

[共同研究成果]**忍者アレーアンテナ
-後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナ-**今野 佳祐[†], 陳 強[†]東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻[†]**1 まえがき**

フェーズドアレーアンテナは、数十年に亘って大きな注目を集めてきた [1]-[4]。ふつう、フェーズドアレーアンテナの大半は周期的アレーアンテナであり、数百～数千の同一の素子から成る。その結果、フェーズドアレーアンテナの後方散乱は非常に大きくなってしまふ。フェーズドアレーアンテナの後方散乱の低減は重要な課題であり、これまで多くの試みがなされてきた。

レドームは、フェーズドアレーアンテナの後方散乱を低減するのに効果的なことが知られている。周波数選択板 (Frequency selective surface, FSS) から成る帯域通過レドームは、フェーズドアレーアンテナの後方散乱を低減する技術としてよく知られている [5], [6]。帯域通過レドームは、フェーズドアレーアンテナの動作を妨げないように、その動作周波数帯域内の電磁波に対して透明になるように設計される。その一方、フェーズドアレーアンテナの動作周波数帯域外の電磁波に対しては、帯域通過レドームは不透明になる。接続部に導体の線を用いた A-Sandwich 型のレドームの透過性能が明らかにされてきた [7]。厚みのある小形円錐形状の C 帯 FSS レドームや、透過帯域よりも上の帯域の入射波を吸収することのできる FSS レドームがそれぞれ提案されてきた [8], [9]。これらのレドームは、フェーズドアレーアンテナの動作周波数帯域外での後方散乱の低減を可能にする。しかしながら、フェーズドアレーアンテナをこのような帯域通過レドームで覆ったとしても、その動作周波数帯域内での後方散乱は高いままである。

電磁波吸収体 (Radar absorbing material, RAM) はフェーズドアレーアンテナの後方散乱を低減する可能性のあるもう 1 つの技術である。抵抗性のシートを用いた吸収体が、マイクロ波帯およびミリ波帯でそれぞれ提案されてきた [10], [11]。酸化亜鉛結晶の無数の針から成る微細構造や多層プラズマから成るステルス構造が提案されてきた [12], [13]。このような電磁波吸収体の欠点は、フェーズドアレーへの入射波のみならず、その放射波も吸収してしまう点であり、これはフェーズドアレーアンテナの性能劣化につながりかねない。さらに、フェーズドアレーアンテナは大電力を扱うことから、電磁波吸収体から発生する熱の問題も深刻である。

ランダム性により後方散乱を低減する試みもなされてきた [14], [15]。ランダムに配置された散乱体によって覆われたフェーズドアレーアンテナの後方散乱は、その動作周波数帯で低減され得る。しかしながら、このような構造ではフェーズドアレーアンテナからの放射波も同時に低減されてしまふ。我々の知る限りにおいて、動作周波数帯域における性能を維持したまま、帯域内での後方散乱が小さいフェーズドアレーアンテナは実現されていない。

本論文では、低後方散乱のフェーズドアレーアンテナを実現するための新しいアプローチを提

案する．提案アンテナは後方散乱が小さく，他のアンテナによって探知されづらいことから，他者から見えないように行動する日本古来の間諜である忍者になぞらえて，提案アンテナを“忍者アレーアンテナ”と呼ぶ．忍者アレーアンテナは，非同一の素子から成り，各素子の大きさは，その放射特性を維持しながら，アレー全体の後方散乱を低減するように決定される．忍者アレーアンテナの低後方散乱性能は，リフレクトアレーの設計法と似た設計方法で実現される [16]-[22]．また，非同一素子の給電をそれらのアレー素子パターンから得る方法を示す．提案する忍者アレーアンテナの性能が数値シミュレーションによって明らかにされる．

2 忍者アレーアンテナの設計

忍者アレーアンテナは，アンテナとしてのみならず散乱体としても設計される．したがって，寄生素子を有するアンテナやマルチモードアンテナのように，素子としての設計の自由度を複数持つ素子を用いることが望ましい．

アンテナとしての設計で注意すべきことは，各素子が負荷インピーダンスで終端されていること，および素子のインピーダンスが動作周波数帯域内で 50Ω に近いこと，などが挙げられる．したがって，例えば寄生素子を有するアンテナの設計は，アンテナとして望ましいインピーダンス特性を踏まえてその給電素子の長さを予め決めておき，残った自由度で散乱特性を設計するという方法が考えられる．

