

[特別講演] ミリ波伝搬環境改善のための液晶リフレクタレーの開発

陳 強[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科
仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05
E-mail: †qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

あらまし 本報告では、本研究グループにおける液晶を用いた再構成が可能なリフレクタレーアンテナに関する研究開発の成果を紹介する。液晶のアレー素子の低損失、高速応答の設計法や RF 帯の液晶誘電率測定法、二次元ビームステアリングが可能なバイアス回路の設計などについて述べる。

キーワード リフレクタレー、液晶、誘電率、ビームステアリング、伝搬損失

[Invited Talk] Development of Liquid Crystal-Based Reflectarray for Reducing Path Loss of Millimeter-wave

Qiang CHEN[†]

[†] School of Engineering, Tohoku University
Aramaki Aza Aoba 6-6-05, Aoba-ku, Sendai
E-mail: †qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract This report presents our research on the development of liquid crystal-based beam-steerable reflectarray antennas. The study focuses on several key challenges, including the design of the liquid-crystal based unit cell with low reflection loss and fast response time, accurate characterization of the dielectric constant of liquid crystals at RF frequencies, and the development of a bias circuit network enabling two-dimensional beam steering.

Key words Reflectarray, liquid crystal, dielectric constant, beam steering, path loss

1960年代に発表された Berry らの論文では、開口導波管をリフレクタレーの素子とし、導波管の長さを変えることにより、導波管開口面における反射係数を制御し、リフレクタレーに入射する波を所望な方向に反射させることに成功した [1]。また、導波管内にダイオードを RF スイッチとして設けることにより、導波管開口面における反射係数をチューニングし、ビームの反射方向をアクティブに制御することも示した。その後、Huang らは、軽量でマイクロストリップタイプの平面型リフレクタレーを提案した [2]。当時のリフレクタレーは、主にパラボラアンテナの反射鏡の平面化のために開発された。また、フェーズドアレーと比較すると、移相器がなくてもビーム走査が可能のため、低コストなビームステアリングアンテナとして注目された [3]。2000年代においては、ミリ波移動通信の研究開発が本格化され、建物や地形などによる遮蔽や、反射と回折による多重反射によるミリ波の伝搬問題が研究課題になった。ミリ波の伝搬環境を改善するための手段として、伝搬路にリフレクタレーを設置し、リフレクタレーの非鏡面反射の特性を利用し、建物の遮蔽による不感地帯に電波を散乱させる手法が多く検討された [4]-[9]。また、移動通信の

動的電波環境を改善するために、伝搬チャンネルの情報に基づいて、入射波を瞬時に所望の方向へ散乱させる適応型再構成可能なリフレクタレーの研究が行われた。再構成可能なリフレクタレーは、反射位相が可変なアレー素子から構成され、各素子の反射位相を制御することにより、リフレクタレーのバイスタティック散乱特性が時々刻々に変化できる。マイクロストリップの平面型構造のアレー素子にダイオードやバラクターのような半導体素子を実装し、外部バイアス電圧制御により、アレー素子の反射位相を変える手法がよく用いられている [10]。このようなリフレクタレーは、研究分野によって、メタサーフェス (metasurface)、インテリジェント反射平面 (Intelligent Reflecting Surface, IRS)、または再構成可能なインテリジェントサーフェス (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) と呼ばれる [11]。半導体素子を用いた再構成可能なリフレクタレーは、バイアス電圧による反射係数の応答が高速だが、高周波における半導体素子のオーム損失が大きいとの問題がある。また、半導体素子是非線形的な電気特性を有するため、高調波が発生しやすく、電波散乱体としての移動通信の電波環境における応用が困難である。

近年、液晶技術を用いた再構成可能なリフレクタレーの研究が注目されている。液晶は線形媒質であり、バイアス電圧によって誘電率を可変できるため、無線通信環境におけるリフレクタレーの位相可変材料として利用できる。また、成熟した液晶ディスプレイの生産設備を利用すれば、TFT制御の液晶リフレクタレーを大規模でかつ低コストで製造できる。私どもの研究グループは、総務省「電波資源拡大のための研究開発：基地局端末間の協調による動的ネットワーク制御に関する研究開発（2021～2024）」に参加し、基地局端末間の協調による動的ネットワーク制御に関する研究開発に取り組んでいた。本研究プロジェクトでは、液晶を誘電体としたマイクロストリップ構造の単位セルを設計・製作し、それを用いたE面とH面の2次元ビームステアリングが可能な液晶リフレクタレーの試作に成功した[12]～[14]。また、ミリ波における液晶材料の測定システムを構築したうえ、液晶材料の電位特性を測定・評価し、ミリ波応用に適した液晶材料の検討を行った[15],[16]。さらに、リフレクタレーの反射損失を低減するため、新たな液晶セルの構造を提案し、リフレクタレーの導電損失の低減を実現した[17],[18]。本報告では、これらの成果を紹介し、特にアレー素子のミリ波帯における低損失化と液晶応答の高速化設計法やミリ波帯液晶材料の誘電率測定法、二次元ビームステアリングが可能な液晶バイアス回路の設計法の開発について述べる。

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。This research was supported by the Ministry of Internal Affairs and Communications in Japan (JPJ000254).

