

응답시간이 개선된 액정 기반 능동 반사 배열 안테나 단위 셀 구조

Liquid Crystal-Based Reconfigurable Reflectarray Antenna Unit Cell Structure with Improved Response Time

신 의 호 · 오 정 석

Euiho Shin · Jungsuek Oh

요 약

본 논문은 액정 기반 능동 반사 배열에 사용되는 단위 셀 구조를 제안하여 응답시간의 불균형을 개선한다. 고이득 빔 조향 안테나로 널리 쓰이는 액정 기반 반사 배열 안테나의 종래 단위 셀은 액정 분자의 정렬 방식에서 상승 및 하강시간이 간 상이하여 응답시간 불균형이 존재했다. 액정과 맞닿은 금속층을 분리하여 바이어스 전압을 4개 인가하여 수직 전기장 뿐만 아니라, 수평 전기장도 형성하였다. 이로써 상승 및 하강시간에서 액정 분자가 정렬되는 방식을 일원화하여 하강시간을 개선하였다. 측정 결과, 하강시간이 기존 구조에 비해 약 1/3로 감소한 것을 확인하여 불균형 해소 가능성을 검증하였다.

Abstract

This paper presents a unit cell structure for liquid crystal (LC)-based reconfigurable reflective arrays, aimed at improving the imbalance in response time. Conventional LC-based reflectarray antenna unit cells, which have been widely used as high-gain beam-steerable antennas, have an imbalance in response time because of different alignment of LC molecules during the rise and decay times. By separating the metal layers in contact with the LC layer and applying four bias voltages, we generated both horizontal and vertical electric field. Accordingly, the decay time was improved by unifying the methods in which the LC molecules were aligned during the rise and decay times. Our measurements confirm that the decay time can be reduced to approximately 1/3 compared to the conventional structure, indicating the possibility of resolving the imbalance.

Key words: Beam Steering, Liquid Crystal, Reflectarray Antenna, Waveguide Simulator

I. 서 론

5G 통신의 출현과 급속한 발전에 따라 고이득 빔 조향 안테나의 수요가 증가하고 있다. 반사 배열 안테나는 안

테나의 고이득 특성을 얻을 수 있고, 저비용, 저중량, 제작의 용이함, 얇은 두께 등의 장점이 있기 때문에 널리 사용되어 왔다^{[1]~[4]}. 반사 배열 안테나는 피드 안테나에서 방사된 전파의 위상이 반사 배열의 각 단위 셀에서 적절

「이 연구는 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업(No.915021201).」

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소(Institute of new Media and Communications, Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

· Manuscript received September 2, 2022 ; Revised October 18, 2022 ; Accepted January 20, 2023. (ID No. 20220902-068)

· Corresponding Author: Jungsuek Oh (e-mail: jungsuek@snu.ac.kr)

하게 보상이 되어 이득이 증가하는 원리로 작동한다. 반사 배열에 액정을 주입하여 빔 조향까지 가능하게 하는 안테나에 관한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다^{[4]~[6]}. 단위 셀에 주입된 액정 분자의 배향 방향이 바뀌면 액정 유전율이 변하고, 단위 셀의 반사 특성이 변화하게 되며, 이로써 반사 배열의 반사 특성이 변화하게 되어 빔 조향이 가능하게 된다.

그러나 기존 액정 기반 단위 셀 내부에 있는 액정 분자의 방향이 바뀌는 응답시간에 불균형이 있으므로 고이득 빔 조향 안테나가 안정적으로 작동하기에는 어려움이 있다. 본 논문에서는 기존 구조에 있는 응답시간 불균형을 해소하여 액정 기반 안테나의 상용화에 이바지하고자 한다.

II. 종래 액정 기반 단위 셀 구조 및 한계

액정 분자의 방향이 변화하면서 반사 배열의 반사 특성이 변화하게 되어 빔 조향을 할 수 있다. 액정 분자의 방향이 수평에서 수직으로 정렬되는 시간을 상승시간(t_{rise}), 수직에서 수평으로 정렬되는 시간을 하강시간(t_{decay})이라고 각 응답시간을 정의한다. 이는 각각 그림 1(a) 및 그림 1(b)에 해당한다.