散乱体としての設計は，リフレクトアレーと同様の方法で行うことができ，その方法は以下のようになる．

1. 忍者アレーアンテナの中心周波数および散乱界の主ビーム方向 (θ_s, ϕ_s) を予め決めておく．
2. 決めた中心周波数において，素子の反射係数 $\Gamma(l)$ を数値シミュレーションで得る．数値シミュレーション手法は，素子間相互結合をどのように考慮するかによっていくつかの種類がある [23]-[25]．

$$\Gamma(l) = \frac{E(\theta = \theta_s, \phi = \phi_s)}{E(\theta = \theta_i, \phi = \phi_i)} \quad (1)$$

ここで， (θ_i, ϕ_i) は平面波の入射角度であり， l は忍者アレー素子の寸法である．

3. 位相の基準となる素子の寸法を任意に選択する．
4. $\Gamma(l)$ とアレーファクタを乗じた値を用いて，散乱界の主ビームが (θ_s, ϕ_s) 方向を向くように，他の忍者アレーアンテナ素子の寸法を決定する．

設計した忍者アレーアンテナは，非同一の素子から成る周期アレーであり，その散乱特性はモーメント法で得られる [35], [36]．

2.1 非同一アレー素子の給電方法

忍者アレーアンテナはフェーズドアレーアンテナとしても動作するため、ビーム走査可能なように非同一素子の給電を決定する必要がある。ここで、各素子の給電はモーメント法を用いたアレー素子パターンから得られる、

モーメント法の行列方程式は以下のように得られる、

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I}. \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{V} は $N \times 1$ の励振ベクトル、 \mathbf{I} は $N \times 1$ の電流ベクトル、 \mathbf{Z} は $N \times N$ のインピーダンス行列であり、 N は未知数の数である。すると、全てのアレー素子電流は (2) 式から以下のように求められる、

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{Z}^{-1}\mathbf{V}_m \quad \text{where } m = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{V}_m は $N \times 1$ の給電ベクトルであり、第 m 番目の忍者アレー素子の給電点のみで 1 の値を持ち、その他の部分では 0 の値を持つ。 \mathbf{I}_m はそのような給電ベクトルを与えたときの $N \times 1$ アレー素子電流ベクトルである。 M は忍者アレーアンテナ素子数であり、 K_m を第 m アレー素子に含まれる未知数の数とすると、 $N = \sum_{m=1}^M K_m$ である。

(3) 式から全てのアレー素子電流が求まった後、所望の方向に主ビームを向けるような給電は、アレー素子電界から以下のように求められる、

$$C_m = \frac{E_R(\theta = \theta_r, \phi = \phi_r)}{E_m(\theta = \theta_r, \phi = \phi_r)} \quad \text{where } m = 1, \dots, M. \quad (4)$$

ここで、 $E_R(\theta = \theta_r, \phi = \phi_r)$ および $E_m(\theta = \theta_r, \phi = \phi_r)$ は、それぞれ基準素子と第 m 素子のみが給電されたときのアレー素子電界であり、それらの偏波は忍者アレーアンテナの主偏波である。 θ_r および ϕ_r は主ビーム方向のそれぞれ仰角と方位角である。

最終的に、 (θ_r, ϕ_r) 方向に主ビームを向けるための忍者アレーアンテナの給電ベクトルは以下のように与えられる、

$$\mathbf{V} = \sum_{m=1}^M \mathbf{V}_m(\theta = \theta_r, \phi = \phi_r). \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{V}_m(\theta = \theta_r, \phi = \phi_r)$ は第 m 素子の給電点で C_m の値を持ち、その他の部分で 0 の値を持つ励振ベクトルである。このようにして求めた忍者アレーアンテナの給電ベクトルは、素子間相互結合の影響とアレー全体の電流分布を全て考慮したものである。したがって、この給電ベクトルを用いれば、シングルモードアンテナのように単純な電流分布を持つ素子からなる忍者アレーアンテナのみならず、マルチモードアンテナのような複雑な電流分布を有する素子から成る忍者アレーアンテナのビーム走査も可能になると考えられる。

3 数値計算結果

2章で示された設計法にしたがって、 10×10 素子の忍者アレーアンテナが設計された。アレー素子は LPDA 素子とし、アレー構造は図 1 および図 2 に示すような三角アレーとした。忍者アレー

