

対数周期ダイポールアレー素子を用いたリフレクトアレーの設計

横川 佳[†] 今野 佳祐[†] 陳 強[†] 亀田 卓^{††} 末松 憲治^{††}

[†] 東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 東北大学 電気通信研究所, 〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1

E-mail: †{yokokawa, konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 対数周期ダイポールアレー (Log-Periodic Dipole Array, LPDA) 素子は超広帯域な特性を持つことが知られている。本報告では、リフレクトアレー素子として LPDA 素子を用いてリフレクトアレーを設計し、その帯域を数値的に明らかにする。また、LPDA 素子のダイポール素子数が帯域に与える影響を数値的に明らかにする。

キーワード リフレクトアレー, 対数周期ダイポールアレー

Design of Reflectarray with Log-periodic Dipole Array Elements

Kei YOKOKAWA[†], Keisuke KONNO[†], Qiang CHEN[†], Suguru KAMEDA^{††}, and Noriharu SUEMATSU^{††}

[†] Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

^{††} Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai,
Miyagi, 182-8522, Japan

E-mail: †{yokokawa, konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Log-Periodic Dipole Array(LPDA) elements are well known as one of ultrawideband antennas. In this report, a reflectarray with LPDA elements is designed and the bandwidth of the reflectarray is numerically demonstrated. In addition, it is shown that the bandwidth of the reflectarray is affected by number of dipole elements in the LPDA elements.

Key words Reflectarray, Log-periodic dipole array

1. ま え が き

レーダや衛星通信システム用のアンテナとして、パラボラ反射器がこれまで広く用いられてきた。パラボラ反射器は高利得かつ広帯域であるが、重くてかさばるという欠点がある。そこで、パラボラ反射器の代わりとなる高利得反射鏡アンテナとして、平面型のリフレクトアレーが近年提案されている [1]-[2]。リフレクトアレーとは、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、リフレクト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。その一方で、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トアレーも狭帯域となる [2]-[3]。そこで近年、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、リフレクトアレーの広帯域化に応用されている [4]-[7]。しかし、それらのマイクロストリップ素子の帯域は約 20 %程度であり、

超広帯域性を持つリフレクトアレー素子はこれまで提案されていない。一方、LPDA 素子は超広帯域素子として知られている。また、マイクロストリップ素子のような平面型の素子はリフレクトアレー素子としてよく用いられているが、LPDA 素子のような 3 次元の超広帯域な素子をリフレクトアレー素子として用いた例はまだ無い。

本報告では、LPDA 素子を用いることでリフレクトアレーの広帯域化を図り、そのリフレクトアレーの帯域・利得を数値解析により明らかにする。

2. リフレクトアレーの原理及び設計法

2.1 リフレクトアレーの原理

ここではリフレクトアレーの原理について説明する。 (θ, φ) 方向におけるリフレクトアレーの遠方界 $\mathbf{E}(\theta, \varphi)$ は式 (1) のようになる。

$$\mathbf{E}(\theta, \varphi) = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \sum_{m=1}^M \mathbf{D}_m(\theta, \varphi) I_m \exp[j(m-1)k_0 d \sin \theta] \quad (1)$$

ここで、 r は原点から観測点までの距離、 \mathbf{D}_m は第 m 素子の指向性関数、 I_m は各リフレクタレー素子に流れる電流、 k_0 は自由空間における波数、 d は素子間距離を示している。式 (1) より、各素子の遠方界には、素子間隔 d と方向 θ によって生じる位相差が含まれる。従って、所望方向で強い散乱電界を得るためには、各素子の大きさを変えることでこの位相差をなくし、全ての素子の遠方界を同相にする必要がある。

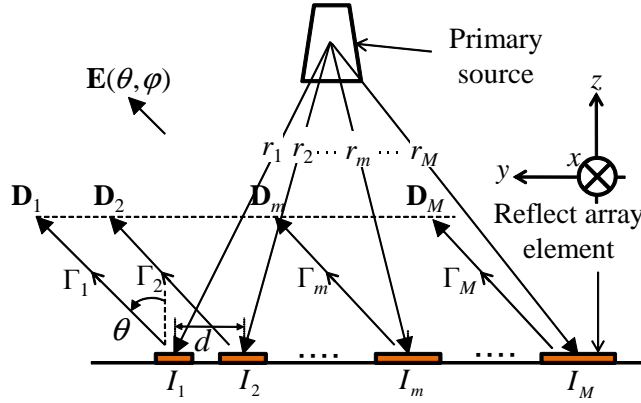


Figure 1 リフレクタレーの原理.

