

높은 상변화 비율의 이산화바나듐 스위치를 활용한 저비용 대면적 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면

김정현*, 박의용, 임성준

중앙대학교

wjdgus6748@cau.ac.kr, rntqkd19@naver.com, sungjoon@cau.ac.kr

Low-Cost, Large-Area Sub-Terahertz Intelligent Reflective Surface Using a High Phase-Transition-Ratio Vanadium Dioxide Switches

Junghyeon Kim, Eiyong Park, Sungjoon Lim

Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 높은 상변화 비율의 이산화바나듐(VO_2) 스위치를 활용하여 서브테라헤르츠 대역에서 동작하는 저비용, 대면적 지능형 반사 표면을 제안하였다. 제안하는 지능형 반사 표면은 시뮬레이션과 측정 과정을 통해 그 성능을 검증하였다. 제안하는 지능형 반사 표면은 서브 테라헤르츠 통신에서 통신 품질을 개선할 수 있는 대면적 RF 장치로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

6G 통신에 활용될 것으로 예상되는 서브 테라헤르츠 대역은 초고속, 초저지연성, 초연결성 특성을 바탕으로 RF 어플리케이션을 확장시킬 것으로 예상된다. 이러한 어플리케이션에는 가상현실, 증강현실, 홀로그램, 자율주행 등이 있다. 하지만 서브 테라헤르츠 대역 통신은 두 가지의 해결해야 할 문제점이 있다. 첫 번째는 주파수가 증가함에 따라 경로 손실이 증가한다는 문제다. 두 번째는 전파의 직진성이 강해져서 비가시선(Non-line-of-sight, NLOS) 영역에서의 통신이 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 저궤도 위성통신, 드론을 활용한 기지국, 빔포밍 배열 안테나, 지능형 반사 표면 등의 시나리오가 제시되었다. 특히 지능형 반사 표면은 스넬의 법칙을 넘어 입사된 전파를 다양한 각도로 반사해 통신 품질을 향상시킬 수 있다는 점으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

지능형 반사 표면은 메타물질 기반의 표면으로 단위 구조 당 반파장 이하 크기의 전도성 패턴과 PIN, 버랙터 다이오드와 같은 RF 스위치로 구성된다. 기존 연구에서 지능형 반사 표면은 대면적으로 만들수록 효율이 높아진다고 보고되었다 [1, 2]. 따라서 대면적 지능형 반사 표면에 대한 연구가 필요한데, 서브 테라헤르츠와 같은 고주파수에서는 문제가 된다. 예를 들어 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 크기의 지능형 반사 표면을 제작한다고 가정했을 때 10 GHz에서 동작하는 지능형 반사 표면의 전기적 길이는 $10\lambda_0 \times 10\lambda_0$ 크기이지만, 100 GHz에서 동작하는 지능형 반사 표면의 전기적 길이는 $100\lambda_0 \times 100\lambda_0$ 가 된다. 이 뜻은 제작에 필요한 RF 스위치의 개수가 늘어나 결과적으로 지능형 반사 표면 제작 비용이 증가하게 된다. 예를 들어 MACOM 사의 MA4GP907 PIN 다이오드의 단가는 4,760원인데, 이를 활용하여 50×50 단위 구조의 지능형 반사 표면을 제작하려면 최소 11,901,250원이 필요하다. 다른 문제점으로는 PIN, 버랙터 다이오드의 일반적인 사용 가능 주파수는 40 GHz까지로 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면에 적용하기 어렵다는 한계점이 있다.

이러한 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 높은 상변화 비율의 이산화바나듐(VO_2) 스위치를 활용한 저비용 대면적 서브 테라헤르츠 지능

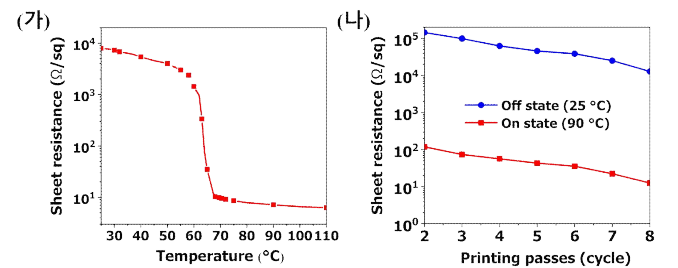


그림 1. (가) 스크린 프린팅된 VO_2 패턴의 온도별 면저항 측정 결과, (나) 스크린 프린팅 횟수에 따른 VO_2 패턴의 면저항 측정 결과

형 반사 표면을 제안한다. 제안하는 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면은 기존에 사용되던 PIN, 버랙터 다이오드 대신 VO_2 스위치를 활용함으로써 지능형 반사 표면 제작 비용을 획기적으로 줄였다. 또한 VO_2 스위치의 상변화 비율을 개선함으로써 지능형 반사 표면의 효율을 증가시켰다. 제작에는 스크린 프린팅 기술을 활용하여 대면적 제작이 가능하다. 제안하는 서브 테라헤르츠 반사 표면은 시뮬레이션과 측정 과정을 통해 그 성능을 검증하였다.

