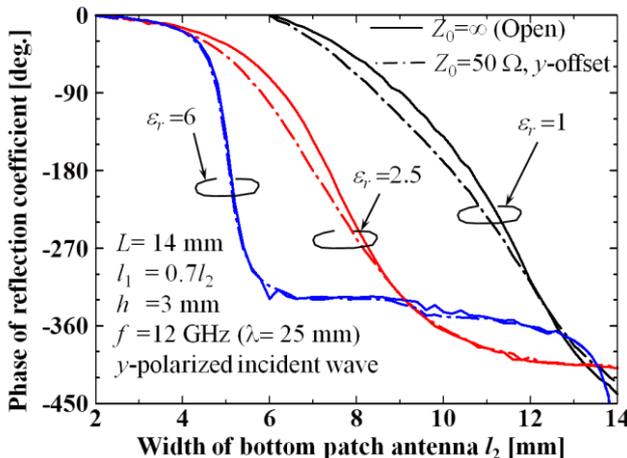


図5 パッチアンテナの寸法に対する反射係数 Γ の位相特性（基板の比誘電率を変化）

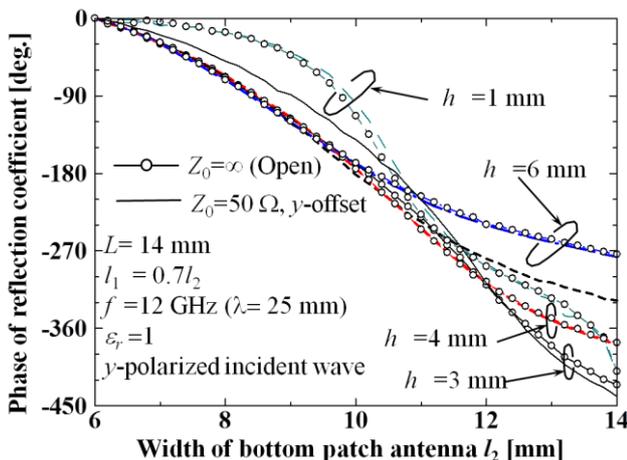


図6 パッチアンテナの寸法に対する反射係数 Γ の位相特性（基板の厚さを変化）

一般に，基板の誘電率を大きくして波長短縮効果を得ることで，リフレクタレーの小型化を図ることが可能である．そこで，各層の基板の誘電率を変化した場合について解析した．基板の比誘電率が $\epsilon_r=1, 2.5, 6$ のときの位相変化量特性を図5に示す．比誘電率が高くなるほど構造変化に対する位相変化率が大きくなる結果が得られた．また，比誘電率が高くなるほど位相変化量が減少し，比誘電率が6の場合は位相変化量が 360 deg. を下回った．負荷抵抗の有無に対する位相変化量特性は，比誘電率が高くなるほど一致する傾向にあった．

次に，比誘電率 $\epsilon_r=1$ として高さ h を変更した場合における位相変化量の解析を行った．結果を図6に示す．位相変化量は負荷抵抗の有無によって変化しないことが確認された．

以上の結果から，2層正方形パッチアンテナを用いたリフレクタレーにおいて，各アレー素子を給電した場合の内部負荷抵抗の装荷による位相変化量特性は，給電構造を持たせない開放時($Z_0=\infty$)の場合との変化が僅かであり，給電部の装荷に対する影響は少ないことが明らかとなった．以上の結果を以下にまとめる．

