

対数周期ダイポールアレーの散乱特性に関する研究

横川 佳[†] 今野 佳祐[†] 陳 強[†]

[†] 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
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) アンテナは、自己補対構造に由来する超広帯域特性を持つことが知られている。本報告では、LPDA 素子の散乱特性を電磁界数値解析によって明らかにする。LPDA 素子に給電した場合の放射特性及び平面波を TM 入射した場合の散乱特性の違いを示す。また、LPDA の構造パラメータが帯域に及ぼす影響を明らかにし、リフレクタアレー素子としての有効性を明らかにする。

キーワード 散乱特性, 対数周期ダイポールアレー, リフレクタアレー

Research on Scattering Performance of Log-periodic Dipole Array

Kei YOKOKAWA[†], Keisuke KONNO[†], and Qiang CHEN[†]

[†] Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan
E-mail: †{yokokawa, konno, chenq}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Log-Periodic Dipole Array(LPDA) antenna is well known as the one of ultrawideband antennas. In this report, scattering performance of the LPDA is numerically demonstrated. Relationships between structural parameters and the bandwidth of the LPDA element are clarified. Finally, it is shown that the LPDA element is a promising candidate as a wideband reflectarray element.

Key words Scattering performance, Log-periodic dipole array, Reflectarray

1. ま え が き

近年、パラボラ反射器の代わりとして、平面型リフレクタアレーが注目されている [1][2]。平面型リフレクタアレーは軽量で低コストだという利点がある。一方、マイクロストリップ型のリフレクタアレー素子の帯域が狭いことから、リフレクタアレー自体の帯域も狭くなるという欠点がある。そこで従来の研究では、このような平面型リフレクタアレーの狭帯域性を克服すべく、様々な広帯域リフレクタアレー素子が提案されてきた。従来の研究では、平面型リフレクタアレー素子から成るリフレクタアレーの帯域は、利得の 3dB 帯域幅で評価した結果で最大 29%程度である [3]- [6]。

その一方で、ボウタイ [7]、テーパスロット [8]、スパイラル [9]、対数周期ダイポールアレー (Log-Periodic Dipole Array, LPDA) [10]- [12] などの超広帯域アンテナの研究がなされてきた。これらの研究では、超広帯域アンテナの放射特性が明らかにされているものの、それらの散乱特性についての研究は十分になされていない。

本報告では、超広帯域アンテナの一つである LPDA の散乱特性を電磁界数値解析によって明らかにする。LPDA の放射特性

と、TM 入射した平面波で励振した LPDA の散乱特性を比較し、その違いを明らかにする。そして、散乱特性において LPDA の構造パラメータが帯域に及ぼす影響を明らかにし、広帯域なリフレクタアレー素子として LPDA が使えることを示す。

2. LPDA の原理及び構造

本報告で用いる LPDA のモデルを図 1 に示す。両端を短絡した平行二本線路で線状ダイポール素子が接続された構造になっている。散乱特性を数値計算する際は TM 入射の平面波で LPDA を励振し、放射特性を数値計算する際は、平行二本線路の先端に電圧源を接続する。LPDA の散乱特性と放射特性を同一の条件下で比較するため、平行二本線路の先端には 50 Ω 抵抗を装荷する。図 1 で、 E は散乱電界または放射電界の振幅、 k は散乱波または放射波の波数、 E_{inc} は入射電界の振幅、 k_{inc} は入射波の波数である。

LPDA は、以下のように設計される。まず、設計したい LPDA の周波数帯域の上限と下限に対応した素子長をそれぞれ l_1 と l_N とする。ここで、 N は LPDA におけるダイポール素子数である。すると、LPDA の理想的な動作帯域 B_s は以下の式で表される。