II. 본론

VO_2 는 온도에 따라서 저항 특성이 변하는 상변화 물질이다. 일반적으로 VO_2 는 약 67도에서 급격한 상변화가 일어나며, 온도가 늘어날수록 저항이 낮아지는 특성을 가진다. RF에서는 VO_2 를 PIN, 버랙터 다이오드와 같은 RF 스위치로 활용할 수 있다. 그림 1(가)는 본 연구에서 개발한 VO_2 의 온도별 면저항 측정 결과이다. 30도 이하의 온도에서는 약 9,400 ohm/sq의 면저항이 측정되었으며, 온도가 늘어날수록 면저항이 감소하는 추세를 보였다. 특히 약 64도에서 급격한 저항 변화가 일어났으며, 80도에서는 8.4 ohm/sq의 면저항이 측정되었다. 그림 1(나)는 스크린 프린팅 횟수에 따른 VO_2 패턴의 면저항 측정 결과이다. 스크린 프린팅 횟수가 늘어날수록 ON, OFF 상태 면저항은 감소하는 추세를 가졌다. 2번 스크린 프

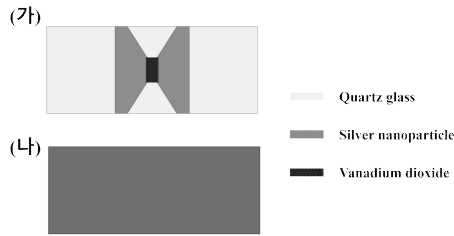


그림 2. 제안하는 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면의 유닛 셀 (가) 윗면, (나) 아랫면

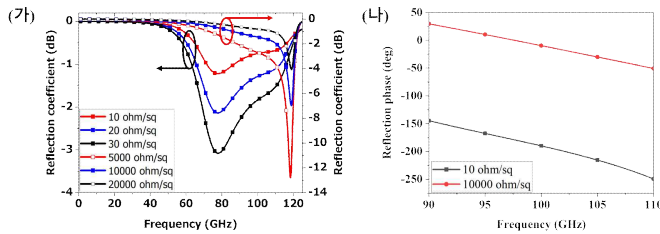


그림 3. (가) VO₂ 스위치의 면저항 변화에 대한 반사계수 시뮬레이션 결과, (나) 반사 위상 시뮬레이션 결과

린팅했을 때 ON, OFF 면저항은 각각 119, 145,000 ohm/sq로 측정되었다. 8번 스크린 프린팅했을 때 ON, OFF 면저항은 각각 12.6, 12,900 ohm/sq로 측정되었다. 기존에는 300 이하의 상 변화율을 가지는 VO₂ 연구가 보고되었는데[3], 본 연구에서는 1,000 이상의 상 변화율을 가지는 VO₂를 개발하였다. 높은 상 변화율의 VO₂는 ON 상태에서 낮은 저항, OFF 상태에서 높은 저항을 제공함으로써 안정적인 스위치 역할을 할 수 있다. 그림 2는 제안하는 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면 유닛 셀이다. 우리는 서브 테라헤르츠 대역에서 안정적인 전기적 특성을 가지는 Quartz glass를 유전체로 정하였고, 도체는 스크린 프린팅을 활용하기 위해 silver nanoparticle로 정하였다. RF 스위치는 VO₂ 스위치를 활용하였다. 그림 3(가)는 VO₂ 스위치의 면저항 변화에 대한 반사계수 시뮬레이션 결과이다. 여기서 10~30 ohm/sq의 면저항은 VO₂ 스위치가 ON일 때를 가정한 값이고, 5,000~20,000 ohm/sq의 면저항은 VO₂ 스위치가 OFF일 때를 가정한 값이다. 지능형 반사 표면 설계에서 반사계수는 높으면 높을수록 좋다. 시뮬레이션 결과를 보면 ON 상태일 때는 VO₂ 스위치의 면저항이 낮을수록, OFF 상태일 때는 VO₂ 스위치의 면저항이 높을수록 높은 반사계수를 가진다. 즉 ON/OFF 저항 간의 차이가 커야 하고, 이는 VO₂의 상 변화율이 높을수록 지능형 반사 표면의 효율이 증가한다는 뜻이다. 본 연구에서는 상 변화율이 1,000 이상인 VO₂를 제조하여 ON, OFF 상태 모두 -1 dB에 가까운 반사계수를 가질 수 있다. 그림 3(나)는 VO₂ 스위치가 10, 10,000 ohm/sq일 때의 반사 위상 시뮬레이션 결과이다. 10 ohm/sq일 때와 10,000 ohm/sq일 때의 위상 차이는 100 GHz에서 180.2°로 나왔다. 그림 4는 제작한 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면의 윗면과 아랫면을 보여준다. 먼저 아랫면을 silver nanoparticle 잉크로 1번 스크린 프린팅 후 오븐에서 130도 20분간 소결했다. 이후 윗면의 전도성 패턴을 silver nanoparticle 잉크로 1번 스크린 프린팅 후 오븐에서 130도 20분간 소결했다. 마지막으로 제작한 VO₂ 잉크로 15번 스크린 프린팅 후 hot plate에서 90도 2시간 동안 소결하여 제작을 완료하였다. 제작한 지능형 반사 표면은 flip-chip 본딩 공정을 활용하여 그림 4에서 볼 수 있는 최종 지능형 반사 표면 시제품으로 제작하였다. 그림 5(가)는 제작한 지능형 반사 표면의 측정환경이다. 우리는 송신 안테나를 지능형 반사 표면의 정면을 바라보게 고정하고 수신 안테나를 -90°부터 90°까지 회전시키면서 측정하였다. -7°~7° 범위는 송신 안테나와 수신 안테나의 각도가 겹치는 미측정

