

八木・宇田アンテナを用いた後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナの実験的検討

森田 耕平, 今野 佳祐, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)

概要: 従来のフェーズドアレーアンテナは多数の均一素子で構成されているため、後方散乱断面積 (Backscattering cross section, BSCS) が大きいという問題点がある。BSCSを低減する有効な手法として、リフレクタレーの技術を適用する手法が提案されているが実験的な検討は行われていない。本報告では、八木・宇田アンテナを用いて BSCS の小さいフェーズドアレーアンテナを設計・作製し、レーダー散乱断面積 (Bistatic radar cross section, BRCS) パターンとアンテナ利得パターンを実際に測定し、作製したアンテナが後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナとして機能することを実験的に示す。

キーワード: 八木・宇田アンテナ, フェーズドアレーアンテナ, リフレクタレー

1. まえがき

現在、船舶や航空機、気象用など様々な場所や用途でレーダーが用いられている。このレーダーに用いられる代表的なアンテナとして、フェーズドアレーアンテナが挙げられる。フェーズドアレーアンテナは、あるアンテナを複数並べ、各素子に位相差をつけて給電することでビーム走査を可能とするアンテナである。一般的なフェーズドアレーアンテナは、数百～数千もの同一な素子を周期的に配置した構造となっているため、後方への散乱が非常に大きくなってしまいうという問題点がある。過去に、この問題点を解決するための研究は多くなされている。例えば、抵抗性フィルムを用いたマルチレイヤの吸収シートにより入射波を吸収することで後方散乱を低減することが可能であるが、自らの放射波を吸収してしまうことや、大電力を扱うとシートが燃えるという欠点がある [1]。また、FSS(Frequency Selective Surface)を用いた帯域通過レドームは、フェーズドアレーアンテナの動作周波数帯以外の周波数において後方散乱を低減可能であるが、動作周波数帯での後方散乱は低減できない [2]。これらの手法とは異なり、フェーズドアレーアンテナとしての動作を妨げることなく、動作帯域内での後方散乱を低減する手法も提案されている [3]。この手法は、リフレクタレーの技術を八木・宇田アレーアンテナに応用し、散乱波のメインビームのある方向にずらすことで後方散乱を低減することができる。しかし、この手法に関しては数値シミュレーションしか行われておらず、実験的検討が行われていない。

本報告では、八木・宇田アンテナを用いた後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナを設計・試作し、BRCS パターンとアンテナ利得パターンを電波暗室で実際に測定する。試作したアンテナは 8 素子の非同期的な八木・宇田アンテナで構成され、各素子の導波器長が異なる。BRCS パターンとアンテナ利得パターンの測定結果を数値シミュレーションの結果と比較し、試作したアンテナが散乱体と放射体の両方として機能することを実験的に明らかにする。

2. 後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナの設計法

ここでは、後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナの設計法としてリフレクタレーの設計法を応用する [4][5]。リフレクタレーは、周期的に並べられたアレー素子の各構造を変化させることで、ビームを制御する技術である。図 1 のように一次放射器から電磁波が入射されるとすると、各アレー素子は入射した電磁波を散乱させる。このとき、一次放射器と各アレー素子間の距離及び各アレー素子の位置が異なることから、一次放射器から各素子に入射する電磁界の振幅や位相は異なる。よって、各アレー素子の散乱電界の振幅や位相も異なる。ここで、 θ, ϕ 方向における N 素子からなるアレーの散乱電界の和 $E_s(\theta, \phi)$ は以下のようになる。

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

ここで、 $E_n(\theta, \phi)$ は θ, ϕ 方向における n 番目のアレー素子の散乱電界である。式(1)より各素子の散乱電界が所望方向において同相になれば、入射波を所望の方向に散乱させることができる。しかし、一次放射器と各アレー素子間の経路差によって、以下の式で表されるような位相差 φ が生じてしまう。

$$\varphi = k_0(n-1)d \sin\phi \quad (2)$$

ここで、 k_0 は自由空間における波数、 d はアレー素子間隔である。(2)式から得られたアレー素子間の位相差を打ち消すような散乱電界の位相を持つサイズの素子を並べることで、所望方向に強い散乱電界を得ることができる。本報告では、後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナを実現するために、後方散乱以外の方向に強い散乱電界が向くように素子サイズを選択する。八木・宇田アンテナを用いた後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナの設計法は以下のようになる。