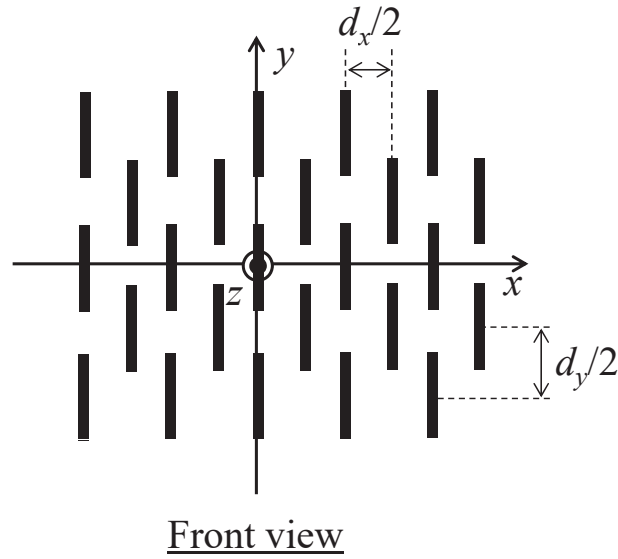


図 1: 対数周期ダイポールアンテナを用いた忍者アレーアンテナ (正面図).

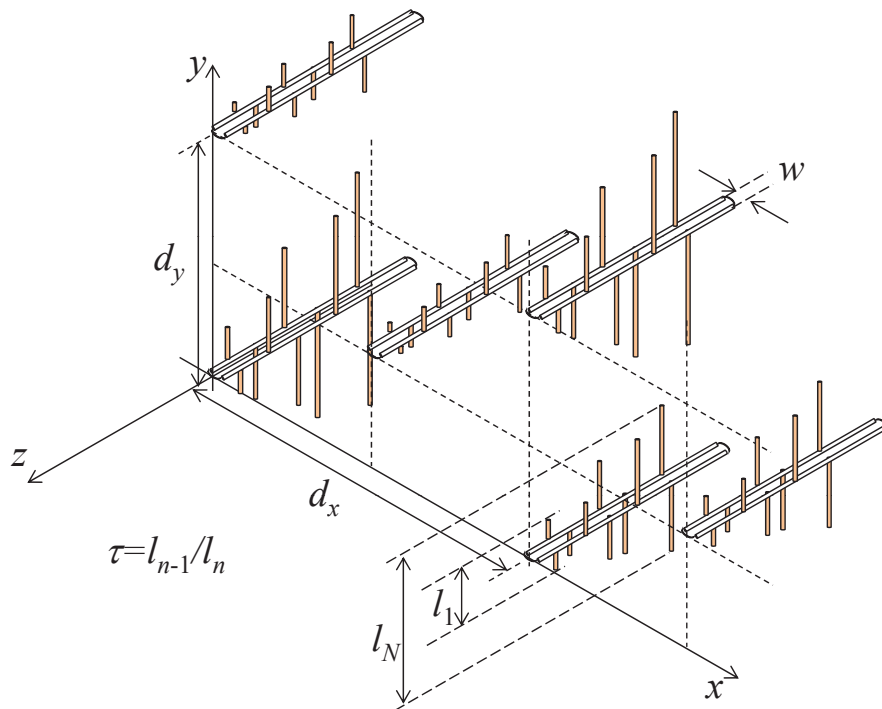


図 2: 対数周期ダイポールアンテナを用いた忍者アレーアンテナ (鳥観図).

アンテナの散乱界の主ビーム方向は $(\theta_s, \phi_s) = (20^\circ, 0)$ とし、動作周波数は 8 GHz とした. 垂直入射の平面波に対する反射係数の数値シミュレーションを行い, LPDA 素子の構造パラメータなどは反射係数の位相変化が線形かつその変化量が 360° を超えるように予め決めておいた.

