

対数周期ダイポールアレー素子を用いたリフレクタアレーの広帯域化

横川 佳, 今野 佳祐, 陳 強 (東北大学大学院工学研究科)

概要: マイクロストリップ素子から成るリフレクタアレーは、狭帯域特性を持つことが知られている。近年、広帯域なリフレクタアレーに関する研究が行われているが、アレー素子として3次元的な素子を使用したリフレクタアレーの広帯域化は検討されていない。本報告では、対数周期ダイポールアレー素子を用いたリフレクタアレーを設計し、その帯域を数値的に明らかにしたので報告する。

キーワード: リフレクタアレー, 対数周期ダイポールアレー

1. まえがき

リフレクタアレーとは、複数のアレー素子から構成され、入射波を設計した所望の方向に強く散乱させることができる散乱体である。これまで、リフレクタアレーを構成するアレー素子は、アレー化しやすく平面でかつ小さいことからマイクロストリップ素子が用いられてきた。マイクロストリップ素子は狭帯域であるので、マイクロストリップ素子から成るリフレクタアレーも狭帯域となる [1]-[2]。近年、新しい構造や素子を用いた広帯域なマイクロストリップ素子が数多く提案され、リフレクタアレーの広帯域化に応用されている [3]-[5]。しかし、数多く提案されているにもかかわらず、マイクロストリップ素子では帯域が約 15%~25% が限度である。一方、対数周期ダイポール素子は大きさが無限大であれば、無限の帯域を持つような超広帯域素子として知られている。更に、マイクロストリップ素子のような平面型の素子をアレー素子として用いた報告は数多くあるが、対数周期ダイポール素子のような3次元的にアレー素子を用いる例はまだ無い。

本報告では、リフレクタアレーのアレー素子として対数周期ダイポールアレーを用いることで広帯域化を図る。設計したリフレクタアレーの帯域・利得を数値的に明らかにする。

2. リフレクタアレーの原理及び設計法

2.1 リフレクタアレーの原理

ここではリフレクタアレーの原理及び、対数周期ダイポールアレーの原理について説明する。図1に示すように、各リフレクタアレー素子に一時放射器から電磁波が入射したとする。このとき、各アレー素子は一次放射器からの入射波を散乱する。各々のアレー素子と一次放射器間の距離が異なる事、リフレクタアレー素子の位置が異なる事から、散乱電界の位相と振幅は全てのアレー素子毎に異なる。式(1)に θ, ϕ 方向における M 個のアレー素子からの散乱電界の和 $\mathbf{E}_t(\theta, \phi)$ は以下ようになる。

$$\mathbf{E}_t(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \mathbf{E}_m(\theta, \phi) \quad (1)$$

$\mathbf{E}_m(\theta, \phi)$ は θ, ϕ 方向における m 番目のアレー素子の散乱電界である。式(1)から全素子の散乱電界が同相となる方向で、散乱電界の大きさが最大になる事がわかる。しかしながら、リフレクタアレー素子の位置に応じた経路差により、各素子からの散乱電界には式(2)で表わされる位相差 φ が生じる。

$$\varphi = k_0 m d \sin \theta \quad (2)$$

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。従って、所望の方向で各素子の散乱電界を同相にし、強い散乱電界を得るためには、素子の大きさを変えて位相差 φ を補償する必要がある。

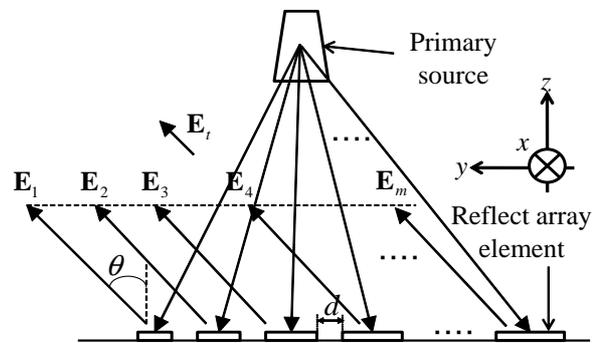


図1: リフレクタアレーの動作原理。

2.2 対数周期ダイポールアレー素子

本報告ではアレー素子として図2に示すような対数周期ダイポールアレー素子を用いる。図2では、ダイポール素子が n 本の場合を示し、その素子長及び素子間隔は式(3)に従い決定される。

$$\alpha = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} \quad (3)$$

ここで、 l_n は n 番目のダイポール素子長、 s_n は n 番目のダイポール素子と $n+1$ 番目のダイポール素子間の距離、 α は隣接素子長あるいは隣接素子間距離の比である。対数周期ダイポールアレー素子は、 l_1 から l_n までに対応するダイポール素子がカバーする帯域に亘って動作する。従って、素子長や素子間隔を適切に与えた対数周期ダイポールアレー素子を用いることで、リフレクタアレーの広帯域化が見込める。