1. 散乱電界の位相と八木・宇田アンテナの導波器長の関係を求める。
2. まず、基準素子を決める。求めた関係から、各素子の散乱電界の位相が所望方向で同相となるような導波器長を選択し、選択した導波器長をもつ八木・宇田アンテナ素子を等間隔で並べ、フェーズドアレーアンテナを構築する。

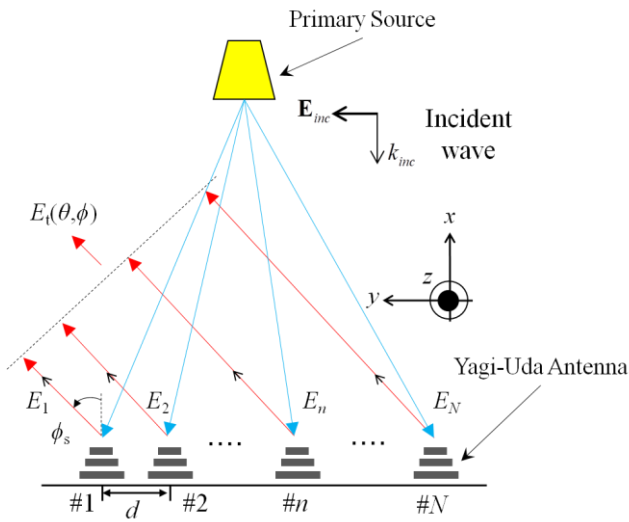


図 1. リフレクトアレーの原理

3. 測定結果

3.1 提案アンテナモデル

設計周波数を 4 GHz ($\lambda=75$ mm)とする. 今回提案する八木・宇田アンテナの構造を図 2 に示す. 今回, バランを必要としない作製の容易さを考慮して, モノポール型の八木・宇田アンテナを用いた. 反射器の長さは $l_1=23$ mm (0.31λ), 放射器のダイポールアンテナの長さは $l_2=19$ mm (0.25λ)とし, 導波器の長さは $l_3=5$ mm から 19 mm まで変化させる.このとき, 各素子の半径は $r=1$ mm, 反射器と放射器間の距離は $d_1=10$ mm (0.13λ), 放射器と導波器間の距離は $d_2=5$ mm (0.07λ)である. また, グラウンド板の幅は $W=38$ mm(0.51λ), グラウンド板の深さは $D=45$ mm(0.6λ)である.

3.2 八木・宇田アンテナを用いた後方散乱の小さい 8 素子フェーズドアレーアンテナの設計と試作

フェーズドアレーアンテナを構成する各八木・宇田アンテナ素子の導波器長を決定するために, 八木・宇田アンテナ 1 素子の散乱電界の位相特性の解析を行った. このとき, 八木・宇田アンテナの導波器の長さを $l_3=5$ mm から 19mm まで 1mm ずつ変化させ, 放射器は 50Ω の抵抗で終端する. 平面波の入射方向は $(\theta_i, \phi_i) = (90^\circ, 0)$, 所望の散乱波の方向は $(\theta_s, \phi_s) = (0, 20^\circ)$ である.

散乱電界の位相の解析結果と八木・宇田アンテナの導波器長の関係を図 3 に示す. 図 3 より, 導波器長を変化させることで約 254° の位相変化を得られることがわかる. この関係より, 所望の散乱方向が $(\theta_s, \phi_s) = (0, 20^\circ)$ の八木・宇田アンテナを用いた後方散乱の小さい 8 素子フェーズドアレーアンテナを設計・試作する.