リフレクタレーの帯域を決定する要因は主に 2 つある。1 つ目がリフレクタレーを構成するアレー素子の帯域である。2 つ目が、一次放射器と各リフレクタレー素子との距離の違いにより、各素子への入射波の位相が周波数に対して異なる変化を示すことである。本報告では前者に注目し、リフレクタレーの広帯域化を図る。

2.2 対数周期ダイポールアレー素子

本報告ではリフレクタレー素子として図 2 に示すような LPDA 素子を用いる。ダイポール素子が n 本の場合、その素子長及び素子間隔は式 (2) に従って決定される。

$$\alpha = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} \quad (2)$$

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長と $n+1$ 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隔の比である。LPDA 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 LPDA 素子を用いる事で、リフレクタレーの広帯域化が見込める。

2.3 広帯域なリフレクタレーの条件

以下に図 1 を用いて、広帯域なリフレクタレーのアレー素子が持つべき位相特性の条件について述べる。図 1 に示す d は各リフレクタレー素子間の距離、 r_m は一次放射器から m 番目のリフレクタレー素子までの距離、 Γ_m は m 番目のリフレ

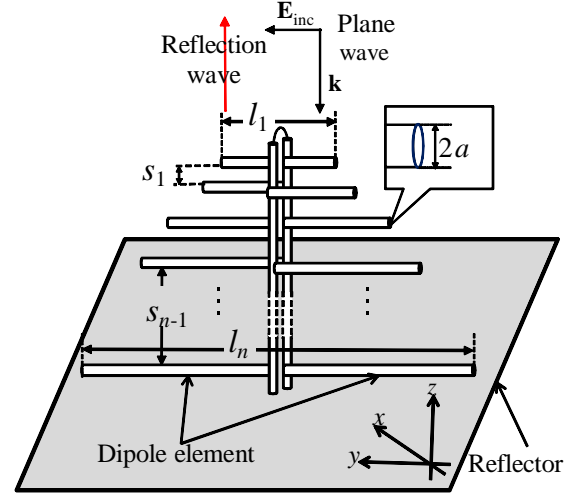


Figure 2 LPDA 素子.

クタレー素子の反射係数を示している。まず、ある周波数 f でリフレクタレーを設計することを考える。 Γ_1 を基準とすると、 m 素子目の反射係数 Γ_m の位相 Φ_m は式 (3) で表わされる。

$$-k_0|r_m - r_1| + (m-1)k_0 d \sin \theta + [\phi_m(l_m, f) - \phi_1(l_1, f)] = \Phi_m \quad (3)$$

式 (3) の第 1 項目は、一次放射器と各リフレクタレー素子との距離の違いに応じた位相差、第 2 項目は素子間距離と主ビーム方向に応じた位相差、第 3 項目は素子の大きさの違いによって生じる位相差を示している。ある周波数 f でリフレクタレーを設計する際は、 $\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_M$ が成り立つように、素子の大きさ l_1, l_2, \dots, l_M を調整する。そのように設計したリフレクタレーでは、 $\Phi_m = \phi_c + 2n\pi$ が成り立つ。ただし、 ϕ_c は定数、 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ である。 $\Phi_m = \phi_c + 2n\pi$ と、 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$ を式 (3) に代入し、整理すると式 (4) を得る。

$$c_m f + [\phi_m(l_m, f) - \phi_1(l_1, f)] = \phi_c + 2n\pi \quad (4)$$

ただし、 $c_m = \frac{2\pi}{c} d(m-1)k_0 \sin \theta - \frac{2\pi}{c} |r_m - r_1|$ とおいた。ここで、ある周波数 f で設計したリフレクタレーが別の周波数 $f + \Delta f$ で動作するための条件を考える。周波数が f から $f + \Delta f$ にずれたとき、式 (4) は式 (5) のように表すことができる。

$$c_m(f + \Delta f) + [\phi_m(l_m, f + \Delta f) - \phi_1(l_1, f + \Delta f)] = \phi_c + 2n\pi \quad (5)$$

ここで、 $\phi_m(l_m, f + \Delta f) = \phi_m(l_m, f) + \Delta\phi_m$ 、 $\phi_1(l_1, f + \Delta f) = \phi_1(l_1, f) + \Delta\phi_1$ と置き、これらを式 (5) に代入して整理すると式 (6) のように表すことができる。

$$c_m f + [\phi_m(l_m, f_1) - \phi_1(l_1, f_1)] + c_m \Delta f + [\Delta\phi_m - \Delta\phi_1] = \phi_c + 2n\pi \quad (6)$$

