

[依頼講演]

電磁石を用いた1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーの研究

今野 佳祐[†] 胡 奥[†] 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: †{keisuke.konno.b5, qiang.chen.a5}@dc.tohoku.ac.jp

あらまし 電磁石を用いた非接触の位相器と、それを用いた1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーを提案する。提案するリフレクトアレーでは、電磁石の生み出す静磁界が反射板を透過してリフレクトアレー素子の高さを変えることで、その高周波散乱電界の位相が変化する。その一方で、高周波電磁界は反射板を透過できないため、高周波における移相器とリフレクトアレー素子との電磁結合はなく、挿入損失はほぼ0である。提案する1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーの特性を数値的・実験的に明らかにする。

キーワード モーメント法

[Invited Talk]

A Study of Single Bit Reconfigurable Reflectarray Using Electromagnets

Keisuke KONNO[†], Ao HU[†], 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: †{keisuke.konno.b5, qiang.chen.a5}@dc.tohoku.ac.jp

Abstract A contactless phase shifter using an electromagnet is proposed and used for design of a single bit reconfigurable reflectarray. Magnetostatic force penetrates a reflecting plane of the reflectarray and attracts a reflectarray element. As a result, height of the reflectarray element is tunable and phase of its high frequency scattering field shifts. Although magnetostatic field can penetrate the reflecting plane, high frequency field cannot penetrate the reflecting plane and the electromagnets are completely isolated from the high frequency field. Therefore, insertion loss of the proposed reflectarray element is negligible. In this report, scattering performance of the proposed single bit reconfigurable reflectarray is clarified numerically and experimentally.

Key words Method of moments

1. まえがき

リフレクトアレーは無数の素子からなる散乱体であり、各素子からの散乱電界の位相を特定の方向・位置で同相になるように設計することで、散乱体への入射波の入射角とは無関係な方向の散乱電界強度を高めることができる [1]-[4]。最初のリフレクトアレーとしては導波管を用いたものが提案され [1]、その後マイクロストリップ素子を用いたものが提案され、薄型化・軽量化が進められた [2], [4]。このようなリフレクトアレーの中で、動的に散乱特性を変えられる素子からなるリコンフィギャラブルリフレクトアレーが近年注目を集めている。

リコンフィギャラブルリフレクトアレーは、電子的なりコンフィギャラブルリフレクトアレーと、機械的なりコンフィギャ

ラブルリフレクトアレーの2種類に大別される。電子的なりコンフィギャラブルリフレクトアレーは、ダイオードやトランジスタ等の能動素子をリフレクトアレー素子へ装荷し、それらにバイアス電圧を印加してインピーダンスを変えることで動的にリフレクトアレー素子の散乱特性を変化させるものである [5]-[10]。このような電子的なりコンフィギャラブルリフレクトアレーでは、能動素子へ印加するバイアス電圧は瞬時に変えられるので、応答が非常に高速であるという利点がある。その一方で、能動素子の持つ非線形性により可逆性が失われることや、挿入損失が大きいことが欠点として挙げられる。機械的なりコンフィギャラブルリフレクトアレーは、モーターやアクチュエーター等の機械デバイスをリフレクトアレー素子へ装荷し、それらを駆動して素子の高さや回転角等を変えることで機

械的にリフレクタレー素子の散乱特性を変化させるものである [11]-[18]。このような機械的なリコンフィギャブルリフレクタレーでは、応答の線形性や可逆性が担保され、挿入損失が極めて小さいという利点がある。その一方で、応答速度が電子的なリコンフィギャブルリフレクタレーのそれと比較して低速であることや、機械駆動部分の構造が複雑になりがちであるという欠点がある。

このような機械的なリコンフィギャブルリフレクタレーの欠点を解消するものとして、筆者らは電磁石を用いたリコンフィギャブルリフレクタレーを提案している [19]-[21]。電磁石を用いたリコンフィギャブルリフレクタレーは、反射板の背面に配置した電磁石を用いて、その表面にあるリフレクタレー素子を吸着することで素子の高さを変え、散乱電界の位相を変えることができる。このリコンフィギャブルリフレクタレーでは、電磁石の生み出す静磁界が反射板を通過できる一方で、リフレクタレー素子が散乱する高周波電磁界は反射板を通過できないという非対称性を上手く利用している。この非対称性により、高周波におけるリフレクタレー素子と電磁石の完全なアイソレーションと、素子の可変性を両立させている。また、電磁石を用いると非接触で素子の高さを変えることができるので、従来の機械的なリコンフィギャブルリフレクタレーの欠点であった複雑な機械駆動部分の構造は不要になるという点も提案リコンフィギャブルリフレクタレーの利点である。

