

散乱共用フェーズドアレーアンテナの基礎検討

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. リフレクトアレーのような周期的構造を有する不均一素子を用いてフェーズドアレーの動作が確認できれば, リフレクトアレーの機能を有したフェーズドアレーといった応用が可能になる. 本報告ではリフレクトアレー用の不均一素子アレーの設計を用いて, フェーズドアレーとしての動作を確認し, 電圧の振幅分布をつけることで特性の改善を行った.

キーワード: リフレクトアレー, パッチアンテナ, 電界振幅分布, フェーズドアレー, ビーム走査

1. まえがき

リフレクトアレーは, 異なる大きさの素子を配列することで入射波の位相を回転させることで所望の散乱方向に平面波をつくることのできる. 高周波帯域においては反射や回折による伝搬損が大きくなることから, ビルの屋上に設置された広告板等の平面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][2]. また, 一般的な平面型リフレクトアレーは狭帯域で知られているため, 多層化によるリフレクトアレーの広帯域化をはじめとして, 広角ビーム走査に関する研究も行われている[3][4]. しかし先行のリフレクトアレー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, 既存のフェーズドアレーのアンテナ構造とリフレクトアレーの散乱波制御の機能を共有し, 遠方からの平面波に対してレーダー散乱断面積(RCS)を抑圧することが可能となる等といった有効な応用分野が開かれるものと考えられる.

アレーアンテナの所望される性能は目的によって異なり, 例えば受信用であれば高利得, レーダー用であれば低サイドローブが望まれる.

通常, フェーズドアレーアンテナに用いられる素子は同じ大きさ形状を持つ均一素子である. しかしリフレクトアレーの機能を共有したフェーズドアレーアンテナを達成するためにはそれぞれの素子の大きさが異なる不均一素子を用いることになる. そのためそれぞれの素子が持つ電界を調べ合成することでアクティブビームパターンがわかる [5][6].

本報告では第2章にフェーズドアレーアンテナの基本的な原理を述べる. 第3章では解析モデルにおけるアレー素子パターンについて調査した結果, それによる電界の合成結果について述べ, 第4章では電界振幅制御することによるサイドローブの低減が可能であることについて述べる.

2. アレーアンテナの基本原則

2.1 等間隔1次元アレー

図1に示すように直線配列したアレーアンテナにおいて, 発生する電界は各素子からの放射電界の合成となり(1)式にて表される.

$$E_t(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta, \phi) \quad (1)$$

このとき n は素子番号を表す. また, $g_n(\theta, \phi)$ を指向性関数, A_n , a_n をそれぞれの素子が持つ振幅と位相に対する励振ウェイトとすると, 素子の指向性が等しい場合 $g_n = g$ になり, 合成電界は(2)式に表される.

$$E_t(\theta, \phi) = \frac{e^{jk_0 r}}{r} \sum_{n=1}^N g(\theta, \phi) A_n e^{ja_n} e^{jk(n-1)L} \quad (2)$$

r は観測地点の距離, L を素子間距離とする. したがってこの場合のアレーファクタは(3)式で表され, このアレーファクタがアレーアンテナの指向性を決定する.

$$f(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n e^{ja_n} e^{jk(n-1)L} \quad (3)$$

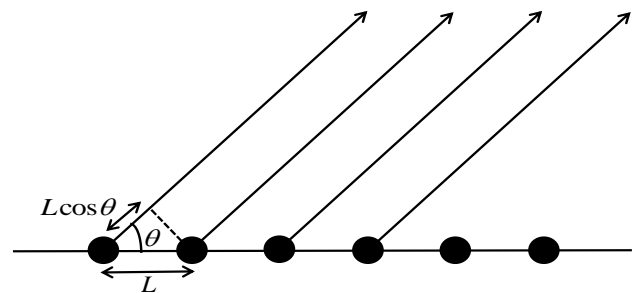


図1 直線アレーアンテナの概念図

よって合成電界 E_t の大きさ, 指向性は(2)式における A_n を調整することによってビームを制御する.

2.2 設計モデル

リフレクタレーの設計を利用したフェーズドアレーアンテナの設計は図2に示す[3]. リフレクタレーは遠方からの平面入波に対して, 所望の散乱方向にレーダー反射断面積(Rader Cross Section, RCS)が大きくならなければならない. そのため各素子が電磁波の伝搬距離によって生じる位相差を補正するために素子の大きさが異なる. 図2のモデルはリフレクタレーに, $-y$ 軸方向に給電構造と負荷を装荷したものである. 設計周波数を 12 GHz とする. x, y 方向の素子間隔はいずれも L の正方形周期構造とする. 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 とした. 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边をそれぞれ 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.