- 比誘電率 ϵ_r が低いほど位相変化が大きい．
- 高さ h には最適値がある．
- 負荷 50Ω の有無に対する位相変化特性は小さい．

4. 1次元リフレクタレーの設計

4.1 散乱特性

3節で求めた位相変化量特性を用いて，6素子1次元リフレクタレーを設計した．1次元アレーの場合，(1)式は次式のように簡略化される．

$$\Delta \Psi = k_0 L \sin \theta_s \quad (3)$$

3節で明らかとなったように，比誘電率 $\epsilon_r=1$ ， $h=3 \text{ mm}$ の場合に最も大きな位相変化特性が得られたので，図4に示した位相変化特性の負荷抵抗 50Ω の場合の特性を利用し，1次元6素子2層正方形パッチリフレクタレーの設計を行った．ここで1次元アレーは x 軸方向とする．入射平面波の偏波が E_y 成分で入射角度が $\theta=0$ のときの散乱ビーム方向が $\theta_s=30 \text{ deg.}$ となるように，図4を用いて設計した．このとき(3)式から $\Psi=100.84 \text{ deg.}$ が得られ，6素子のすべて l_2 が得られる．なお，ここでは示していないが入射平面波の偏波が E_x 成分の場合についても，位相変化特性も求めて散乱特性を解析した．

リフレクタレーにおける散乱特性の評価は次式で与えられるレーダ散乱断面積(Radar Cross Section, RCS)

$$RCS = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right] \quad (2)$$

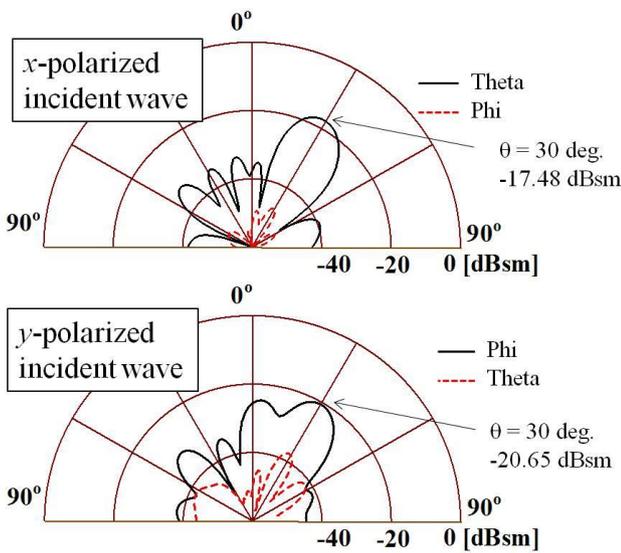


図 7 負荷装荷 1 次元リフレクタアレーの散乱指向性 (y-offset モデル)

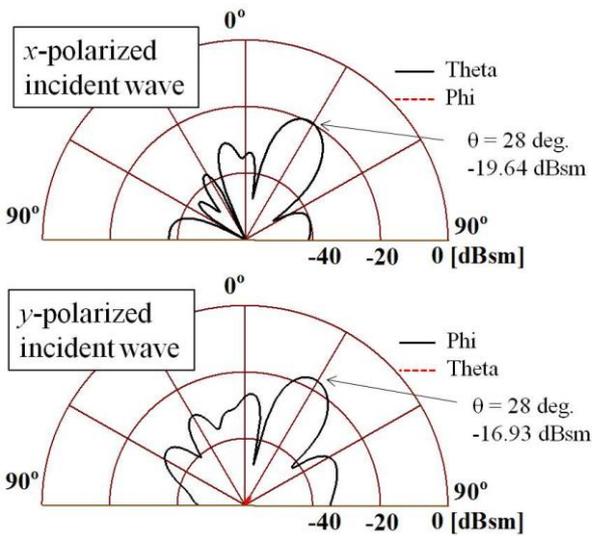
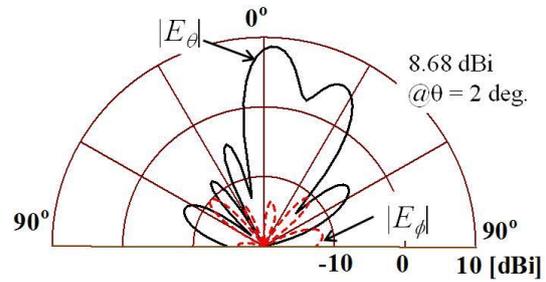
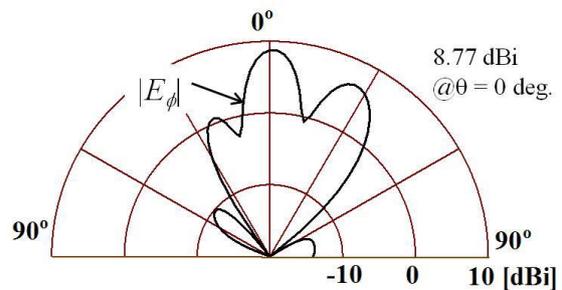