本報告では、このような電磁石を用いたリコンフィギャブルリフレクタレーについて述べる。まず、電磁石を用いたリフレクタレー素子の構造や動作原理を述べる。次に、電磁石に対する印加電圧と、リフレクタレー素子の高さ、およびその散乱特性との関係を明らかにする。最後に、リコンフィギャブルリフレクタレーを試作し、その散乱特性を実験的に明らかにする。

2. 電磁石を用いたリフレクタレー素子の構造と動作原理

電磁石を用いたリフレクタレー素子を図 1 に示す。リフレクタレー素子は、ポリスチレンのフィルム上に貼付した銅箔ストリップからなるダイポール素子である。ポリスチレンフィルムの両端は PLA (Poly-Lactic Acid) 製の治具で支えられており、銅箔とポリスチレンフィルムの間には方形のスチール片が挟まれている。反射板の裏には電磁石が配置されており、電圧をそれに印加するとスチール片が磁力により吸着され、リフレクタレー素子の高さが減少する。このように、電磁石を用いたリフレクタレー素子では、電磁石から生じる静磁界が反射板を透過し、リフレクタレー素子に非接触で機械的な力を及ぼすことができる。一方で、リフレクタレー素子へ入射する高周波電磁界は反射板を透過できないので、電磁石と高周波電磁界との結合は全くない。したがって、電磁石を用いたリフレクタレー素子では、原理的に移相器 (=電磁石) の挿入損失がゼロになる。なお、ここで用いた電磁石は TESLA 社製の TMB-2006T である [22]。

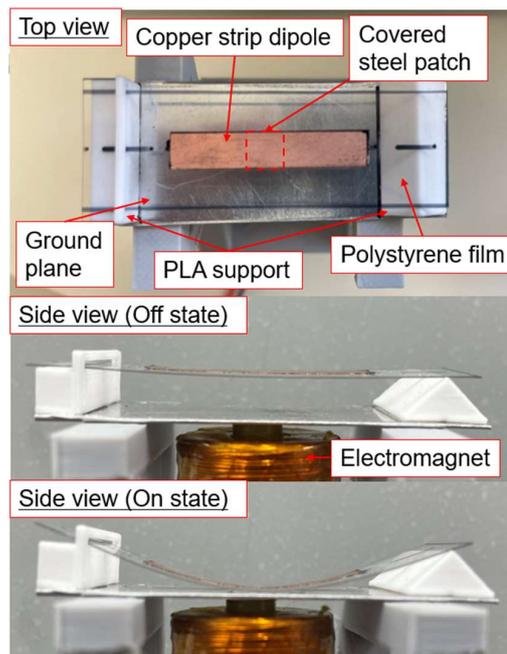


図 1 電磁石を用いたリフレクタレー素子。

3. 電磁石を用いたリフレクタレー素子の機械的・電気的特性

電磁石を用いたリフレクタレー素子の機械的特性の測定系を図 2 に示す。直流電源を電磁石に接続し、印加電圧を変えながらリフレクタレー素子の高さ方向の変位を測定した。リフレクタレー素子の構造や、対応するパラメータは図 3 および表 1 にそれぞれ示す。ここでは一例として、電磁石への印加電圧が 0 のときのポリスチレンフィルムの高さ h の異なる複数のリフレクタレー素子について、印加電圧 V と素子高さ s ($= h @ V = 0$) との関係を図 4 の左軸に示す。図 4 から、印加電圧がある閾値を超えると s が小さくなっていき、その後印加電圧を大きくすると急激に s が 0 に近づくことが分かる。電磁石とスチール片の間に働く静磁力は、それらの間の間隔の 2 乗に反比例し、非線形的な変化をする [23]。このことは、 s が減少するとスチール片に働く力が非線形的に増加することを意味しており、電磁石にスチール片が一度吸着され始めると、 s を一定の高さで留めておくことが極めて難しいことを示唆している。したがって、電磁石の印加電圧をコントロールしてリフレクタレー素子の高さを一定に保つことはかなり難しい。このような理由から、本報告では電磁石による素子高さのコントロールを $s = h$ と $s = 0$ の 1 ビットとした。なお、マルチビットでの素子高さの制御のアイデアについては文献を参考にされたい [21]。