종래의 구조에서는 그림 2(a)와 같이 상승시간에 액정 층과 닿아 있는 상부 및 하부 금속에 바이어스 전압 V_1 , 0 V가 각각 인가되어 그림 1(a)와 같이 액정 분자가 수직 방향으로 배향되도록 한다. 반면, 하강 시간 동안에는 단위 셀에 그림 2(b)와 같이 두 금속 모두 전압 0 V를 인가하여 액정 분자는 폴리이미드로 이루어진 배향막과 금속의 잔존 전압에 의해 그림 1(b)와 같이 수평으로 정렬된다. 그림 1의 구조와 인가된 바이어스 전압으로부터, 종



그림 1. (a) 상승시간 및 (b) 하강시간에서의 액정 분자 방향 변화

Fig. 1. Change of LC molecule alignment at (a) rise time and (b) decay time.

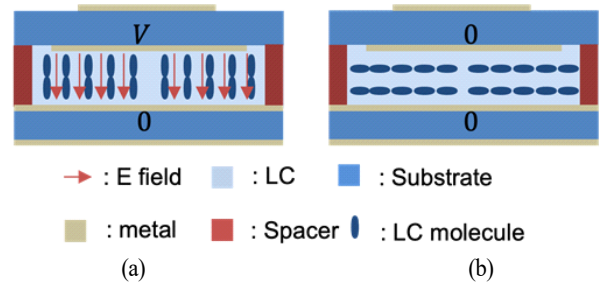


그림 2. 종래의 액정 기반 반사 배열 단위 셀 구조에서의 (a) 상승시간 및 (b) 하강시간에서의 바이어스 전압 및 액정 분자 배열 방향

Fig. 2. Bias voltage and LC molecule alignment at (a) rise time and (b) decay time in a conventional LC-based reflectarray unit cell structure.

래의 액정 기반 단위 셀에서 상승 및 하강 시간은 서로 다른 변수에 의존함을 알 수 있다. 상승 및 하강 시간을 결정하는 식은 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$t_{rise} = \frac{t_0}{\left| \frac{V_1}{V_{th}} - 1 \right|} \quad (1)$$

$$t_{decay} = \frac{t_0}{\left| \frac{V_{rem}}{V_{th}} - 1 \right|}$$

$$t_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{\kappa_{11} \pi^2} \quad (2)$$

V_{rem} 은 바이어스 전압이 제거된 후 잔존 전압을, V_{th} 은 액정 분자가 회전하기 위한 문턱전압을, γ_1 은 LC의 회전 점도(rotation viscosity)를, d 는 액정 층의 두께, κ_{11} 은 토크^{[7],[8]}를 나타낸다. 상승시간은 식 (1)에서 볼 수 있듯 동일한 단위 셀 구조 및 동일한 종류의 액정을 사용했다 고 가정했을 때 인가된 바이어스 전압의 크기에 따라서 달라진다. 이와 다르게 하강시간은 같은 가정하에서 잔존 전압의 크기에 따라 결정된다.

이처럼 상승 및 하강시간을 결정하는 요소가 다르고, ms 단위의 상승시간 대비, 하강시간은 분 단위로, 상승 및 하강시간 길이가 현저하게 다르다. 이러한 종래의 단위 셀을 빔 조향 가능한 반사 배열 안테나에 사용하기에는 하강시간에 해당하는 빔 조향 시간이 과도하게 오래

결린다는 단점이 있다. 응답시간의 균형을 이루기 위해서 새로운 단위 셀 구조를 제안한다.

III. 응답시간 불균형 개선을 위한 구조 제안

제안하는 단위 셀 구조는 종래의 구조에서 수직 전기장뿐만 아니라, 수평 전기장도 형성될 수 있게 하였다. 수평 전기장을 형성하기 위해 액정과 접촉하고 있는 두 개의 금속층을 각각 두 부분으로 나누어 그림 3과 같이 바이어스 전압을 인가할 수 있는 피드를 2개에서 4개로 증가시켰다. 따라서 제안된 구조에서는 4개의 금속에 바이어스 전압을 적절하게 인가하여 액정 분자 정렬에 걸리는 시간을 감소시킬 수 있다. 액정 분자를 수직으로 정렬시키는 상황에 해당하는 그림 3(a)는 그림 2(a)에서 형성된 전기장과 큰 차이가 없다. 위의 두 금속에 바이어스 전압 V_1 을 인가하고, 아래 두 금속을 접지시키면 수직인 전기장이 형성된다. 기존 구조와 다른 점은 좌측의 두 금속에 바이어스 전압 V_2 를, 우측의 두 금속을 접지시키면 수평 전기장이 형성되고, 이에 따라 형성된 전기장에 의해 액정 분자가 수평으로 정렬된다는 점이다. 이는 배향막과 잔존 전압에 의존했던 종래의 구조와 다르므로 하강 시간이 식 (2)가 아닌 식 (1)에 의해서 계산된다. 다만 기판 너비 및 기둥 두께에 의해서 수평 및 수직 전기장의 강도가 다르므로 식 (1)에서 V_1 을 V_2 로 바꾸는 것은 무리가