図 3 より, 経路差に伴う位相差を打ち消すように適切な八木・宇田アンテナの導波器長を決定し, 八木・宇田アンテナを用いて 8 素子のフェーズドアレーアンテナを設計, 試作した. 試作したフェーズドアレーアンテナと各八木・宇田アンテナ素子の導波器長をそれぞれ図 4, 表 1 に示す. このとき素子間距離は $d_y=38$ mm (0.51λ), グラウンド板の幅は $W=304$ mm, グラウンド板の深さは $D=45$ mm(0.6λ)である.

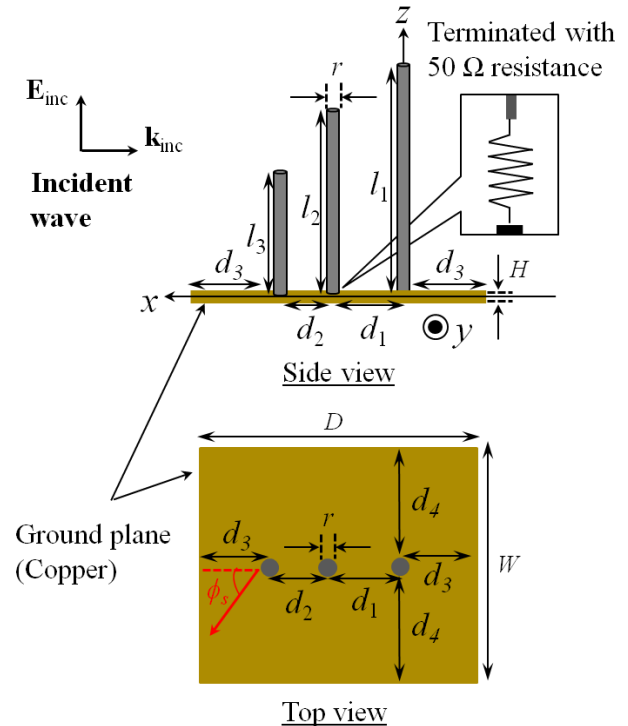


図 2. 八木・宇田アンテナ素子

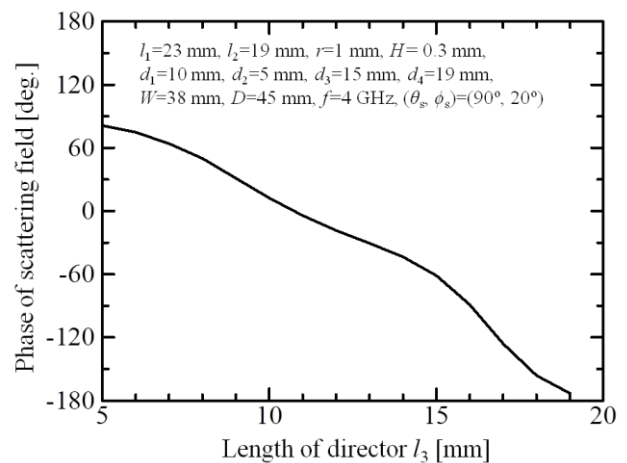


図 3. 八木・宇田アンテナの導波器長に対する散乱電界の位相特性

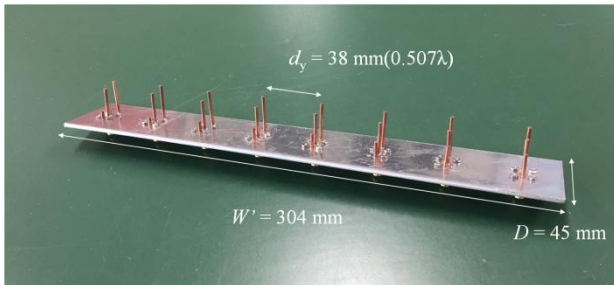


図4. 作成したフェーズドアレーアンテナ

表1. 八木・宇田アンテナ各素子の導波器長

素子番号	導波器長[mm]
#1	5
#2	10
#3	14
#4	16
#5	19
#6	5
#7	7
#8	10

3.3 試作したフェーズドアレーアンテナのBRCSパターンの測定

電波暗室において、試作したフェーズドアレーアンテナのBRCSパターンを測定した。測定環境を図5に示す。送受信アンテナにはホーンアンテナを用い、試作したフェーズドアレーアンテナと送受信アンテナとの距離はそれぞれ $d_t=0.7$ m, $d_r=2.4$ mである。また、各素子は 50Ω の抵抗で終端しているが、これらの抵抗の散乱の影響を抑えるために抵抗の前に電波吸収体を設置した。次に、BRCSの定義を以下に示す。

$$\text{BRCS} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \right] \quad (4)$$

ここで、 R はフェーズドアレーアンテナから観測点までの距離、 \mathbf{E}_s は散乱電界強度、 \mathbf{E}_i は入射電界強度である。

図6にBRCSパターンの測定結果を示す。このとき、入射波の方向は $(\theta_i, \phi_i) = (90^\circ, 0)$ 、所望の散乱波の方向は $(\theta_s, \phi_s) = (0, 20^\circ)$ である。また、比較対象として反射器の長さが $l_1=23$ mm (0.31λ)、放射器の長さが $l_2=19$ mm (0.25λ)、導波器の長さが $l_3=15$ mm (0.2λ)の同一素子を用いた八木・宇田アンテナアレーのBRCSパターンを解析した。このとき、導波器の長さは八木・宇田アンテナ素子のS11が最小となる長さに決定した。