実際の解析モデルは図2の単位セルを, パッチアンテナの大きさをそれぞれ変更して x 軸に 6 素子並べたものである.

このとき, 解析面は xz 面で放射パターンを確認した. 給電時の電圧の位相は同相である. また黒の曲線, 赤の破線, 青の点破線はそれぞれ走査方向を示している. 図3から動作利得には $\theta = 0$ deg. の他に散乱設計方向である $+30$ deg. にも強い放射が確認できる. $+30$ deg. 方向における強い放射は各素子の大きさが異なるために, 主ビーム方向以外にも強いビームが放射された. アレーファクタを調整することによってサイドローブを低減することが可能である[7][8].

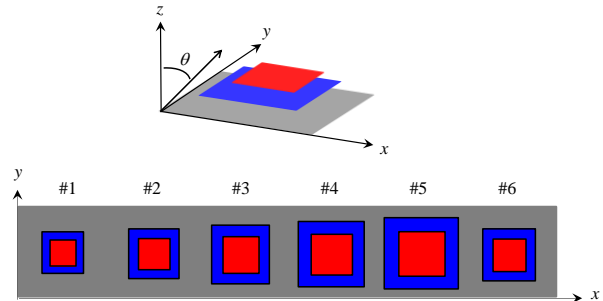


図3 6素子モデル

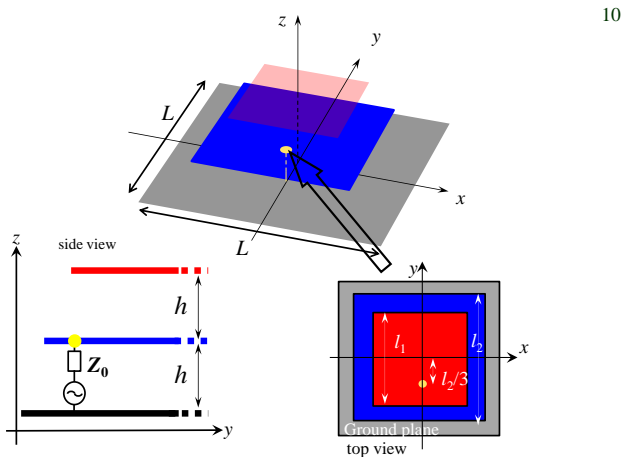


図2 単位セル図

$\theta = 30$ deg. に設定した所望散乱方向と, 先行研究で得られた反射係数の位相カーブから, 素子の大きさは設計された. 各素子の大きさを表1に示す.

No.	#1	#2	#3	#4	#5	#6
l_2 [mm]	7.0	9.61	11.16	12.15	13.61	10.37

表1 各素子の設計

3. 6素子アレーの放射特性

3.1 均一給電時の放射特性

不均一な大きさを持つ6素子アレーに均一的な電圧, 電力で給電したときの放射特性を図3に示す.

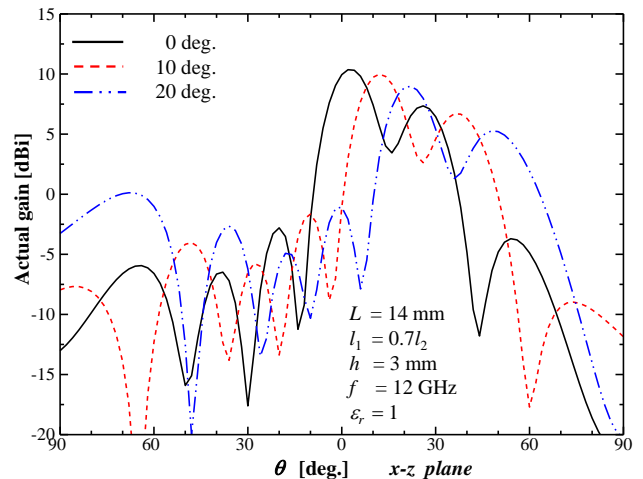


図4 同振幅同相給電時の放射パターン

アレーファクターを計算するためには, まず素子ごとの電界を調べる必要がある. このとき, 素子間相互結合が影響が考慮される. 素子間相互結合に影響を調べるためのSパラメータを表2に示す[9].