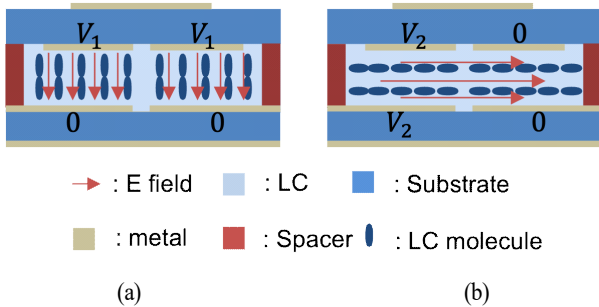


그림 3. 제안하는 액정 기반 반사 배열 단위 셀 구조에서의 (a) 상승시간 및 (b) 하강시간에서의 바이어스 전압 및 액정 분자 배열 방향

Fig. 3. Bias voltage and LC molecule alignment at (a) rise time and (b) decay time in a proposed LC-based reflectarray unit cell structure.

있다. 따라서 기판 너비 및 기둥 두께를 고려하여 식을 변경할 필요가 있다. 상측 기판 V_2 금속판에서 하측 기판 0 V 금속판으로 형성되는 전기장과 하측 기판 V_2 에서 상측 기판 0 V로 형성되는 전기장을 고려하면 근사하면 식 (3)과 같이 변경될 것으로 예상된다. 해당 식에서 s 는 기판 너비를 나타낸다. 이에 따라 상승 및 하강시간 간 불균형이 개선된다.

$$t_{rise} = \frac{t_0}{\left| \frac{2dV_2}{sV_{th}} - 1 \right|} \quad (3)$$

IV. 측정 결과

4-1 측정 샘플

단위 셀은 28 GHz 기준으로 설계되었다. 그림 4는 설계된 액정 기반 반사 배열 단위 셀의 분해도이며, 크기는 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ ($0.35 \lambda \times 0.35 \lambda$)이다. 그림 3에서와 다르게 상부 기판의 상부에 있는 금속판도 두 개로 분할되어 있는데, 이는 단위 셀이 높은 반사 계수를 가지도록 하여 전체 이득을 증가시키기 위함이다. 금속판 사이의 너비는 0.1 mm이다. 상부 및 하부 기판은 Taconic TLY를 사용하였으며, 액정 층은 $250 \mu\text{m}$ 으로 설정하였다.

그림 5는 설계된 액정 기반 반사 배열 단위 셀의 샘플이다. 해당 샘플의 제조 공정은 다음과 같다^[9]. 상하 기판에 polyimide를 사용하여 100 nm 두께의 배향막을 spin

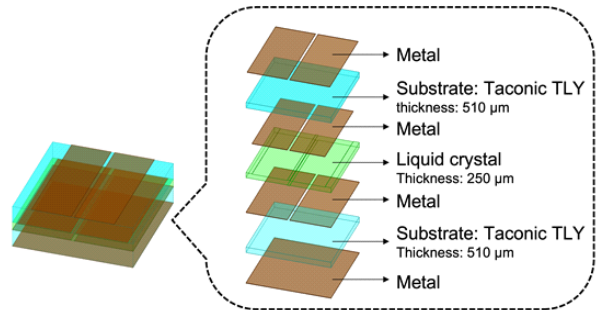


그림 4. 설계된 액정 기반 반사 배열 단위 셀 분해도

Fig. 4. Explosion view of the designed LC-based reflectarray unit cell.