図6より、概ね所望方向でBRCSが最大となっていることがわかる。また、BRCSは解析結果とよく一致し、同一素子を用いた八木・宇田アンテナアレーと比べて

約12 dB減少した。所望方向でのBRCSは解析結果よりもやや小さい値となってしまったが、これはロードの影響を取り除くために使用した電波吸収体の影響が大きいと考えられる。また今回、フェーズドアレーアンテナと送受信アンテナとの距離が近く、遠方界の領域に達していないため、近傍界の影響により、解析結果とのずれが出たと考えられる。測定環境を改善することができればより正確な結果を得ることができると考えられる。

3.4 試作したフェーズドアレーアンテナのアンテナ利得パターンの測定

電波暗室において、試作したフェーズドアレーアンテナのアンテナ利得パターンの測定も同様に行った。測定はBRCSパターンの測定環境から送信用のホーンアンテナとロードの前に置いた電波吸収体を取り除いた環境で行った。各素子のアレーエレメントパターンを測定、合成し、アンテナ利得を計算した。アンテナ利得のスキャンパターンの結果を図7に示す。図7より、測定結果は解析結果とよく一致した。また、各所望方向にしっかりとメインビームが得られており、ビームスキャンが可能であることが分かる。解析結果に比べてやや利得の低下がみられたが、これは、各素子のアレーエレメントパターンを測定するたびに位相のずれが生じ、正確に合成できていないためだと考えられる。

4. むすび

本報告では、8素子の八木・宇田アンテナを用いた後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナを設計、試作し、実験的検討を行った。まず、八木・宇田アンテナの散乱電界の位相と導波器長の関係を求め、8素子フェーズドアレーアンテナを設計、作製した。電波暗室において、試作したフェーズドアレーアンテナのBRCSパターンを測定し、解析結果とよく一致した。同一素子から成るフェーズドアレーアンテナよりも約12 dB低い後方散乱を得ることができた。また、アンテナ利得パターンの解析も行い、解析結果とよく一致し、ビームスキャンが可能であることを示した。これらのことから、試作したアンテナは散乱体と放射体の両方で機能することが確認でき、後方散乱の小さいフェーズドアレーとして機能することを実験的に示すことができた。