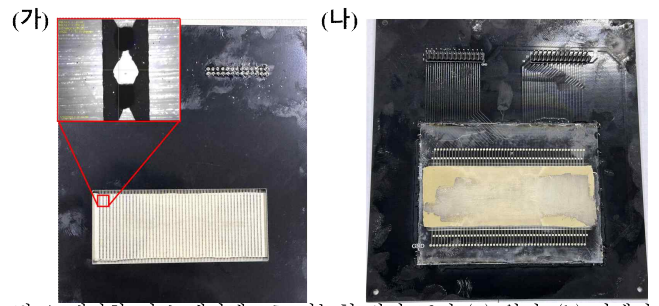


그림 4. 제작한 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면 (a) 윗면, (b) 아랫면

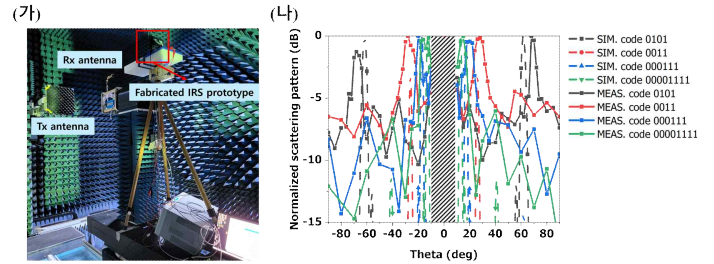


그림 5. (가) 제작한 지능형 반사 표면의 측정환경, (나) 정규화된 산란 패턴 측정 결과

영역이다. 그림 5(나)는 정규화된 산란 패턴 측정 결과이다. 우리는 column 별로 지능형 반사 표면을 제어하였다. 여기서 코드 0은 VO₂ 스위치가 OFF인 상태이고, 코드 1은 VO₂ 스위치가 ON인 상태이다. 측정 결과 코드 0101은 입사된 전자파를 -68°, 70°로 반사하였고, 코드 0011은 ±29°로 반사하였다. 코드 0001111은 ±20°로 반사하였고, 코드 00001111은 ±13°로 반사하였다. 우리는 측정 과정을 통해 제안하는 지능형 반사 표면이 서브 테라헤르츠 대역의 전자파를 다양한 각도로 반사시킬 수 있음을 검증하였다.

III. 결론

본 논문에서는 높은 상변화 비율의 VO₂ 스위치를 활용한 저비용, 대면적 서브 테라헤르츠 지능형 반사 표면을 제안하였다. 제안하는 지능형 반사 표면은 PIN, 버랙터 다이오드 대신 VO₂ 스위치를 활용함으로써 저비용으로 제작이 가능하며, 스크린 프린팅을 활용하여 대면적 제작이 가능하다. 제안하는 지능형 반사 표면은 서브 테라헤르츠 대역에서 통신 품질을 향상하는 저비용, 대면적 RF 기기로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] W. Li et al., "Flexible and reconfigurable radio frequency electronics realized by high-throughput screen printing of vanadium dioxide switches", *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, 2020.