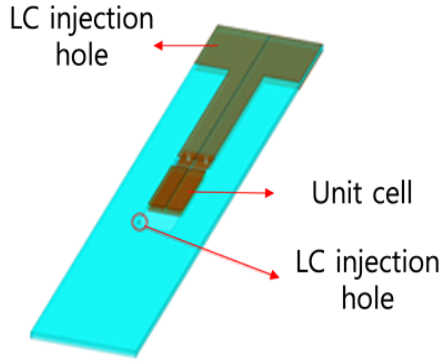


그림 5. 설계된 액정 기반 반사 배열 단위셀 샘플
Fig. 5. Prototype of the designed LC-based reflectarray unit cell.

coater를 이용하여 형성한다. $250\ \mu\text{m}$ 의 기판에 단위 셀이 있는 부분에 단위 셀 크기의 구멍을 내어 상하 기판 사이의 기둥으로 사용한다. 상하 기판 및 기둥으로 사용되는 기판을 에폭시를 사용하여 부착한 후 주입기를 사용하여 LC를 구조 내부로 주입한다. 샘플에 있는 4개의 피드를 통해서 상승 및 하강시간에 다르게 전압이 인가된다.

4.2 측정 방법 및 결과

도파관 시뮬레이터는 도파관 끝에 두 개의 단위 셀을 배치하여 반사 배열 단위 셀의 반사 계수를 측정할 때 주로 사용된다^{[10]~[13]}. 도파관 끝에 배치하는 샘플은 두 개의 단위 셀이므로 단위 셀 간 상호 간섭 효과도 측정 결



그림 6. 도파관 시뮬레이터로 측정 중인 단위 셀
Fig. 6. Unit cells being measured by waveguide simulator.

과에 포함된다. 그림 6은 WR-28 도파관 끝에 단위 셀을 위치시킨 것이며, 도파관은 VNA 포트에 연결되어 있다. VNA를 spectrum analyzer와 같이 활용하여 28 GHz에서 S_{11} 를 10 ms 주기로 측정하였고, 이 과정에서 응답 시간 불균형이 개선되는지 여부를 확인하였다. 상승시간에 해당하는 바이어스 전압을 단위 셀에 5초 동안 인가하여 평형 상태에 이르게 한 후 하강시간에 해당하는 바이어스 전압을 인가하여 S_{11} 임피던스를 측정하였다. 그림 3의 방식으로 바이어스 전압을 인가하여 상승 및 하강 시간을 측정하여 제안된 구조에 대한 실험을 하였다. 또한, 액정 층 상부 및 하부의 각 두 개씩의 금속을 각각 하나로 취급하여 그림 2와 같이 바이어스 전압을 인가하면 종래의 구조에 대한 실험이 가능하므로 이를 비교군으로 설정하였다. 식 (1)과 식 (3)에서의 차이를 고려하여 V_1 은 20 V, V_2 은 30 V로 설정하였다.

측정 결과, 기존 구조에 비해 개선된 구조에서 하강시간이 약 1/3로 감소한 것을 볼 수 있었으며, 이는 응답 시간 간 불균형이 개선되었다는 것을 의미한다. 그림 7은 시간에 따른 S_{21} 임피던스의 위상을 측정한 것이다. 상승 시간은 종래 구조와 제안한 구조가 같으나, 하강시간은 제안된 구조의 경우에 개선된 것을 볼 수 있다. 인가되는 전압 V_2 를 안전하게 증가시킬 수 있다면 하강시간을 더욱 감소시킬 수 있을 것이다.

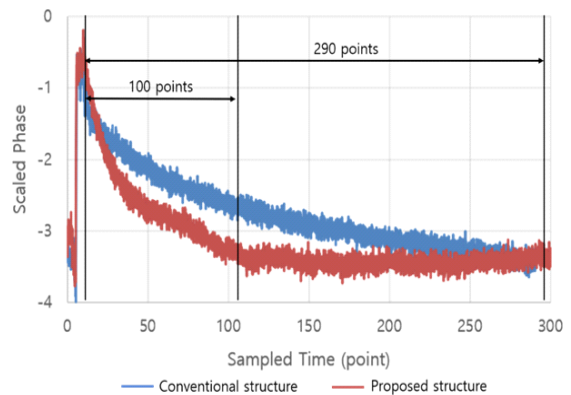


그림 7. 종래 및 제안한 구조의 응답시간 비교
Fig. 7. Comparison of response time of conventional and proposed structures.