図 4 の右軸には、印加電圧に対応する素子高さ s を持つリフレクタレー素子に平面波を垂直入射したときの反射係数の位相を示している。なお、反射係数の位相は商用の電磁界シミュレータである FEKO を用いて、モーメント法によって無限周期構造を解析して求めた [24]-[26]。電磁石による素子高さのコン

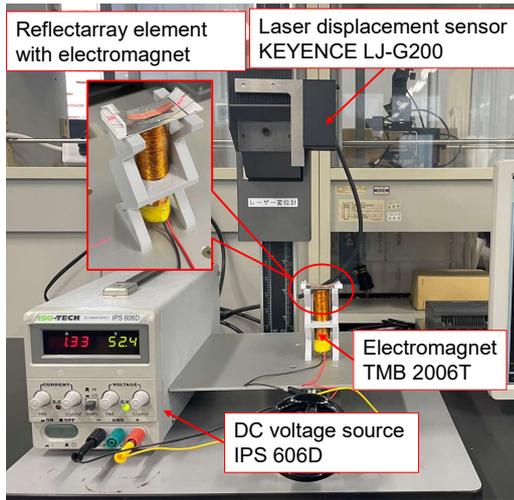


図2 電磁石を用いたリフレクトアレー素子の機械的特性的測定系。

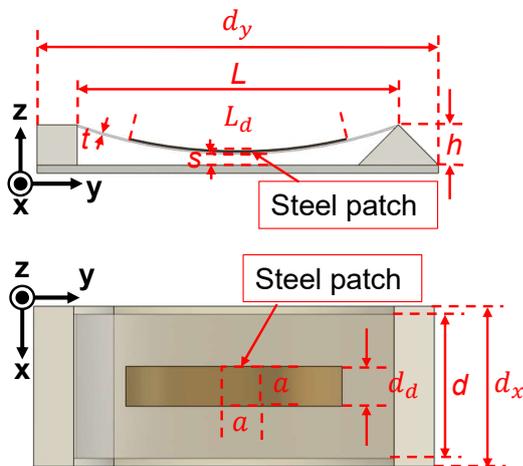


図3 リフレクトアレー素子の構造。

表1 電磁石を用いたリフレクトアレー素子のパラメータ。

周波数 f	4.4 GHz
平面波の入射角度	$(\theta, \phi) = (\theta_f, \phi_f)$
反射板の大きさ $d_x \times d_y$	20 mm \times 50 mm
ポリスチレンフィルムの長さ L	40 mm
ポリスチレンフィルムの厚み t	0.21 mm
ポリスチレンフィルムの高さ h	3 ~ 6 mm
PLA 治具の幅 d	18 mm
銅箔ストリップの長さ L_d	27 mm
銅箔ストリップの幅 d_a	5 mm
スチール片の幅・長さ a	5 mm

トロールを1ビットで行う場合、この素子を実現できる位相差は約 170° 前後であり、1ビットのリフレクトアレーに必要な位相変化量 180° を概ね満たしている。

4. 1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーの試作とその散乱特性の解明

試作した1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーを図5に示す。電磁石を用いた1ビットリコンフィギャラブルリ