周波数のずれ Δf に対応した項である $c_m \Delta f + [\Delta\phi_m - \Delta\phi_1]$ が式 (4) に加わった形になっている。従って、周波数 f で設計

したリフレクタレーが周波数 $f + \Delta f$ でも動作するためには、 $c_m \Delta f + [\Delta \phi_m - \Delta \phi_1]$ が m によらない定数であることが条件になる。この条件を完全に満たすリフレクタレーを設計するのは困難であるが、図3のような、素子長に対する位相特性が線形的かつ周波数に対して平行に変化する素子を設計することで、 $[\Delta \phi_m - \Delta \phi_1] = 0$ とすることができ、広帯域性の条件を一部満たすことができる。従って、このような位相特性を持つ素子から成るリフレクタレーは、比較的広帯域な特性を持つことが期待できる。

3. LPDA 素子を用いたリフレクタレーの設計

3.1 LPDA 素子の位相特性

LPDA 素子の大きさに対する反射係数位相特性をモーメント法により数値的に明らかにする。図4にLPDA 素子の素子長を変化させた時の反射係数位相特性を示す。

図4から、本報告で設計したLPDA 素子は0.6 GHz から1 GHz に亘って 360° 以上の位相変化量を持つ素子であることがわかる。そして、素子長が10.5 cm から11 cmの間では、周波数を0.6 GHz から1 GHz まで変化させても、反射係数位相特性が概ね平行なことが分かる。従って、ここで設計したLPDA 素子は、前章で示した広帯域性の条件を満たす素子であると言える。以上の結果及び考察から、このLPDA 素子から成るリフレクタレーは、およそ0.6 GHz から1 GHz に亘って動作することが見込まれる。

3.2 LPDA 素子を用いたリフレクタレーの設計法

LPDA 素子を用いて図5に示すような、1次元リフレクタレーを設計し、そのRCS(Radar cross section)を計算する。本報告ではリフレクタレーが概ね0.6 GHz から1 GHz に亘って動作するようにLPDA 素子を設計する。以下にLPDA 素子を用いたリフレクタレーの設計法を示す。

1. 1素子目に平面波を入射し、他の素子との相互結合を考慮せず、所望方向の反射係数の位相を素子長に対して計算する。この反射係数の位相を基準とする。

2. 2素子目から M 素子目までの全ての素子に平面波を入射し、所望方向におけるそれぞれの素子の反射係数の位相を素子長に対して計算する。そして、基準素子と反射波及び散乱波の位相が同相となるように l_m を調節する。ここでも、他の素子との相互結合は無視する。

3. 全素子の相互結合を考慮し、設計したリフレクタレーの周波数毎のRCSを計算する。ここで、RCSの定義は式(7)のようになる。

$$\text{RCS} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_{\text{inc}}|^2} \quad (7)$$

ここで、 R はリフレクタレーから観測点までの距離、 \mathbf{E}_s は散乱電界強度、 \mathbf{E}_{inc} は入射電界強度を表している。本報告では、RCSの低下が最大値に対して3dB以内に収まっている帯域でリフレクタレーが動作するとみなす。