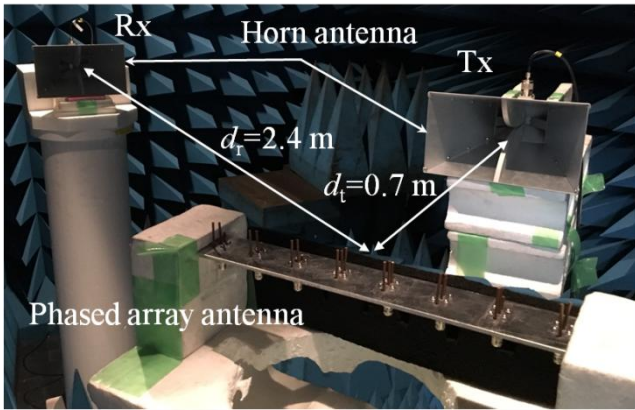


図 5. 測定環境

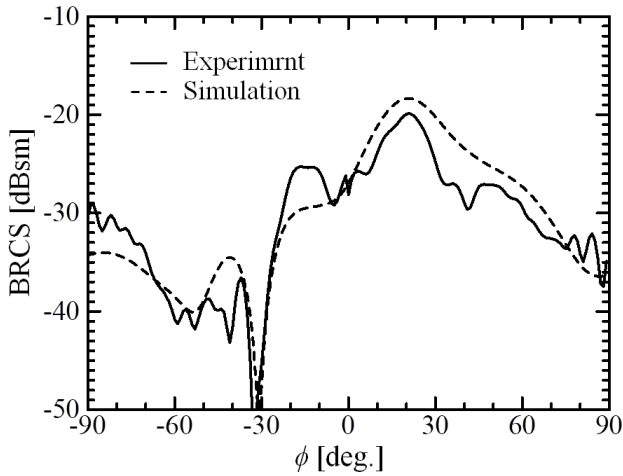


図 6. BRCS パターン

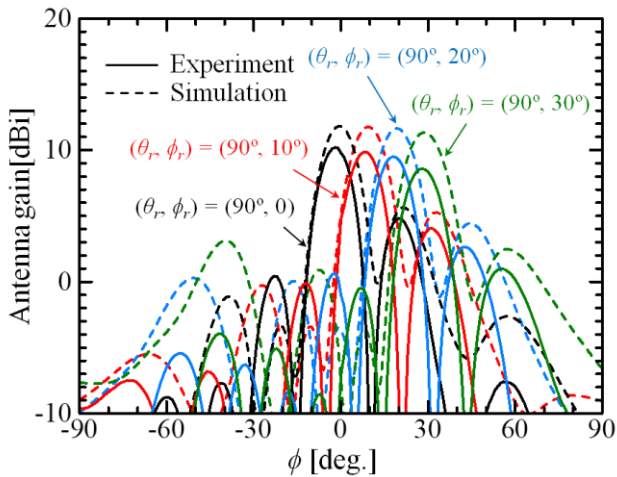


図 7. アンテナ利得パターン

参考文献

- [1] O. Hashimoto, T. Abe, R. Satake, et al.: “Design and Manufacturing of Resistive-Sheet Type Wave Absorber at 60 GHz Frequency Band,” IEICE Trans. Commun. vol. E78-B, (2), pp. 246-252, 1995.
- [2] B. Q. Lin, F. Li, Q. R. Zheng, and Y. S. Zen, “Design and Simulation of a Miniature Thick-Screen Frequency Selective Surface Radome,” IEEE Wireless Propag. Lett., vol. 8, pp. 1065-1068, 15 September 2009.
- [3] K. Konno, Q. Yuan, and Q. Chen, “Ninja Array Antenna – Novel Approach for Low Backscattering Phased Array Antenna,” IET Microw. Antennas Propag., vol. 12, no3., pp. 346-353, 2018 (In press).
- [4] K. Yokokawa, K. Konno and Q. Chen, “Scattering Performance of Log-periodic Dipole Array,” IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 740-743, 2017.
- [5] I. Ito, K. Konno, H. Sato, and Q. Chen, “Wideband Scattering Performance of Reflectarray Using Log-periodic Dipole Array,” IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 1305-1308, 2017.