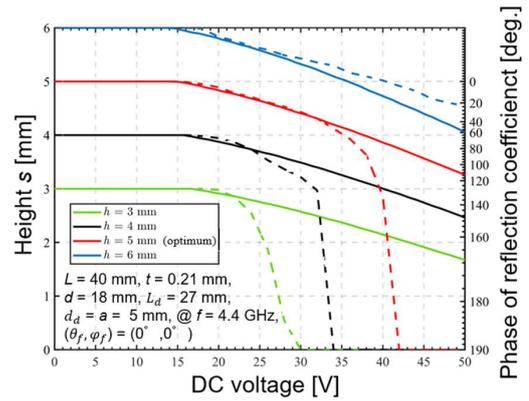


図4 電磁石への印加電圧とリフレクトアレー素子の高さとの関係。

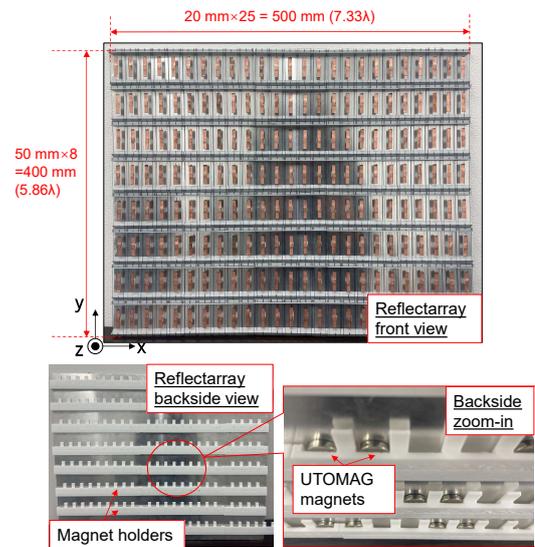


図5 1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーの試作品。

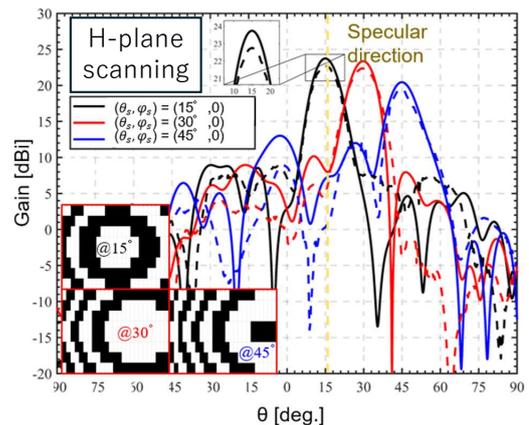


図6 1ビットリコンフィギャラブルリフレクトアレーのH面における動作利得パターン。

フレクトアレーの実現には、多数の電磁石への印加電圧をコントロールする制御回路が必要であるが、本報告ではこのリコンフィギャラブルリフレクトアレーのコンセプトを実証することが目的であるので、電磁石の代わりに磁石の装荷の有無で素子高さをコントロールするような仕組みを採用した。試作した1

ビットリコンフィギャラブルリフレクタレーは $8 \times 25 = 200$ 素子からなり、反射板の裏側に磁石をはめ込むホルダーが装着されている。裏側に磁石をはめ込んだ素子は反射板に吸着され、そうでない素子はもとの高さを保ったままとなる。

試作した 1 ビットリコンフィギャラブルリフレクタレーの H 面における動作利得パターンを図 6 に示す。実線は電磁界シミュレータの FEKO を用いたモーメント法により得られた数値シミュレーション結果、破線は測定結果である。図中には、主ビームの方向に対応したリフレクタレー素子の状態が示されており、素子が吸着された状態は白色、素子がもとの高さを保った状態は黒色となっている。図 6 から、試作したリフレクタレーの動作利得パターンと数値シミュレーション結果はよく一致している。この 1 ビットリコンフィギャラブルリフレクタレーの開口効率は 34% 程度であり、位相器の挿入損失がない分、他の 1 ビットリコンフィギャラブルリフレクタレーよりも優れた効率が実現できている [5], [27], [28]。

5. ま と め

本報告では、電磁石を用いた 1 ビットリコンフィギャラブルリフレクタレーについて述べた。まず、電磁石を用いたリフレクタレー素子の構造や動作原理を述べた。次に、電磁石に対する印加電圧と、リフレクタレー素子の高さ、およびその散乱特性との関係を明らかにした。電磁石を用いたリフレクタレー素子の吸着実験を行い、印加電圧と素子高さの関係が非線形であること、および吸着途中の高さを維持することが困難であることが分かった。このような測定結果に基づく気最後に、リコンフィギャラブルリフレクタレーを試作し、その散乱特性を実験的に明らかにする。

本報告では、モーメント法およびそのアレーアンテナへの応用に関して述べた。モーメント法を用いたアレーアンテナの数値解析の利点について述べ、有限アレーと無限アレーのモデルの比較を行った。有限サイズのアレーアンテナの数値解析法として、Richmond のモーメント法、無限サイズのアレーアンテナの数値解析法として周期グリーン関数を用いたモーメント法にそれぞれ着目し、その原理や定式化について述べた。最後に、アレーアンテナとリフレクタレーの数値解析結果を示し、それらの有効性を明らかにした。

謝辞 本研究開発は総務省の電波資源拡大のための研究開発 (JPJ000254) として実施された。本研究の遂行に際し、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究のメンバーから有益な助言を頂いたのでここに謝意を表する。

文 献

[1] 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.

[2] D. M. Pozar and T. A. Metzler, "Analysis of a reflectarray antenna using microstrip patches of variable size," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 657-658, April 1993.

[3] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," NASA, Jet Propulsion Laboratory, TDA Progress Report 42-120, Feb. 1995, pp. 153-173.