S_{ij} [dB]	(j)1	2	3	4	5	6
(i)1	-2.93	-25.34	-37.05	-45.26	-54.68	-66.97
2	-25.34	-5.41	-30.00	-36.41	-45.67	-58.19
3	-37.05	-30.00	-6.77	-25.31	-34.43	-46.11
4	-45.26	-36.41	-25.31	-5.92	-24.07	-34.97
5	-54.68	-45.67	-34.43	-24.07	-4.05	-25.72
6	-66.97	-58.19	-46.11	-34.97	-25.72	-6.02

表2 Sパラメータ

表 2 より S パラメータの素子間相互結合量($i \neq j$)は -20 dB 以下と低いため、H 面アレーの素子間相互結合量は少なく、その影響を無視することができる。また各素子から放射された電界強度を調べたところ、素子#6 においては $\theta = 30\text{deg.}$ において放射電界強度が大きいことが確認された。そのため、素子#6 の電圧の振幅分布を小さくすることでサイドローブが低減可能か確かめた。

4. 電圧振幅分布によるアクティブビームパターン

図 4 より振幅分布が各素子で一様の場合、メインローブの他に強いサイドローブが確認できる。このサイドローブを低減するために電圧を表 3 のように振幅分布を与えてアクティブビームパターンの変化を調べた。

pattern	No.	#1	#2	#3	#4	#5	#6
1	V	1	1	1	1	1	1
2	V	0.1	0.5	1	1	0.5	0.1
3	V	1	1	1	0.6	0.2	0.1

表 3 電圧振幅分布

パターン 2 は二項係数分布であり、一般的にサイドローブが低減する分布である。パターン 3 は動作利得とサイドローブレベル(Side Lobe Level, SLL)の 2 点に着目して、様々なパターンを調査した結果の最適パターンである。このパターン 2 と 3 の結果を図 5 に示す。

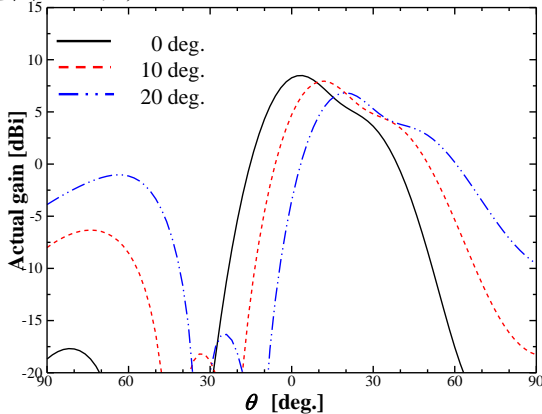


図 5(a) パターン 2 の動作利得

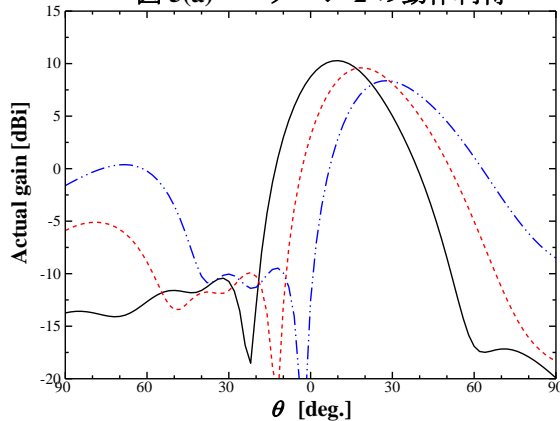


図 5(b) パターン 3 の動作利得

パターン 2 の二項係数分布での給電を行った場合、 $\theta +30\text{ deg.}$ 方向において動作利得は最大放射方向に比べて -3dBi 低減した。しかしながら動作利得も -2dBi 低下した。これは素子#1 や#2 の振幅分布を小さくしたことが動作利得を低下させた原因と考えられる。

パターン 3 において $\theta +30\text{ deg.}$ 方向において動作利得は最大放射方向に比べて -10dBi 低下した。また動作利得も均一分布のパターン 1 に対してほぼ同じ 10dBi 得ることが確認された。なおパターン 3 においてメインローブの最大放射方向は +10deg. ずれた。