V. 결 론

본 논문에서는 액정 기반 반사 배열 단위 셀 구조를 제안하여 응답시간 불균형을 완화하고, 액정 기반 안테나 상용화에 이바지하였다. 기존 액정 기반 단위 셀 구조는 상승 및 하강시간에 액정 분자가 정렬하는 방식이 달라 응답시간에 불균형이 있었다. 이를 개선하기 위해 액정에 맞닿은 금속을 각각 둘로 분리하여 전압을 인가할 수 있는 바이어스 라인을 4개로 증가시켜 수평 전기장을 만들어낼 수 있는 구조를 제안하였다. 측정 결과, 하강시간이 기존 구조에 비해 1/3로 감소하여 응답시간 불균형을 해소할 수 있는 가능성을 확인하였다. 본 논문에서 설계된 구조는 액정 기반 반사 배열 안테나의 상용화에 이바지할 수 있을 것이다.

References

- [1] J. H. Yoon, Y. J. Yoon, "Bandwidth enhancement of single-layer microstrip reflectarrays with multi-dipole elements," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 2, pp. 130-139, Apr. 2019.
- [2] H. G. Kim, J. Y. Kim, and J. S. Oh, "Design and implementation of an X-band liquid-crystal-based active reflectarray antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 10, pp. 878-887, Oct. 2021.
- [3] J. Lee, H. Kim, and J. Oh, "Large-aperture metamaterial lens antenna for multi-layer MIMO transmission for 6G," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20486-20495, Feb. 2022.
- [4] H. Kim, J. Kim, and J. Oh, "Liquid-crystal-based X-band reactively loaded reflectarray unit cell to reduce reflection loss," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 1898-1902, Oct. 2021.
- [5] G. Perez-Palomino, M. Barba, J. A. Encinar, R. Cahill, R. Dickie, and P. Baine, et al., "Design and demonstration of an electronically scanned reflectarray antenna at 100 GHz using multiresonant cells based on liquid crystals," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3722-3727, Aug. 2015.
- [6] W. Hu, M. Y. Ismail, R. Cahill, J. A. Encinar, V. F. Fusco, and H. S. Gamble, et al., "Liquid-crystal-based reflectarray antenna with electronically switchable monopulse patterns," *Electronics Letters*, vol. 43, no. 14, pp. 744-745, Jul. 2007.
- [7] Y. B. Kim, I. K. Hur, "High speed response time of nematic liquid crystal mixtures for LCD monitor and TV applications," *Journal of Information Display*, vol. 2, no. 3, pp. 32-38, Nov. 2001.
- [8] P. Yaghmaee, "Reconfigurable tunable microwave devices using liquid crystal," Ph.D. dissertation, University of Adelaide, Australia, 2014.
- [9] W. Hu, R. Cahill, J. A. Encinar, R. Dickie, H. Gamble, and V. Fusco, et al., "Design and measurement of reconfigurable millimeter wave reflectarray cells with nematic liquid crystal," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 10, pp. 3112-3117, Oct. 2008.
- [10] M. Y. Ismail, M. I. Abbasi, "Performance improvement of reflectarrays based on embedded slots configurations," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 14, pp. 67-78, Jun. 2010.
- [11] R. Marin, A. Mössinger, J. Freese, and R. Jakoby, "Characterization of 35 GHz tunable reflectarray unit-cells using highly anisotropic liquid crystal," in *Proceedings of the German Microwave Conference- GeMIC 2006*, Karlsruhe, Mar. 2006.
- [12] M. Inam, M. Y. Ismail, "Analytical model and practice validation of phase variation of reflect array antenna," *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 225-232, 2013.
- [13] H. I. Malik, M. Y. Ismail, S. R. Masrol, and S. Adnan, "Reflection phase analysis of reflectarray antenna based on paper substrate materials," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 13, no. 2, pp. 766-772, Feb. 2019.

신 의 호 [서울대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0528-886X>



2020년 2월: 서울대학교 전기정보공학부
산업공학과 (공학사)

2020년 3월~현재: 서울대학교 전기정보
공학부 석·박사통합과정

[주 관심분야] Metasurface/Metamaterial, DOA
Estimation, Deep Learning

오 정 석 [서울대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2156-4927>



2002년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학
사)

2007년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학
석사)

2012년 8월: 미시간대학교 전기공학과 (공
학박사)

2018년 3월~현재: 서울대학교 전기정보
공학부 부교수

[주 관심분야] Antenna, Metasurface/Metamaterial, RF Circuit/System,
Wave Propagation Analysis/Modeling