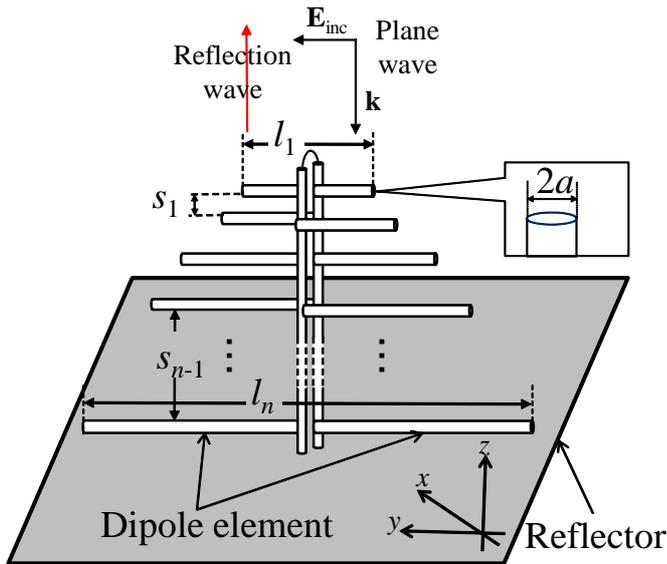


図 2: 対数周期ダイポールアレー素子.

2.3 広帯域なリフレクタアレー素子

リフレクタアレー素子の大きさに対する反射係数の位相変化が線形的であればリフレクタアレーは広帯域になる事が知られている. 一般的なリフレクタアレー素子の場合, その大きさに対する反射係数の位相変化が非線形的であるので, 設計周波数からずれた周波数ではリフレクタアレー素子の反射係数は必ずしも同相にならない. 従って, そのような素子から成るリフレクタアレーの性能は, 設計周波数からずれた周波数で大きく低下する. その一方で, 大きさに対する反射係数の位相変化が線形な素子を用いたリフレクタアレーでは, 周波数のずれに対して全素子の反射係数の位相が同じだけ変化するため, 設計周波数からずれた周波数でもその性能が低下しない. そして, 素子の大きさに対する位相変化量が 360° 以下であると, 必要な位相を実現できない素子位置が現れる事から, 素子の大きさに対する反射係数の位相変化量は 360° 以上が好ましい.

2.4 リフレクタアレーの設計及び評価法

以下に, リフレクタアレーの設計法及び評価法について説明する. まず, 式 (3) を用いて, 必要な帯域をカバーする範囲で対数周期ダイポールアレー素子の大きさを変化させる. リフレクタアレー素子の反射係数及び散乱電界は, モーメント法を用いて計算した. 各アレー素子からの散乱電界の位相が所望の方向で同相となるように, 各位置にある素子の大きさを決定し, リフレクタアレーを設計する. そして, 設計したリフレクタアレーの RCS (Radar cross section) を周波数毎に計算する. RCS とは式 (4) で表わされ, ある方向における散乱の強さを評価する指標と

して用いられている.

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

ここで R は散乱体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. 本報告では, RCS が設計周波数帯域で RCS の低下が 3dB 以内に収まれば, その帯域でリフレクタアレーが動作するとみなす.

3. 対数周期ダイポールアレー素子を用いた広帯域リフレクタアレーの設計

3.1 対数周期ダイポールアレー素子の位相特性

図 2 に示すような対数周期ダイポールアレー素子の位相特性を数値的に明らかにする. 図 5 に対数周期ダイポールアレー素子の l_1 を変化させた時の反射係数の位相の変化を示す. ここで素子数は 12 とし, $l_2 - l_{12}$ は式 (3) に従うものとする. 入射波は振幅 1 V/m の平面波とした.

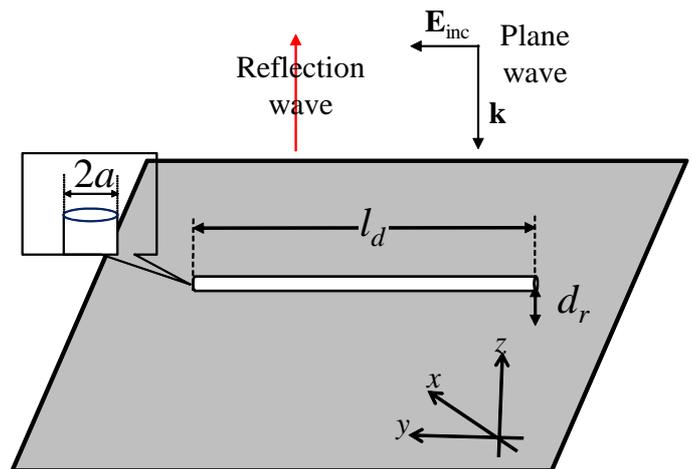


図 3: ダイポール素子.