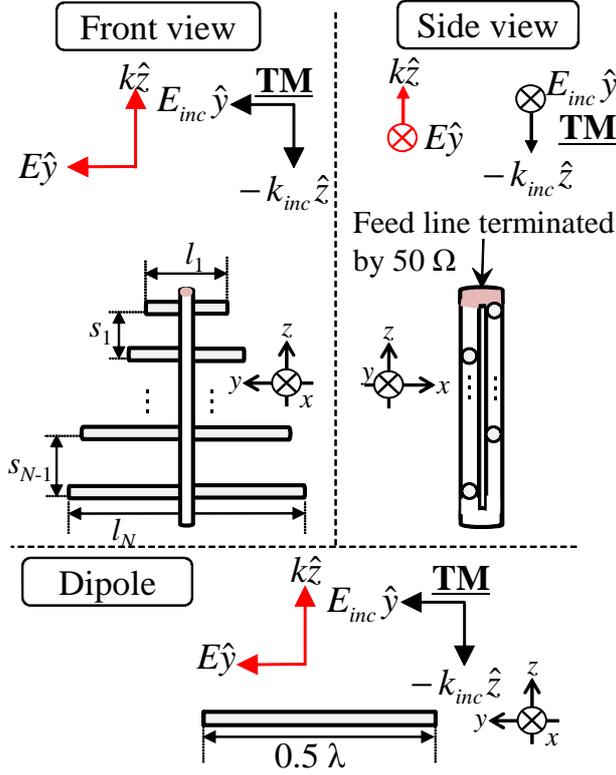


図1 LPDA と半波長ダイポール素子.

$$B_s = \frac{l_N}{l_1} \quad (1)$$

次に、LPDA における隣接ダイポール素子長の比及び隣接ダイポール素子間隔の比 τ を決める。

$$\tau = \frac{l_{n-1}}{l_n} = \frac{s_{n-1}}{s_n} \quad \text{where } n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

(1) 式と (2) 式から、LPDA におけるダイポール素子数は以下の式で決定される。

$$N = \left\lceil 1.5 + \frac{\log B_s}{\log \frac{1}{\tau}} \right\rceil \quad (3)$$

ただし、 $\lceil \cdot \rceil$ はガウス記号である。このように設計した LPDA をアンテナとして用いたときの放射特性及び放射のメカニズムはよく知られている。LPDA では、給電電圧源の周波数に対応した素子が強く励振され、その前後にある素子がそれぞれ導波器及び反射器の振る舞いをすることで指向性アンテナとして動作する。また、動作周波数が変化すると、放射に寄与するダイポール素子が変わっていき、理想的には長さ l_1 のダイポール素子と長さ l_N のダイポール素子がカバーする B_s に亘って指向性アンテナとして動作する。しかしながら、LPDA の B_s は実際の動作帯域 B とは異なり、 $B < B_s$ となることが知られている。これまでの研究では、LPDA のダイポール素子間隔 s_n が非常に狭い時、LPDA の動作帯域 B が B_s に近づき、ダイポール素子間隔 s_n が大きくなると動作帯域 B が狭くなることが知られている [13]。

以後は、LPDA の構造と放射特性との間に成り立つこのよう

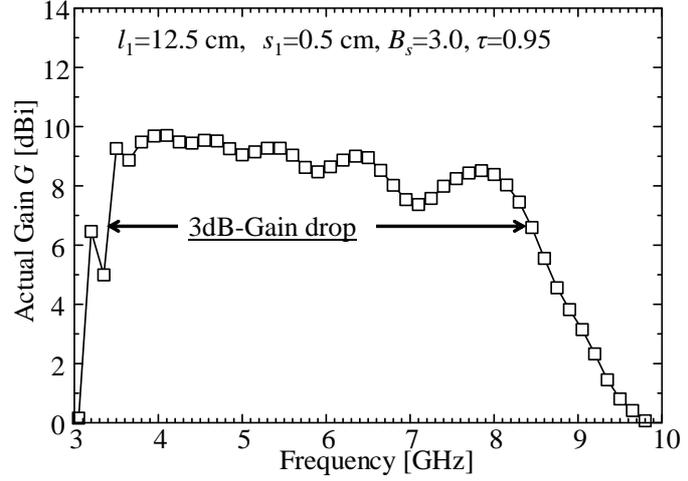


図2 LPDA の放射特性.

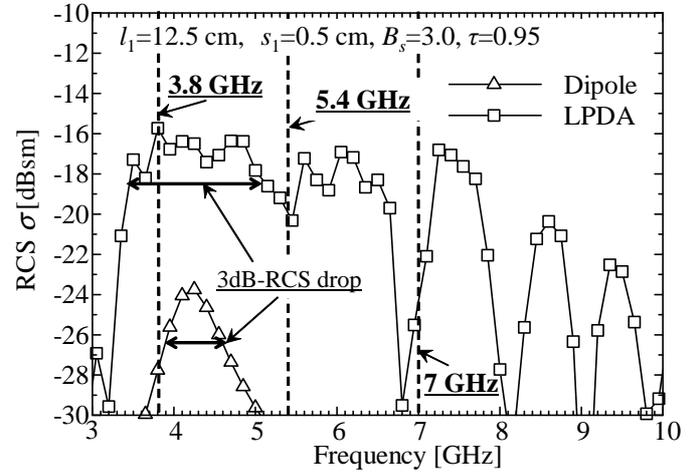


図3 LPDA 及び半波長ダイポール素子の散乱特性.