次に動作利得の周波数特性において結果を図 6 に示して評価する。

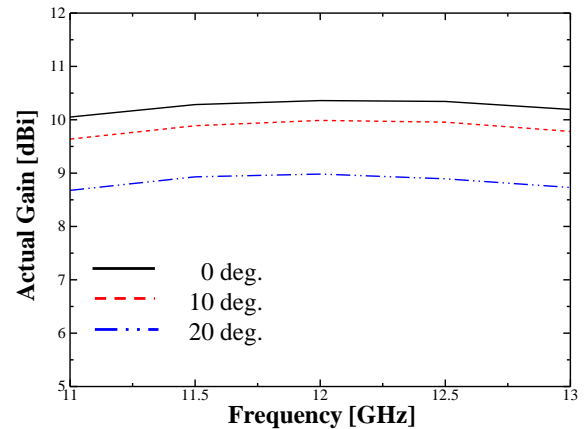


図 6(a) パターン 1 の動作利得周波数特性

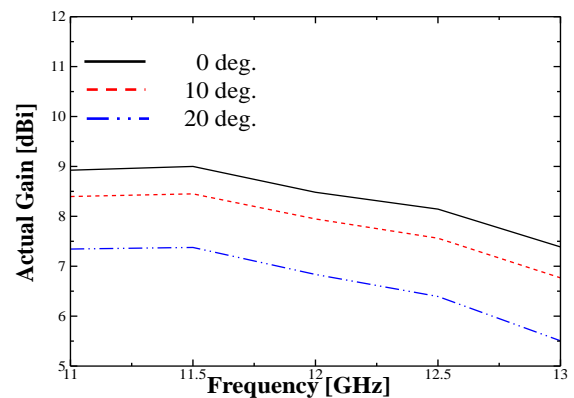


図 6(b) パターン 2 の動作利得周波数特性

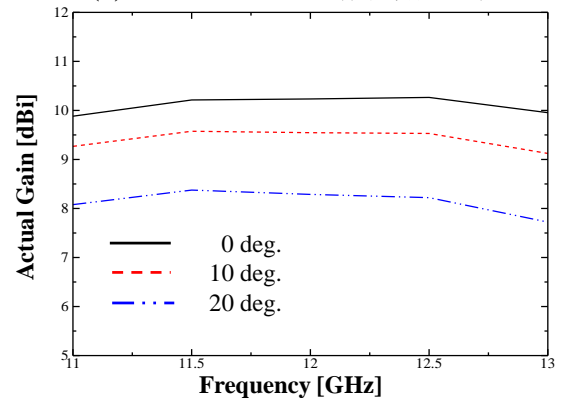


図 6(c) パターン 3 の動作利得周波数特性

パターン1より、周波数に対する動作利得の値に変化がほとんどないことから、本設計における不均一素子のフェーズドアレーは11~13 GHzの広域特性をもつことが確認できた。パターン2の二項係数分布には周波数が高くなるにつれて動作利得が低下していくことから広域特性が失われている。パターン3では0 deg.の走査角において10dBiの動作利得を確保し、さらに広域特性を保持していることが確認できた。

以上の結果より、電圧の振幅分布を変化させることによって、不均一素子で構成されたリフレクタレーの設計でも、サイドローブを抑えたビームで放射することが可能なフェーズドアレー動作を行えることを確認した。

5. むすび

本報告では、リフレクタ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次元リフレクタレーの設計を用いて、給電を行いビーム走査をした。同振幅同相の電圧分布における給電において発生した強いサイドローブを、電圧振幅に分布をつけることによって、動作利得を落とすことなくサイドローブを低減させることができた。

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]. Q. Chen, J-F Li, Y. Kurihara, and K. Sawaya, "Measurement of Reflectarray for Improving MIMO Channel Capacity of Outdoor NLOS Radio Channel," 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI National Radio Science Meeting (AP-S 2013), Orlando, Florida, USA, Jul. 7-13, 2013.
- [3]. 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.
- [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.
- [5]. Yussi Perdana Saputra et.al, "Side Lobe Suppression for X-Band Array Antenna Using Dolph-Chebyshev Power Distribution" The 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2016)
- [6]. J-François D. Essiben et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com ISSN: 2248-9622, Vol. 5, Issue 8, (Part - 5) August 2015, pp.187-195.
- [7]. Dennis Vollbracht et.al, "X-Band Phase- And Amplitude Distribution Network for Phased Array Antenna Measurements" Antennas and Propagation(EuCAP),2016 10th European Conference on
- [8]. Jean-François D et.al, "Design of Non-Uniform Linear Antenna Arrays Using DolphChebyshev and Binomial Methods" Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com ISSN: 2248-9622, Vol. 5, Issue 8, (Part - 5) August 2015, pp.187-195
- [9]. Jamal Nasir et.al, "A Four-Element Linear Dielectric Resonator