[4] J. Huang and J. A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, John Wiley and

Sons, 2008.

[5] H. Kamoda, T. Iwasaki, J. Tsumochi, T. Kuki, and O. Hashimoto, "60-GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 7, pp. 2524-2531, July 2011.

[6] F. Venneri, S. Costanzo and G. Di Massa, "Reconfigurable aperture-coupled reflectarray element tuned by single varactor diode," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 2, pp. 68-69, Jan. 2012.

[7] F. Venneri, S. Costanzo and G. Di Massa, "Design and validation of a reconfigurable single varactor-tuned reflectarray," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 635-645, Feb. 2013.

[8] T. Makdissy, R. Gillard, E. Fourn, E. Girard and H. Legay, "Phase-shifting cell loaded with variable capacitances for dual linearly polarized reflectarrays," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 21, pp. 1319-1320, Oct. 2012.

[9] T. Makdissy, R. Gillard, E. Fourn, E. Girard and H. Legay, "Phase-shifting cell for dual linearly polarized reflectarrays with reconfigurable potentialities," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 11-14, 2014.

[10] H. Yang, F. Yang, S. Xu, M. Li, X. Cao, and J. Gao, "A 1-Bit multipolarization reflectarray element for reconfigurable large-aperture antennas," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 581-584, 2017.

[11] M.R. Chaharmir, I. Shaker, M. Cuhaci and A. Sebak, "Mechanically controlled reflectarray antenna for beam switching and beam shaping in millimetre-wave applications," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 7, pp. 591-592, April 2003.

[12] V. F. Fusco, "Mechanical beam scanning reflectarray," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 11, pp. 3842-3844, Nov. 2005.

[13] V. Srinivasan and V.F. Fusco, "Circularly polarised mechanically steerable reflectarray," *IEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, vol. 152, no. 6, pp. 511-514, Dec. 2005.

[14] X. Yang, S. Xu, F. Yang, M. Li, Y. Hou, S. Jiang, and L. Liu, "Broadband high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna using mechanically rotational elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 8, pp. 3959-3966, Aug. 2017.

[15] X. Yang, S. Xu, F. Yang, M. Li, H. Fang, Y. Hou, S. Jiang, and L. Liu, "A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, pp. 555-558, April 2018.

[16] G.-B. Wu, S.-W. Qu, and S. Yang, "Wide-angle beam-scanning reflectarray with mechanical steering," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 1, pp. 172-181, Jan. 2018.

[17] M. I. Abbasi, M. H. Dahri, M. H. Jamaluddin, N. Seman, M. R. Kamarudin, and N. H. Sulaiman, "Millimeter wave beam steering reflectarray antenna based on mechanical rotation of array," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 145685-145691, 2019.

[18] A. Hu, K. Konno and Q. Chen, "A 2-bit 3-D-printed reflectarray antenna using cylindrical rotation-based phase-tunable elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 10, pp. 7774-7782, Oct. 2024.

[19] A. Hu, K. Konno, Q. Chen, and T. Takahashi, "A highly efficient 1-bit reflectarray antenna using electromagnets-controlled elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 1, pp. 506-517, Jan. 2024.

[20] A. Hu, K. Konno, and Q. Chen, "On the field measurement of a highly efficient reflectarray antenna using electromagnets," *Proc. iWAT2024*, pp.-, April, 2024.

[21] A. Hu, K. Konno, and Q. Chen, "A novel electromagnets-controlled reflectarray element employing 1-bit position locking system with low power consumption," *IEICE Commun. Express*, vol. 13, no. 7, pp. 285-288, July 2024.

[22] TESLA TMB-2006T Datasheet. Accessed: Sep. 5, 2023. [Online]. Available: <https://www.teslanet.co.jp/wp-content/uploads/2018/03/TMB2006T.pdf>

[23] N. Ida, *Engineering Electromagnetics*, 3rd ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2015, ch. 9

[24] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Macmillan, New York, 1968.

[25] M. G. Floquet, "Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques," *Annale École Normale Supérieure*, pp. 47-88,

1883.

- [26] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [27] J. Han, L. Li, G. Liu, Z. Wu and Y. Shi, "A wideband 1 bit 12×12 reconfigurable beam-scanning reflectarray: design, fabrication, and measurement," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 1268-1272, June 2019.
- [28] M. Riel and J. -J. Laurin, "Design of an electronically beam scanning reflectarray using aperture-coupled elements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 5, pp. 1260-1266, May 2007.