な関係が、散乱特性にもあてはまるかどうかを数値的に明らかにする。

3. LPDA の散乱特性の電磁界数値シミュレーション

3.1 LPDA の放射特性及び散乱特性比較

図1に示すような3 GHz から 12 GHz に亘って帯域をカバーする B_s を持つ LPDA 及び 4.5 GHz を共振周波数とした半波長ダイポール素子の利得及び帯域の評価を行う。本報告では、数値解析法としてモーメント法を用い、帯域は 3dB 帯域幅で評価する。LPDA に給電した場合の放射特性と、TM 入射した平面波によって励振した LPDA 及び半波長ダイポール素子の散乱特性を図2及び図3に示す。なお、放射特性は動作利得 G 、散乱特性は RCS (Radar cross section, RCS) σ を用いて評価する。動作利得及び RCS を (4) 式及び (5) 式に定義する。

$$G = \frac{W_r(\theta, \phi)}{W_i} = \frac{4\pi r^2 |\mathbf{E}_r(\theta, \phi)|^2}{Z_{int} P_{inc}} \quad (4)$$

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{W_s(\theta, \phi)}{W_{inc}} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{4\pi r^2 |\mathbf{E}_s(\theta, \phi)|^2}{|\mathbf{E}_{inc}|^2} \quad (5)$$