図 4 からダイポール素子の位相変化量は 135° であり, 十分な位相変化量ではない. また, 位相の変化も非線形的であり, 狭帯域素子である事が分かる. 一方, 図 5 から対数周期ダイポールアレー素子は位相が概ね線形的に変化していることが分かる. 更に, 位相変化量が 2662° であることが分かる. 以上の数値解析結果から, 対数周期ダイポールアレー素子が広帯域なリフレクタアレー素子であることが分かった.

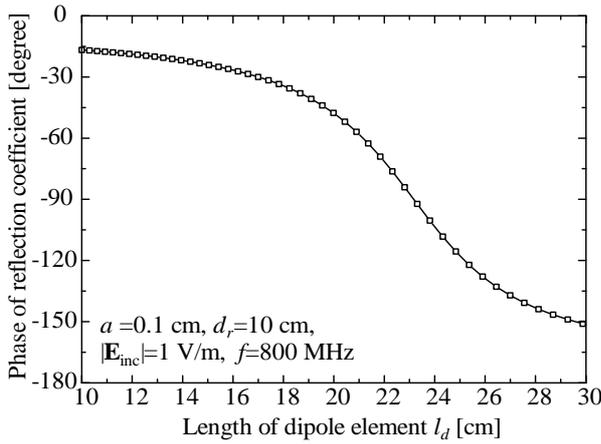


図 4: ダイポール素子におけるダイポール素子長の反射係数位相特性。

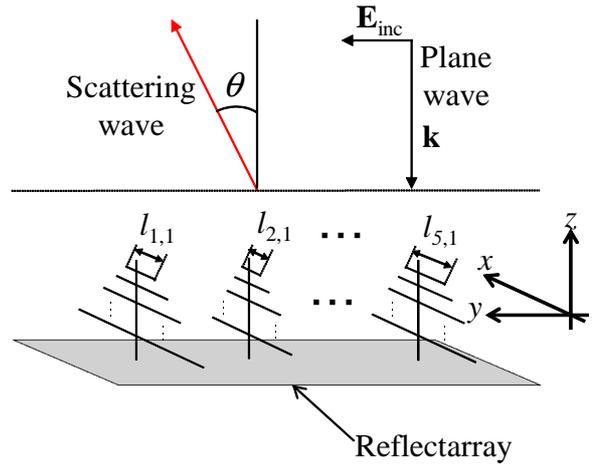


図 6: 対数周期ダイポールアレー素子から成る 1 次元リフレクタレー。

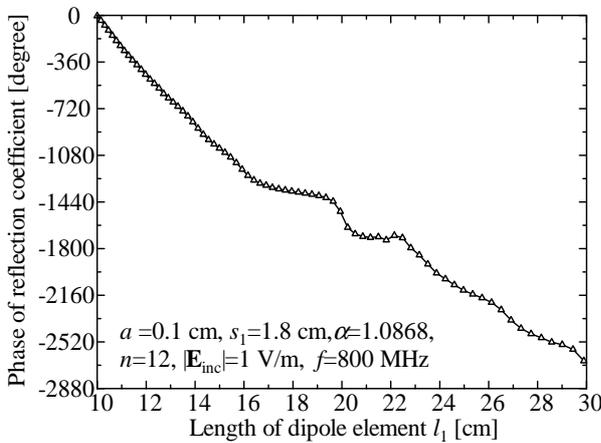


図 5: 対数周期ダイポール素子におけるダイポール素子長の反射係数位相特性。

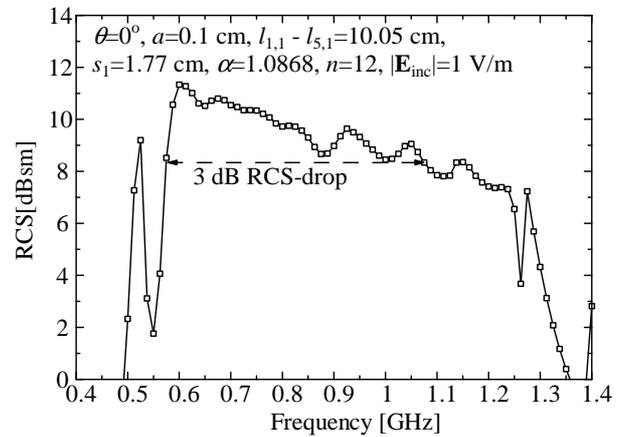


図 7: $\theta = 0^\circ$ における RCS 周波数特性。

3.2 リフレクタレーの帯域評価

対数周期ダイポールアレー素子を用いて図 6 に示すような、1次元のリフレクタレーを設計し、その RCS を計算した。xy 平面に配置される 5 素子の対数周期ダイポールアレーに入射される 1 V/m の平面波を散乱するように設計した。リフレクタレーの設計周波数は、600 MHz から 1 GHz とし、帯域が 50 % になるように設計した。