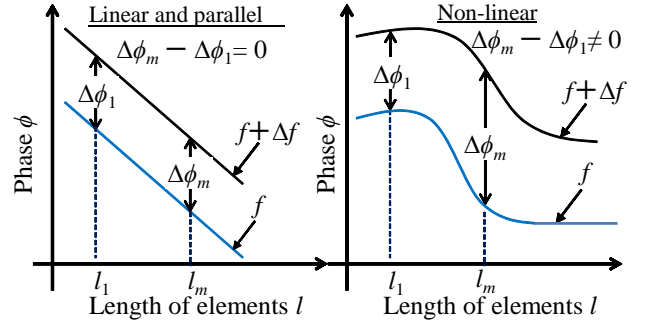


Figure 3 リフレクタレーが広帯域あるいは狭帯域になる素子の位相特性。

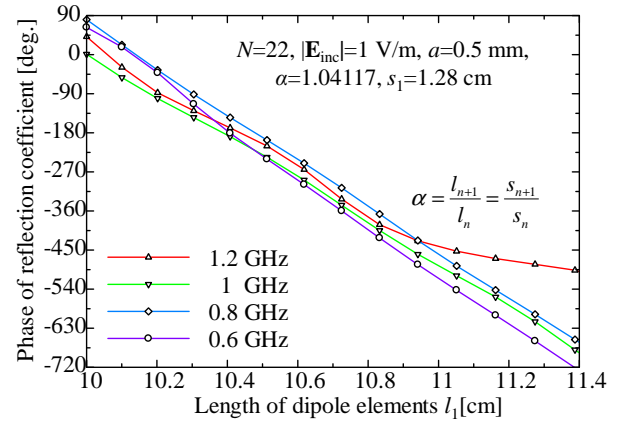


Figure 4 素子長に対する反射係数位相特性。

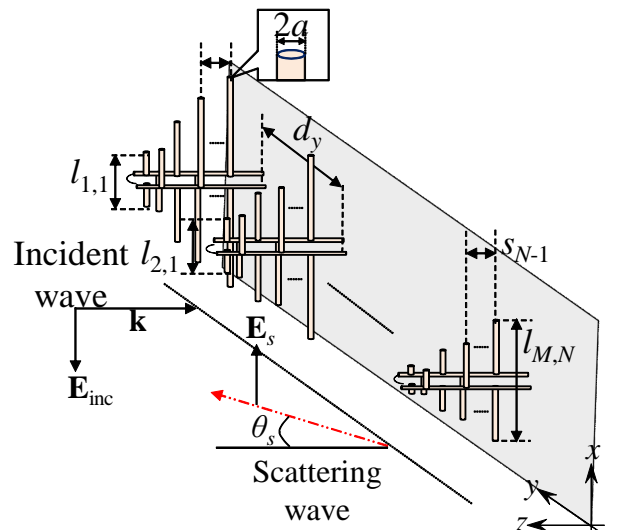


Figure 5 LPDA 素子から成る1次元リフレクタレー。

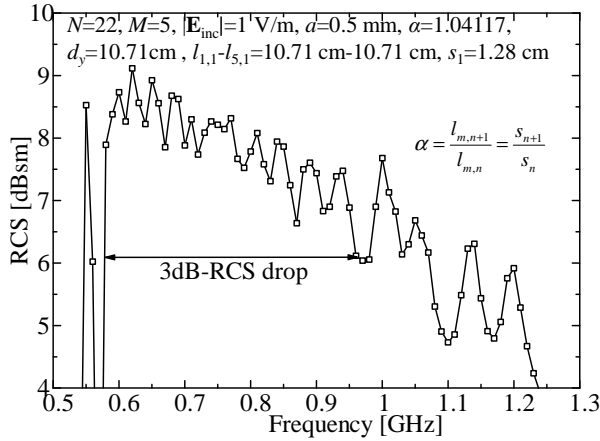


Figure 6 反射波のRCS周波数特性.

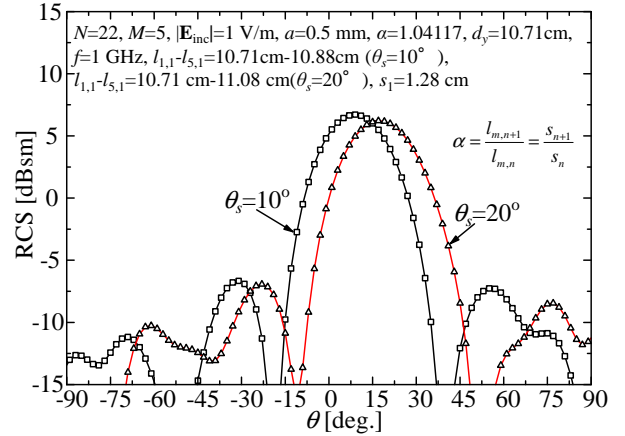


Figure 8 $\theta_s = 10^\circ, 20^\circ$ における散乱パターン.

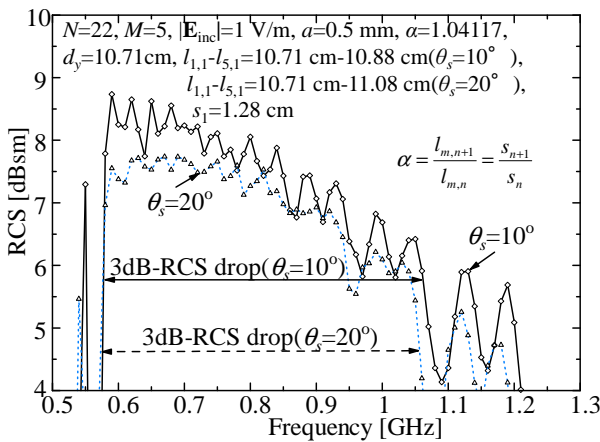


Figure 7 $\theta_s = 10^\circ, 20^\circ$ におけるRCS周波数特性.