ここで、 W_r は (θ, ϕ) 方向の放射電力密度、 W_i は等方性アンテナ

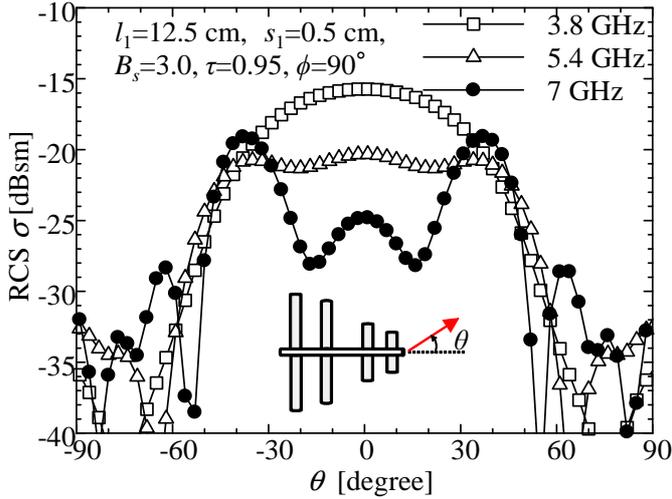


図4 LPDAの散乱パターン。

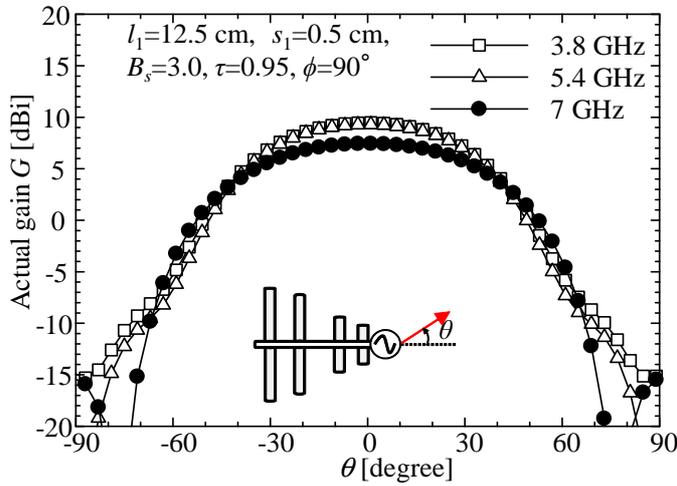


図5 LPDAの放射パターン。

ナのあらゆる方向への放射電力密度、 $E_r(\theta, \phi)$ は (θ, ϕ) 方向の放射電界、 Z_{int} は自由空間中の固有インピーダンス、 P_{inc} は LPDA への入射電力、 $W_s(\theta, \phi)$ は (θ, ϕ) 方向の散乱電力密度、 W_{inc} は入射電力密度、 $E_s(\theta, \phi)$ は (θ, ϕ) 方向の散乱電界、 r はアンテナもしくは散乱体からの距離である。図2から、LPDAをアンテナとして用いた場合、 B_s として設定した周波数の範囲では利得がなめらかに変化し、1:2.3というほぼ設計通りの3dB帯域幅が得られたことが分かる。一方で、図3からLPDAを散乱体として用いた場合、 B_s として設定した周波数の範囲内で利得の急激な落ち込みが見られる。その結果、LPDAを散乱体として用いたときの帯域は1:1.4となり、LPDAをアンテナとして用いた場合と比較して狭帯域となった。しかしながら、図2から分かるように、LPDAはダイポール素子と比較して広帯域な散乱特性を示しているため、LPDAは広帯域なりフレクトアレー素子として有効だと言える。また、LPDAを散乱体として用いたとき、使用可能な理論上の帯域内にもかかわらず、利得が極端に減少している周波数があるのは、ビームチルトなど、LPDAの指向性の歪みによるものと考えられる。そこで図4と図5に、利得が急激に低下している5.4 GHz及び7 GHz、また

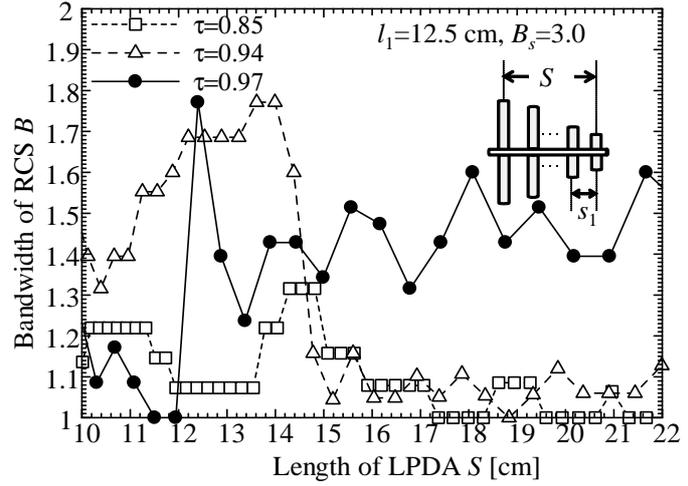


図6 LPDAのS及びtauが帯域に及ぼす影響。

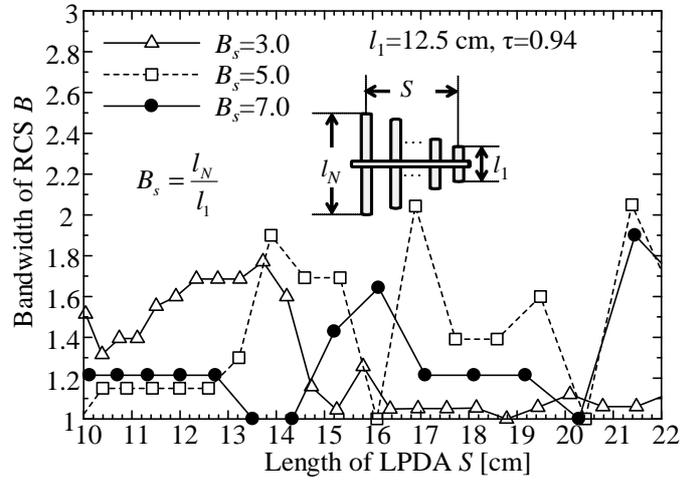


図7 LPDAのS及びBsが帯域に及ぼす影響。

最大利得である3.8 GHzの散乱パターン及び放射パターンを示す。図4の3.8 GHz、図5のそれぞれの周波数ではメインローブが正面方向を向いた理想的なパターンを示している。一方で、図4の7 GHzではメインビームが割れてしまっていることが分かる。従って、散乱体としてのLPDAを広帯域化するためには、ビームの歪みが小さくなるようにLPDAの構造パラメータを最適化することが必要となる。

