

밀리미터파 통신 환경 개선을 위한 이산화바나듐 스위치 기반 저비용 이중 편파 지능형 반사 표면

김정현*, 이민재, 임성준

중앙대학교

wjdgus6748@cau.ac.kr, iamlmj720@gmail.com, sungjoon@cau.ac.kr

Low-Cost Dual-Polarization Intelligent Reflective Surface Based on Vanadium Dioxide Switches for Improving Millimeter-Wave Communication Environments

Junghyeon Kim, Minjae Lee, Sungjoon Lim

Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 밀리미터파 통신 환경 개선을 위해 이산화바나듐 (VO_2) 스위치 기반 저비용 이중 편파 지능형 반사 표면을 제안한다. VO_2 스위치 기반 지능형 반사 표면은 60 GHz에서 입사된 전자파에 대해 최대 $\pm 34^\circ$ 각도로 반사시킬 수 있으며, x -pol, y -pol에서 모두 동작하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안된 지능형 반사 표면은 밀리미터파 통신 환경 개선을 위한 저비용 솔루션으로 활용될 수 있다.

I. 서론

밀리미터파 통신은 초고속, 초저지연 특성을 바탕으로 자율주행차, 가상현실, 증강현실 등 다양한 RF 어플리케이션을 확장할 것으로 예상된다. 하지만 밀리미터파 통신은 높은 동작 주파수로 인해 전자파의 직진성과 경로 손실이 발생하면서 비가시선 영역에서의 통신이 어려워진다는 문제가 발생한다. 이러한 한계점을 극복하기 위해서 저궤도 위성통신, 빔포밍 배열 안테나, 지능형 반사 표면 등의 통신 시나리오가 제시되었다. 이중 지능형 반사 표면은 입사된 전자파를 다양한 각도로 반사할 수 있는 특성으로 통신 품질을 향상시킬 수 있다는 점에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 새로운 전자파 경로를 변환할 때 증폭 시스템이 필요하지 않다는 점으로 인해 실내 통신을 위한 저비용 솔루션으로 주목받고 있다.

지능형 반사 표면은 전도성 패턴과 PIN, 버랙터 다이오드와 같은 RF 스위치로 구성된 유닛 셀이 반 파장 크기로 배열된 2차원 주기 구조이다. 밀리미터파 대역과 같은 높은 주파수에서 동작하는 지능형 반사 표면 설계에는 크게 두 가지 어려움이 따른다. 첫 번째는 가변 소자의 동작 주파수 한계이다. 일반적으로 지능형 반사 표면에는 PIN 다이오드가 가변 소자로 널리 사용된다. 그러나 PIN 다이오드는 40 GHz 이상의 고주파수 대역, 특히 밀리미터파 영역에서는 적용에 한계가 있다. 이는 PIN 다이오드가 반드시 패키징 공정을 필요로 하며, 이 과정에서 발생하는 기생 인덕턴스 및 기생 커패시턴스가 고주파수에서 소자의 전기적 성능을 크게 저하시키기 때문이다. 따라서 PIN 다이오드를 활용하여 밀리미터파 대역에서 동작하는 지능형 반사 표면 구현에 어려움이 발생한다. 두 번째는 가변 소자의 가격이다. 지능형 반사 표면은 대면적으로 구현할수록 효율이 증가하기 때문에 대면적 제작이 필수적으로 요구된다[1, 2]. 그러나 대면적 지능형 반사 표면을 구현하기 위해서는 유닛 셀의 개수가 필연적으로 증가하며, 특히 밀리미터파 대역에서는 마이크로파 대역에 비해 파장이 짧아 동일 면적 내에 더 많은 유닛 셀이 필요하다. 예를 들어 150 mm × 150 mm 크기의 지능형 반사 표면을 제작한다고 할 때 10 GHz 기준 전기적 길이는 $5\lambda_0 \times 5\lambda_0$ 크기이지만 50 GHz 기준 전기적 길이는 $25\lambda_0 \times 25\lambda_0$ 크기가 된다. 이에 따라 지능형 반사 표면 구현에 필요한 가변 소자의 개

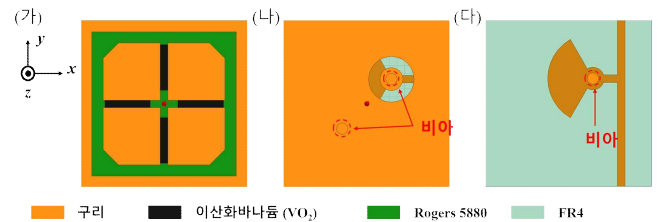


그림 1. 제안하는 VO_2 스위치 기반 지능형 반사 표면 유닛 셀 구조 (가) 위층, (나) 중간층, (다) 아래층

수가 증가하면서 제작 비용이 증가하게 된다.