図 3 に, 垂直入射の平面波に対する忍者アレーアンテナの BRCS(Bistatic Radar Cross Section) パターンを示す. 正面方向の散乱波が弱いのに対して, $(\theta_s, \phi_s) = (20^\circ, 0)$ 方向の散乱波が強くなっ

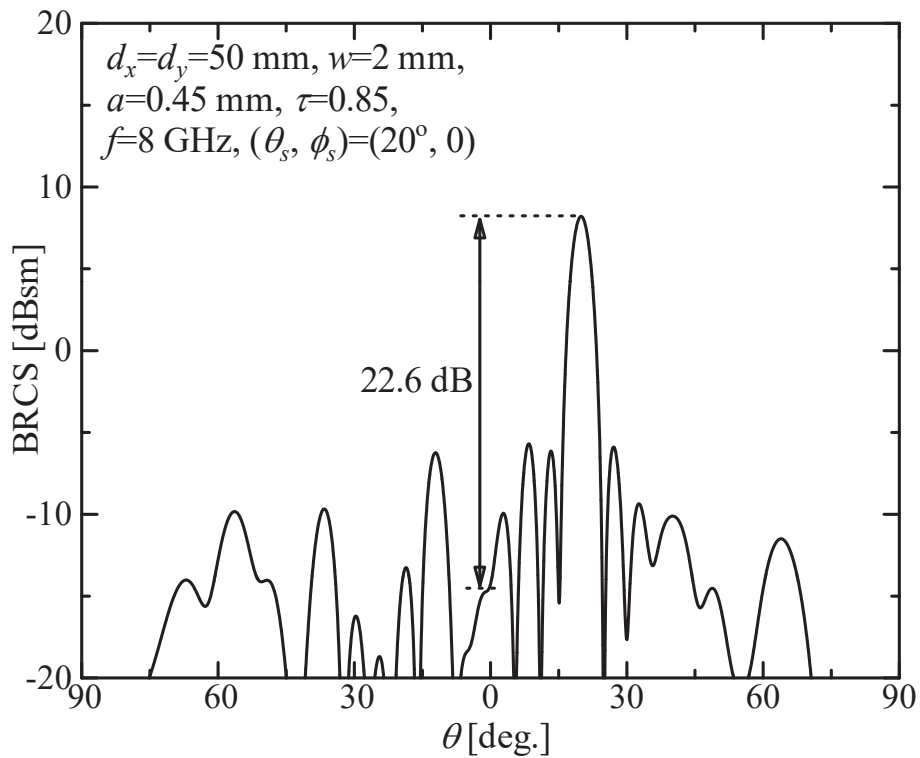


図 3: 忍者アレーアンテナの BRCS パターン (H 面).

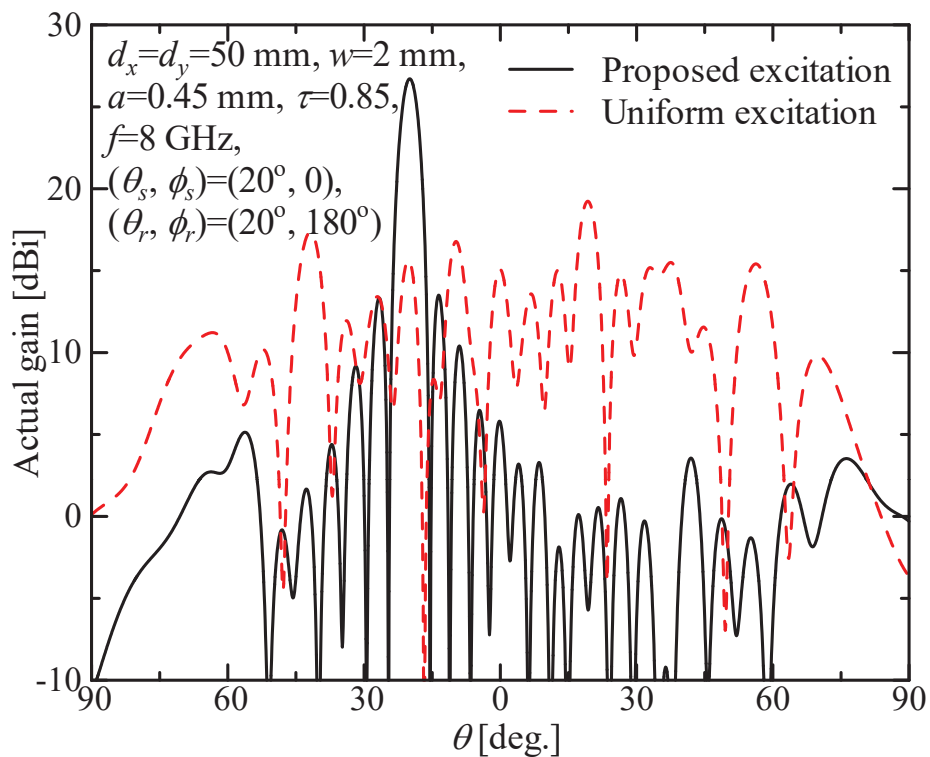


図 4: 忍者アレーアンテナの動作利得パターン (H 面).