3.2 構造パラメータが帯域に及ぼす影響

ここでは、LPDA全体の長さ S をパラメータとして、 S とLPDAの帯域との関連を考察する。なお、 S は以下の式で表される。

$$S = \sum_{n=1}^{N-1} s_n \quad (6)$$

図6に、 S と τ がLPDAの帯域に及ぼす影響を示す。図6から S によって、帯域が大きく変化することがわかる。また、各々の τ に対応したLPDAの帯域の最大値は $\tau = 0.85, S = 14.2$ cmの時1:1.3、 $\tau = 0.94, S = 14$ cmの時1:1.8、 $\tau = 0.97, S = 12.4$ cmの時1:1.8となった。 S が一定の場合、 τ が大きければ帯域が向上している傾向が見られる。特に、 S がおおよそ15 cm以

上になると、 τ が大きいほどより広帯域になっている。従って、LPDA の全長が同じでも、ダイポール素子数をより多く設けることにより、帯域が広がる傾向があると言える。このことから、ダイポール素子数が同じであれば、全長 S が短い LPDA の方が広帯域な散乱特性を示すことが分かった。この関係は、LPDA をアンテナとして用いた場合の構造パラメータと帯域の関係と同じである。

図 7 に B_s 及び S が帯域に及ぼす影響を示す。図 7 から、各々の B_s に対する最大の帯域は、 $B_s = 3.0$ の場合 1:1.8, $B_s = 5.0$ の場合 1:2.0, $B_s = 7.0$ の場合 1:1.9 となった。この結果から、LPDA をアンテナとして用いた場合と同様に、LPDA を散乱体として用いたときも、 B_s を大きくすることで動作帯域が広がる傾向はあるものの、限界があることが分かった。以上の結果から、LPDA を散乱体として用いたときの動作帯域は、LPDA をアンテナとして用いたときと同様に、LPDA の全長 S とダイポール素子数 N の両方に大きく依存することが分かった。

4. む す び

本報告では、散乱体としての LPDA の帯域と構造パラメータとの関係を数値的に明らかにした。LPDA の散乱特性と放射特性を比較した結果、LPDA の散乱特性は放射特性より狭帯域にもの、ダイポールと比較し、広帯域な散乱特性を示した。従って、LPDA は 広帯域なりフレクトアレー素子として有効であると言える。また、LPDA をアンテナとして用いたときに比べて、散乱体として用いたときの方が狭帯域な原因がビームの歪みにあることを明らかにした。最後に、散乱体としての LPDA の帯域をより広帯域にするためには、適切な τ , S を設定する必要があることを示した。

謝 辞

本研究成果の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) 電波有効利用促進型研究開発及び JSPS 科研費 26820137 の助成を受けて得られた。また、本研究の一部は東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究として進められたものである。

References

- [1] J. Huang and 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.
- [6] M.K. Arshad, F.A. Tahir and A. Rashid, "Design of a single layer reflectarray unit cells based on hexagonal ring for wideband operation," Antennas and Propagation Society

- International Symposium (APSURSI), 2014 IEEE, pp.815-816, July 2014.
- [7] L.L. Liu, Y.Su, C.L. Huang and J.J. Mao, "Study about the radiation characteristics of bow-tie antennas with discrete resistor-loaded," Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, vol.4, pp.3, Dec. 2005.
- [8] N.V.Venkatarayalu and Y.B. Gan, "Design of a tapered slot array antenna for UWB through-wall RADAR," Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE, pp.1-4, July 2010.
- [9] M. Wahab and Y. Perdana, "Design and realization of archimedes spiral antenna for Radar detector at 2-18 GHz frequencies," Communications (APCC), 2013 19th Asia-Pacific Conference on, pp.304-309, Aug. 2013.
- [10] D. Song, D. Wen, H. Xiong, Q. Zhang and M. Huang, "The design and simulation of feederlines of log-periodic dipole antenna in microwave band," Antennas & Propaga. (ISAP), 2013 Proceedings of the International Symposium on, voll, pp. 216-219, Oct. 2013.
- [11] J. Mruk, Z. Hongyu, M. Uhm, Y. Saito and D. Filipovic, "Wideband mm-Wave Log-Periodic Antennas," Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on, pp. 2584-2587, March 2009.
- [12] Mushiake, Y., "Self-complementary antennas," Antennas and Propagation Magazine, IEEE , vol.34, no.6, pp.23-29, Dec. 1992.
- [13] Carrel, R., "The design of log-periodic dipole antennas," IRE International Convention Record, vol.9, pp.61-75, March 1966.