이러한 한계점을 해결하기 위해 상변화 물질인 이산화바나듐 (VO_2)을 활용하여 밀리미터파, 그리고 서브테라헤르츠에서 동작하는 지능형 반사 표면 연구가 진행되었다 [3, 4]. 두 연구는 대면적 지능형 반사 표면을 저비용으로 구현할 수 있다는 가능성을 제시했지만, 단일 편파로만 동작한다는 한계점이 존재한다. 이중 편파 지능형 반사 표면은 편파 다이버시티를 제공함으로써, 두 개의 직교하는 편파 채널을 활용할 수 있어 스펙트럼 효율을 높일 수 있다. 하지만 두 편파에서 동작해야 하는 점과 최소 2개 이상의 가변 소자가 필요하다는 점으로 인해 단일 편파에 비해 설계 난이도가 높고 최소 2배 이상의 제작 비용이 들어가게 된다.

본 논문에서는 밀리미터파 통신 환경 개선을 위한 VO_2 스위치 기반 저비용 이중 편파 지능형 반사 표면을 제안한다. 제안하는 지능형 반사 표면은 56.5~65.8 GHz에서 동작하며, 60 GHz 기준 입사된 전자파에 대해 최대 $\pm 34^\circ$ 각도로 입사된 전자파를 반사시킬 수 있다. 시뮬레이션 프로그램을 통해 x -pol, y -pol에서 모두 동작하는 것을 확인하였다.

II. 본론

그림 1(가-다)는 제안하는 VO_2 스위치 기반 지능형 반사 표면 유닛 셀 구조의 위층, 중간층, 아래층을 각각 보여준다. 기판으로는 밀리미터파 대역에서 저손실 특성을 가지는 Rogers 5880을 사용하였고, 바이어싱 회로 구현을 위해 FR4 기판을 사용하였다. VO_2 는 온도에 따라서 저항이 바뀌는 상변화 물질이며, 이를 제어하는 방법으로는 DC를 인가하거나, 레이저

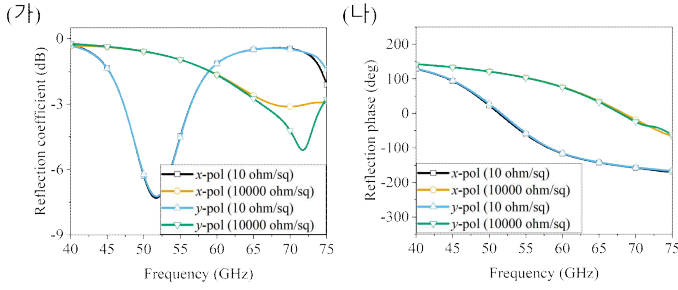


그림 2. 유닛 셀 시뮬레이션 결과 (가) 반사계수, (나) 반사 위상

를 활용하거나, 저항성 히터를 활용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 지능형 반사 표면의 특성상 실시간으로 상태를 변경해야 하는 점을 고려하여 DC 인가 방식을 선택하였다. 우리는 유닛 셀 구조에 비아를 추가하여 VO₂ 스위치를 DC로 제어할 수 있도록 설계하였다. 위층의 전도성 패턴은 네모 모양의 패치에서 십자가 모양의 슬롯을 낸 구조이며, 십자가 슬롯에 VO₂ 스위치를 삽입하였다. 우리는 바이어싱 회로가 포함된 유닛 셀 구조에 대해 시뮬레이션하였다. 그림 2(가, 나)는 제안하는 VO₂ 스위치 기반 지능형 반사 표면 유닛 셀 반사계수와 반사 위상 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션에는 Ansys HFSS 프로그램을 활용하였다. VO₂ 스위치의 저항 특성은 이전 연구를 참고하여 90도일 때는 10 ohm/sq (ON 상태), 25도일 때는 10,000 ohm/sq (OFF 상태)의 면저항을 적용하였다 [4]. 그림 2(가)를 보면 반사계수는 ON 상태일 때는 50 GHz에서 가장 낮은 반사계수 값을 가지며, OFF 상태일 때는 72 GHz에서 낮은 반사계수 값을 가진다. 지능형 반사 표면은 입사된 전자파를 반사시켜야 하는 디바이스이므로 반사계수가 높을수록 효율이 좋아진다. -3 dB 기준 반사계수 대역폭은 56.5~65.8 GHz로 나왔으며, 대역폭 내에서 x-pol, y-pol 모두 동일한 성능을 보였다. 그림 2(나)는 반사 위상 시뮬레이션 결과를 보여준다. 1-bit 지능형 반사 표면의 경우 ON, OFF 상태 간에 180°의 위상차가 나야 한다. ON, OFF 상태 간 180° ± 20° 위상 차이는 55.1~66.8 GHz에서 나타났다. 반사계수 결과와 같이 x-pol, y-pol 모두 동일한 성능을 보였다. 우리는 최적화된 유닛 셀 구조로 상태별 반사 각도를 확인하기 위해 전체 구조 시뮬레이션을 진행하였다. 우리는 30개의 행에 대해 PEC, PMC 경계조건 방법을 활용하여 x-pol, y-pol 전체 구조를 시뮬레이션하였다. 이 방법을 사용한 이유는 바이어싱 회로를 고려한 탓에 완전한 전체 구조 시뮬레이션에는 긴 해석 시간, RAM 등 많은 리소스가 필요하였고, 효율적인 시뮬레이션을 하기 위해 해당 방법을 채택하였다. 그림 3(가, 나)는 x-pol, y-pol에 대해 60 GHz 기준 상태별 정규화된 산란 패턴 시뮬레이션 결과를 보여준다. 여기서 코드 0은 VO₂ 스위치가 OFF 상태인 컬럼을 의미하고, 코드 1은 VO₂ 스위치가 ON 상태인 컬럼을 의미한다. 예를 들어 코드 0011은 1, 2번째 컬럼의 VO₂ 스위치가 OFF, 3, 4번째 컬럼의 VO₂ 스위치가 ON 상태이며, 이러한 상태가 30번째까지 반복되는 것을 의미한다. 결과를 보면 x-pol, y-pol 모두 최대 반사 각도는 ±34°로 나왔으며, 입사된 전자파를 0°부터 ±34°까지 다양한 각도로 반사시킬 수 있음을 볼 수 있다. 교차 편파의 경우 모든 코드에서 최대 반사 값 기준 20 dB 낮게 형성되는 것을 볼 수 있다. 제안하는 VO₂ 스위치 기반 이중 편파 지능형 반사 표면은 30 × 30 배열의 유닛 셀로 구성되었다. 동일한 개수의 이중 편파 지능형 반사 표면 제작을 위해서는 최소 1,800개의 PIN 다이오드가 필요하다. 예를 들어 MACOM 사의 MA4GP907 PIN 다이오드를 활용하여 제작하려면 5,387원 × 1,800 = 9,696,600원의 금액이 필요하다. 이에 반해 VO₂ 스위치 기반 지능형 반사 표면 제작에 필요한 재료의 최소 금액은 211,933원에 불과하다. VO₂ 스위치를 활용하면 지능형 반사 표면 구현에 필요한 가변 소