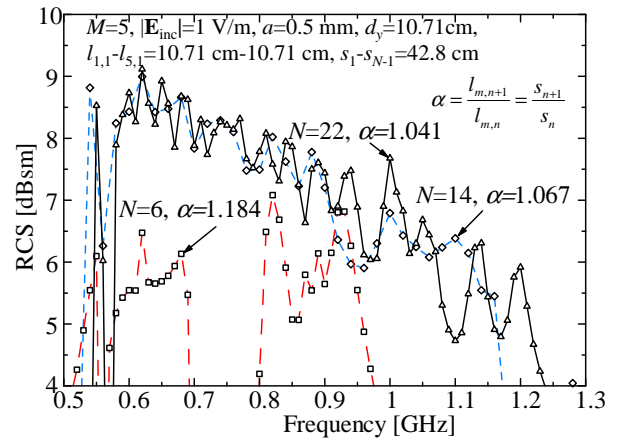


Figure 9 異なるダイポール素子数のLPDA素子から成るリフレクトアレーのRCS周波数特性.

4. リフレクタレーの帯域評価

4.1 帯域と散乱パターン

図6にLPDA素子を用いたリフレクタレーのRCS周波数特性を計算した結果を示す。その結果、3dB帯域幅は1:1.655(=50.3%)になった。従って、LPDA素子を用いることにより、従来のマイクロストリップ素子から成るリフレクタレーより広帯域なリフレクタレーを実現できたと言える。

次に、 $\theta_s = 10^\circ, 20^\circ$ に主ビームが向くように設計したリフレクタレーのRCS周波数特性とその散乱パターンを図7と図8に示す。図7から、散乱方向を大きくずらすことで、全体的にRCSが低下することがわかった。そして、 $\theta_s = 10^\circ$ の時、3dB帯域幅は1:1.827、 $\theta_s = 20^\circ$ の時、1:1.81となった。

また、図8から、概ね所望方向でRCSが最大となっていることが分かる。しかし、最大RCSとなる方向は、所望方向からはややずれている。例えば、所望方向が $\theta_s = 10^\circ$ の時、 $\theta = 9^\circ$ 、 $\theta_s = 20^\circ$ の時、 $\theta = 17^\circ$ で最大RCSとなっている。リフレクタレー素子の大きさを設定する過程で、各素子同士の相互結合を考慮しなかったことが原因だと思われる。

4.2 LPDA素子中のダイポール素子数が帯域に及ぼす影響

以下にLPDA素子中のダイポール素子数が帯域に及ぼす影

響について示す。LPDA素子の設計周波数を0.6GHzから1GHzに固定し、異なる素子数のダイポールから成るLPDA素子を用いたリフレクタレーのRCS周波数特性を示す。

図9から、LPDA素子のダイポール素子数を増やすことで周波数に対するRCSの連続性が増し、RCSのリプルが抑えられることが分かる。従って、LPDA素子の設計周波数は同様でも、LPDA素子中のダイポール素子数が多いほど、リフレクタレーの帯域が広くなることが見込まれる。

5. むすび

本報告では、LPDA素子を用いたリフレクタレーの広帯域性を数値解析により明らかにした。LPDA素子の反射係数の位相を示し、LPDA素子が広帯域な特性を持つアレー素子であることを示した。そして、LPDA素子から成るリフレクタレーを設計し、その帯域が従来のリフレクタレーに比べて広帯域な特性を持つことを示した。また、LPDA素子中のダイポール素子数が帯域に及ぼす影響を明らかにした。

謝辞

本研究は、総務省委託研究「災害時に有効な衛星通信ネットワークの研究開発」の一環として実施された。

References

- [1] L. Li., Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno and S. Uebayashi, "Frequency Selective Reflectarray Using Crossed-Dipole Elements With square Loops for Wireless Communication Applications," *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol.59, no.1, pp. 89-99, Jan., 2011.
- [2] J. Huang and J. A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, John Wiley and Sons, 2008.
- [3] D. M. Pozar, S. D. Tagonski and H. D. Syrigos, "Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays," *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol.45, no.2, pp. 287-296, Feb., 1997.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] D.M. Pozar, "Wideband reflectarrays using artificial impedance surfaces," *Electronics Lett.*, vol.43, no.3, pp. 148-149, Feb., 2007.
- [7] T. Toyoda, D. Higashi, H. Deguchi, M. Tshuji, "Broadband Reflectarray with Convex Strip Elements for Dual-Polarization Use," *Proceeding of 2013 URSI International Sympo. Electromag. Theory(EMTS)*, pp. 683-686, May, 2013.