ているのが分かる. 一般的なフェーズドアレーアンテナは, 同一素子が周期的に並んでいるので正面方向に散乱波の主ビームが表れるが, 忍者アレーアンテナは非同素子が周期的に並んでい

るので、散乱波の主ビームは正面からずれた方向に現れる。その結果、正面方向の散乱波、すなわち後方散乱が弱くなる。

図4に、忍者アレーアンテナの動作利得パターンを示す。主ビーム方向は $(\theta_r, \phi_r) = (20^\circ, 180^\circ)$ とした。提案法で給電した忍者アレーアンテナは主ビーム方向が所望の方向に向いているのに対し、一様給電にアレーファクタを用いて給電を与えると主ビームが形成できないことが分かる。忍者アレーアンテナのアレー素子は非同一であるので、素子の電流や指向性関数も非同一である。その結果、アレーファクタを用いた給電のように、素子間隔とビーム方向に応じた線形な位相シフトを各素子に与えても所望の方向に主ビームを形成できない。その一方で、提案法はアレーエレメントパターンを用いて各素子の給電を行っている。アレーエレメントパターンには、素子の電流や指向性関数、素子間相互結合の情報が全て含まれているので、所望の方向に主ビームを形成するために必要な位相シフトを生み出すことができる。

以上の数値シミュレーションは、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータSX-ACEを用いて行った。プログラムは高速化のためのベクトル化チューニングを施しており、そのベクトル演算率は99.6%であった。一般的なパソコンで同じシミュレーションを行うと数時間程度の計算時間がかかるが、SX-ACEのベクトル演算機能により、計算時間は2分程度と大幅に短縮された。

4 まとめ

本章では、後方散乱の小さい新しいフェーズドアレーアンテナである忍者アレーアンテナが提案された。忍者アレーアンテナは、非同一の素子から成るアレーアンテナであり、リフレクタアレーと同様の方法で設計ができる。その結果、同一の素子から成る一様アレーアンテナと比較すると、忍者アレーアンテナはその動作周波数帯域内における後方散乱が小さくできる。また、非同一素子から成る忍者アレーアンテナのための給電ベクトル計算法も新たに提案された。提案法はアレー素子電界に基づく方法であり、得られる給電ベクトルを忍者アレーアンテナに与えると、所望の方向に主ビームを向けることができる。マルチモードの対数周期ダイポールアレー素子から成る忍者アレーアンテナの有効性が数値シミュレーションされ、その低い後方散乱特性とビーム走査性が明らかにされた。

本章は、フェーズドアレーアンテナの後方散乱を低減する新しいメカニズムに焦点を絞っており、議論すべき重要な問題のいくつかが残ったままである。例えば、フェーズドアレーアンテナは移相器や増幅器、ケーブル、本章では無視してきた様々なマイクロ波デバイスを含む。このようなマイクロ波デバイスは、忍者アレーアンテナの特性にネガティブな影響を与える可能性があり、それらを考慮した忍者アレーアンテナの設計法およびその特性の解明は将来の課題である。加えて、本章では忍者アレーアンテナの性能が数値的に示されたが、実験的にその性能を明らかにすることも課題であるので、将来的には試作と測定を行う予定である。

謝辞

本研究成果は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を用いて得られたものである。スタッフをはじめ、関係各位に深く感謝する。

参考文献

- [1] Y. Konishi, "Phased array antennas," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no.3, pp. 954-967, March, 2003.
- [2] M. Ando, "Planar waveguide arrays for millimeter wave systems," IEICE Trans. Commun., vol. E93-B, no.10, pp. 2504-2513, Oct., 2010.
- [3] R.C. Hansen, Phased Array Antennas, John Wiley & Sons, 1998.
- [4] R.J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, Artech House, Boston, London, 1994.
- [5] B. A. Munk, Frequency Selective Surfaces Theory and Design, Jon Willey & Sons, 2000.
- [6] B. A. Munk, Finite Antenna Arrays and FSS, Jon Willey & Sons, 2003.
- [7] Y. Inasawa, T. Nishimura, J. Tsuruta, H. Miyashita, and Y. Konishi, "Using conducting wire at A-sandwich junctions to improve the transmission performance of radomes," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.8, pp. 2764-2767, Aug. 2008.
- [8] 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, 2009.
- [9] F. Costa, and A. Monorchio, "A frequency selective radome with wideband absorbing properties," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 6, pp.2740-2747, June 2012.
- [10] O. Hashimoto, T. Abe, R. Satake, M. Kaneko, and Y. Hashimoto, "Design and manufacturing of resistive-sheet type wave absorber at 60 GHz frequency band," IEICE Trans. Commun., vol. E78-B, no. 2, pp. 246-252, Feb. 1995.
- [11] H. Kurihara, T. Saito, K. Tanizawa, O. Hashimoto, "Investigation of EM wave absorbers by using resistive film with capacitive reactance," IEICE Trans. Electron., vol. E88-C, no. 11, pp. 2156-2162, Nov. 2005.
- [12] Y. Zhao, J. Liu, Z. Song, and X. Xi, "Microstructure design method for multineedle whisker radar absorbing material," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 15, pp. 1163-1166, 2016.