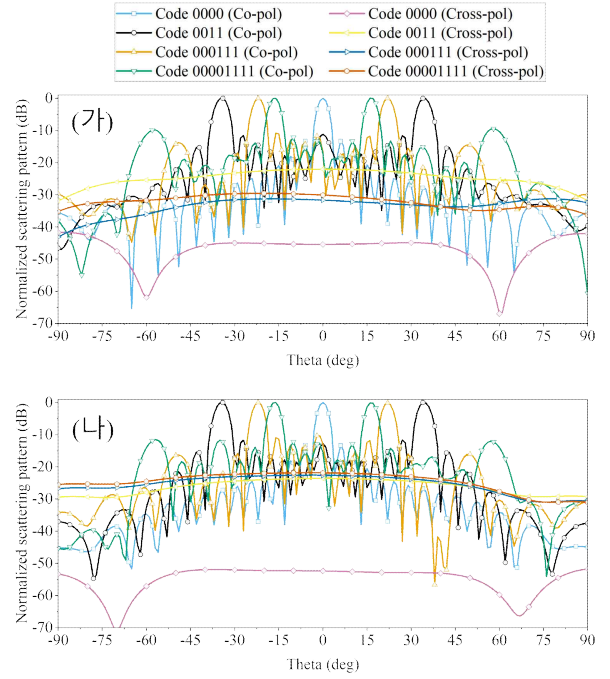


그림 3. VO₂ 스위치 기반 이중 편파 지능형 반사 표면의 60 GHz 기준 상태별 정규화된 산란 패턴 시뮬레이션 결과 (가) x-pol (나) y-pol

자 금액을 획기적으로 줄일 수 있고, 저비용 이중 편파 지능형 반사 표면 구현이 가능하다.

III. 결론

본 연구에서는 밀리미터파 통신 환경 개선을 위한 VO₂ 스위치 기반 저비용 이중 편파 지능형 반사 표면을 제안하였다. 제안하는 지능형 반사 표면은 60 GHz 기준 0°에서 ±34°까지 반사 각도를 제어할 수 있으며, x-pol, y-pol 모두 동작하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안하는 VO₂ 스위치 기반 지능형 반사 표면은 밀리미터파 통신 환경 개선을 위한 저비용 솔루션으로 활용될 것으로 기대된다. 향후 실제 제작 및 측정 과정을 통해 그 성능을 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00405510).

참 고 문 헌

- [1] M. Najafi, V. Jamali, R. Schober and H. V. Poor, "Physics-Based Modeling and Scalable Optimization of Large Intelligent Reflecting Surfaces," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 4, pp. 2673-2691, April 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2020.3047098.
- [2] M. Di Renzo et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces vs. Relaying: Differences, Similarities, and Performance Comparison," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 798-807, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3002955.
- [3] Yang, Y., Vaseem, M., Wang, R., Makki, B., & Shamim, A. (2025). A Fully Screen-Printed Vanadium-Dioxide Switch-Based Wideband Reconfigurable Intelligent Surface for 5G and Beyond. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.
- [4] Park, E., Kim, J., Lee, M., Phon, R., Kim, M., Hong, S., & Lim, S. (2025). Low-cost large-area 100 GHz intelligent reflective surface: electrically column control of screen-printable high phase changing ratio vanadium dioxides. *Nanophotonics*, 14(9), 1375-1389.