図 7 に、設計したリフレクタレーの RCS の計算結果を示す。RCS が最大値を示す周波数から 3 dB 低下するまでの周波数までの範囲をリフレクタレーの動作帯域とすると、設計リフレクタレーの帯域は 59 % となり、その広帯域性が確認できた。

次に xy 平面に配置される 5 素子の対数周期ダイポールアレーに 1 V/m の平面波を $\theta = 10^\circ$ 方向に散乱するように設計した。設計周波数は、600 MHz から 1 GHz に設定し、 $\theta = 10^\circ$ 方向で散乱電界が同相になるように素子長を設定した。RCS の計算結果を図 8 及び図 9 に示す。

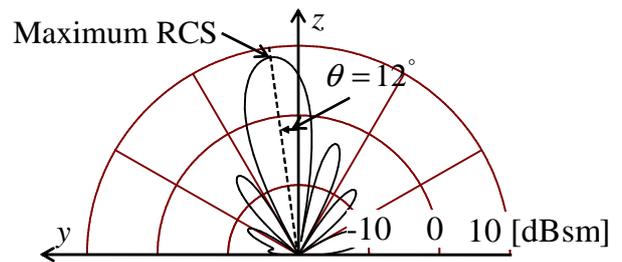


図 8: RCS パターン。

図 8 から、メインローブが $\theta = 12^\circ$ 方向に向いている事を確認できた。設計したメインローブ方向から 2° ずれた方向にメインローブが向いた原因は、素子の位相を揃える際の数値誤差と、リフレクタレーの設計時に素子間相互結合を無視したことの 2 点である。図 9 より、リフレクタレーの動作帯域は 51.2 % となり、最大振幅は図 7 と比較し 0.4 dB 下がっている。ビーム方向を変えると帯域

及び振幅が下がる事が分かった.

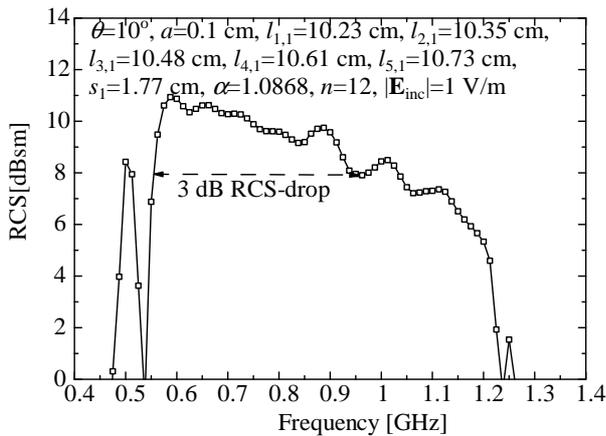


図 9: $\theta = 10^\circ$ における RCS 周波数特性.

4. むすび

対数周期ダイポールアレー素子を用いたリフレクタアレーの広帯域化を行った. まず対数周期ダイポールアレー素子の散乱電界の位相変化を数値的に明らかにした. . その結果, 対数周期ダイポールアレー素子は, 素子長に対して散乱電界の位相が線形的に変化し, 位相変化量が 360° を超える事を確認した. また, 本報告で設計した対数周期ダイポールアレーから構成されるリフレクタアレーを設計し, その広帯域性を数値的に明らかにした.

参考文献

- [1] J. Huang, J. A. Encinar, Reflectarray Antennas, John Wiley and Sons, 2008.
- [2] D. M. Pozar, S. D. Tagonski and H. D. Syrigos, "Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays," IEEE Trans. Antennas and Propag., vol.45, no.4, pp. 287-296, Feb., 1997.
- [3] L. Li., Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya and T. Maruyama, "Novel Broadband Planar Reflectarray With Parasitic Dipoles for Wireless Communication Applications," IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol.8, pp. 881-885, Aug., 2009.
- [4] Q. Y. Chen, S. W. Qu, X. Q. Zhang and M. Y. Xia, "Low-Profile Wideband Reflectarray by Novel Elements With Linear Phase Response," IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett., vol.11, pp. 1545-1547, Dec., 2012.
- [5] D.M. Pozar, "Wideband reflectarrays using artificial impedance surfaces," Electronics Lett., vol.43, no.3, pp. 148-149, Feb., 2007.