文 献

[1] D. Berry, R. Malech and W. Kennedy, "The reflectarray antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 645-651, November 1963, doi: 10.1109/TAP.1963.1138112.

[2] J. Huang, "Microstrip reflectarray," *Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest*, London, ON, Canada, 1991, pp. 612-615 vol.2, doi: 10.1109/APS.1991.174914.

[3] John Huang, J. A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, Wiley-IEEE Press, 2007.

[4] R. D. Javor, Xiao-Dong Wu and Kai Chang, "Beam steering of a microstrip flat reflectarray antenna," *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Seattle, WA, USA, 1994, pp. 956-959 vol.2, doi: 10.1109/APS.1994.407945.

[5] D. M. Pozar, S. D. Targonski and H. D. Syrigos, "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 45, no. 2, pp. 287-296, Feb. 1997, doi: 10.1109/8.560348.

[6] L. Li et al., "Frequency Selective Reflectarray Using Crossed-Dipole Elements With Square Loops for Wireless Communication Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 89-99, Jan. 2011, doi: 10.1109/TAP.2010.2090455.

[7] Q. Chen et al., "Experimental investigation of elimination blindness propagation channel using reflectarray," *Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, USA, 2012, pp. 1-2, doi: 10.1109/APS.2012.6347942.

[8] Q. Chen et al., "Measurement of reflectarray for improving MIMO channel capacity of outdoor NLOS radio channel," *Proceedings of 2013 IEEE International Symposium on Antennas*

and Propagation, Orlando, FL, USA, 2013, pp. 870-871, doi: 10.1109/APS.2013.6711094.

[9] Q. -Y. Chen, S. -W. Qu, J. -F. Li, Q. Chen and M. -Y. Xia, "An X-Band Reflectarray With Novel Elements and Enhanced Bandwidth," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 317-320, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2249652.

[10] H. Kamoda, T. Iwasaki, J. Tsumochi, T. Kuki and O. Hashimoto, "60-GHz Electronically Reconfigurable Large Reflectarray Using Single-Bit Phase Shifters," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 7, pp. 2524-2531, July 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2152338.

[11] X. Yuan, Y. -J. A. Zhang, Y. Shi, W. Yan and H. Liu, "Reconfigurable-Intelligent-Surface Empowered Wireless Communications: Challenges and Opportunities," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 2, pp. 136-143, April 2021, doi: 10.1109/MWC.001.2000256.

[12] X. Li, H. Sato, Y. Shibata, T. Ishinabe, H. Fujikake, and Q. Chen, "Development of Beam Steerable Reflectarray With Liquid Crystal for Both E-Plane and H-Plane," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26177-26185, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3155544.

[13] X. Li, H. Sato, H. Fujikake, and Q. Chen, "Development of Two-Dimensional Steerable Reflectarray With Liquid Crystal for Reconfigurable Intelligent Surface Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 3, pp. 2108-2123, 2024. DOI: 10.1109/TAP.2024.3354054.

[14] H. Sato, R. Matsuda, H. Fujikake and Q. Chen, "Low-Sidelobe Design of Intelligent Reflecting Surface Using Liquid Crystal," *Proceedings of 2024 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Incheon, Korea, 2024, doi: 10.1109/ISAP62502.2024.10846349.

[15] T. Fujisawa, H. Sato, W. Ishikawa, H. Toshima, M. Nakatani, T. Ishinabe, H. Fujikake, and Q. Chen, "Advanced Liquid Crystals with Low Loss Tangent and Fast Response for Intelligent Reflecting Surface Antennas," *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, vol. 12, no. 4, pp. 218-225, 2024. DOI: 10.3169/mta.12.218.

[16] T. Fujisawa, et al, "Physical Properties of Liquid Crystals in GHz Band," *Proceedings of 2025 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Fukuoka, 2025.

[17] Y. Cui, H. Sato, Y. Shibata, T. Ishinabe, H. Fujikake and Q. Chen, "A Low-Cost Structure for Reducing Reflection Loss in Intelligent Reflecting Surface of Liquid Crystal," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 12, pp. 3027-3031, Dec. 2023, doi: 10.1109/LAWP.2023.3309304.

[18] Y. Cui, H. Sato, K. -D. Xu, H. Fujikake and Q. Chen, "A Method of Dual-Bias Voltage Supply for Reducing Reflection Loss in Reconfigurable Intelligent Surfaces of Liquid Crystal," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 3529-3533, Nov. 2024, doi: 10.1109/LAWP.2024.3398736.