図 8 負荷装荷 1 次元リフレクタアレーの散乱指向性 (x-offset モデル)

を用いる。ここで、 R はリフレクタアレー面の中心から観測点までの距離、 E_s は散乱電界、 E_i は入射電界を表す。このとき入射平面波は、 E_y 偏波の場合は $(\theta, \phi) = (0 \text{ deg.}, 90 \text{ deg.})$ 、 E_x 偏波の場合は $(\theta, \phi) = (0, 0)$ となる。図 7,8 より $\theta = 28 \text{ deg.}$ となり、本設計が概ね所望方向に散乱ビームが得られることを確認した。ただし、 E_y 偏波で入射した場合については概ね所望方向を向いているものの正面方向にも強い散乱ビームが発生していることがわかった。これは素子間距離が近かったための相互結合の影響及び鏡面反射が起こったためと考えられる。



(a) y-offset model



(b) x-offset model

図 9 負荷装荷 1 次元リフレクタアレーの放射指向性 (y-offset モデルと x-offset モデル)

4.2 放射特性

同一の設計におけるリフレクタアレーの放射機能について調べるため、各素子の給電部にそれぞれ 1 W の同出力、同位相で給電を行いその放射指向性の確認をした。

負荷装荷 1 次元リフレクタアレーの放射指向性を図 9 に示す。y-offset モデルと x-offset モデル共に正面方向に強く放射した。また、素子形状による位相変化の影響により、散乱方向にもビームが発生した。フェーズドアレー動作を考えた場合、y-offset 給電が重要となるが、散乱方向に発生したサイドローブ、つまりリフレクタアレー散乱ビーム方向への放射波の低減が課題である。

5. むすび

本報告では、リフレクタアレーに放射機能を付与することを目的として、給電構造を持たせた 2 層正方形パッチアンテナによる 1 次元リフレクタアレーの基礎特性を得た。その結果、給電部を装荷することによる設計への影響は小さいことが明らかとなった。また、負荷装荷時における散乱特性を解析した結果、十分なリフレクタアレー動作を確認した。さらに、同相給電時における放射特性を解析した結果、散乱ビーム方向へのサイドローブレベル約 -5 dB が観測されたものの、明確な主ビームが観測された。今後、位相制御給電時における特性の解析及び給電

時のアクティブ反射係数の解析が重要である。

参考文献

- [1]. Payam Nayeri, et.al., "3D Printed Dielectric Reflectarrays: Low-Cost High-Gain Antennas at Sub-MillimeterWaves", IEEE Trans, Antennas and Propag., vol. 62, no.4, April 2014.
- [2]. Payam Nayeri, et.al., "Bifocal Design and Aperture Phase Optimizations of Reflectarray Antennas for Wide-Angle Beam Scanning Performance", IEEE Trans, Antennas and Propag., vol. 61, no.9, Sep. 2013.
- [3]. Long Li et.al., "Novel Broadband Planer Reflect Array With Parasitic Dipoles for Wireless Communication Applications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, 2009.
- [4]. Jose A Encinar, "Design Of Two-layer Printed Reflectarrays Using Patches Of Variable Size", IEEE Transactions On Antennas And Propagation Vol.49.No.10. 10.2009.