- [13] B. Bai, X. Li, J. Xu, and Y. Liu, “Reflections of electromagnetic waves obliquely incident on a multilayer stealth structure with plasma and radar absorbing material,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 8, pp.2588-2596, August 2015.
- [14] Y.-C. Song, J. Ding, C.-J. Guo, Y.-H. Ren, and J.-K. Zhang, “Ultra-broadband backscatter radar cross section reduction based on polarization-insensitive metasurface,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 329-331, 2016.
- [15] Y.-C. Hou, W.-J. Liao, C.-Che Tsai, and S.-H. Chen, “Planar multilayer structure for broadband broad-angle RCS reduction,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 5, pp. 1859-1867, May 2016.
- [16] J. Huang and J.A. Encinar, *Refractarray Antennas*, John Wiley & Sons, 2008.
- [17] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, “Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 881-885, 2009.
- [18] 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 Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 89-99, Jan. 2011.
- [19] J. F. Li, Q. Chen, Q. Yuan, and K. Sawaya, “Reflectarray element using interdigital gap loading structure,” *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 2, pp.83-85, Jan. 2011.
- [20] D.G. Berry, R.G. Malech, and W.A. Kennedy, “The Reflectarray Antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.11, no.6, pp.645-651, Nov. 1963.
- [21] J. Huang, ”Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications,” TDA Progress Report 42-120, Feb. 1995, pp. 153-173.
- [22] J. Huang and J.A. Encinar, *Refractarray Antennas*, John Wiley and Sons, 2008.
- [23] F. Venneri, G. Angiulli, and G. Di Massa, “Design of microstrip reflectarray using data from isolated patch analysis,” *Microw. Optical Technol. Lett.*, vol.34, no.6, pp.411-414, Sept. 2002.
- [24] M.-A. Milon, D. Cadoret, R. Gillard, and H. Legay, “‘Surrounded-element’ approach for the simulation of reflectarray radiating cells,” *IET Microw. Antennas Propag.*, vol.1, no.2, pp.289-293, April 2007.

- [25] C. Yann, R. Loison, R. Gillard, M. Lebeyrie, and J.-P. Martinaud, “A new approach combining surrounded-element and compression methods for analyzing reconfigurable reflectarray antennas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 7, pp. 3215-3221, July 2012.
- [26] C. Wan and J.A. Encinar, “Efficient computation of generalized scattering matrix for analyzing multilayered periodic structures,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 43, no. 11, pp. 1233-1242, Nov. 1995.
- [27] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, “Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 881-885, 2009.
- [28] 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 Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 89-99, Jan. 2011.
- [29] H. Yagi and S. Uda, “Projector of the sharpest beam of electric waves,” *Proc. Imperial Academy Japan*, vol.2, no.2, pp.49-52, Feb. 1926.
- [30] Y. Mushiake, “Self-complementary antennas,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 34, no. 6, pp. 23-29, Dec. 1992.
- [31] R. H. Duhamel and D. E. Isbell, “Broadband logarithmically periodic antenna structure,” *IRE National Convention Record*, pt.1, pp.119-128, March, 1957.
- [32] D. E. Isbell, “Log periodic dipole arrays,” *IRE Trans. Ant. Prop.*, AP-8, no.3, pp.260-267, May, 1960.
- [33] 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.
- [34] H. 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.
- [35] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Macmillan, New York, 1968.
- [36] J. H. Richmond and N. H. Geary, “Mutual impedance of nonplanar-skew sinusoidal dipoles,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 23, no. 3, pp. 412-414, May 1975.