

빔포밍 응용을 위한 이산화바나듐 스위치 기반 서브 테라헤르츠 대역 위상 배열 안테나 설계

최진우*, 김정현, 임성준

중앙대학교

*jinw36@cau.ac.kr, wjdgus6748@naver.com, sungjoon@cau.ac.kr

Design of a Sub-THz Phased Array Antenna Based on VO₂ Switches for Beamforming Applications

Jinwoo Choi, Junghyeon Kim, Sungjoon Lim

Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 이산화바나듐(VO₂) 스위치를 활용하여 서브 테라헤르츠(Sub-THz) 대역에서의 빔 형성을 위한 재구성 가능한 위상 배열 안테나를 설계하였다. VO₂는 열에 의해 금속과 절연체 사이의 상전이가 유도되는 특성을 가지므로, 열 간섭을 억제하기 위한 소자 단위와 어레이 수준에서 열 관리 기법을 적용하였다. 제안하는 위상 배열 안테나는 Sub-THz 통신에서 높은 공간 분해능과 지향성 확보에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

차세대 이동통신 기술로 주목받는 6G 통신시스템은 초고속, 초저지연 데이터 전송, 고해상도 센싱, 대규모 연결성을 충족하기 위해 Sub-THz 대역을 유력한 주파수 자원으로 고려하고 있다 [1]. Sub-THz 대역은 높은 주파수 특성으로 인해 전파의 지향성이 증가하며, 직시 경로(Line-of-sight, LOS)가 우세하고 다중경로 성분이 희소한 채널 환경을 형성한다. 이러한 특성은 정밀한 빔포밍 기술을 필수 요소로 만들며, 이는 안정적인 무선 링크 구축을 위한 핵심 기술로 작용한다 [2]. 한편, Sub-THz 대역은 심각한 경로 손실을 수반하므로, 이를 보완하기 위한 대규모 안테나 배열을 통한 어레이 이득 확보가 필수적이다. 이로 인해 방향 집중성과 어레이 이득을 동시에 구현할 수 있는 고차원 빔포밍 기술의 개발이 Sub-THz 통신의 성능을 좌우하는 핵심 과제로 대두되고 있으며, 이러한 기술을 실현하기 위해 회로 내에서 동적으로 위상을 조절할 수 있는 재구성형 스위치 소자의 구현이 필수적이다. 그러나 현재까지 실용성과 경제성을 동시에 만족하는 스위칭 소자는 상용화되지 않았으며, 이는 고차원 빔포밍 기술 개발의 실현을 가로막는 주요 기술적 제약으로 작용하고 있다.

이러한 기술적 한계를 극복하기 위한 대안으로, 상변화 물질인 VO₂가 주목받고 있다. VO₂는 약 67°C에서 절연체에서 금속으로 상전이 되며, 전기 저항이 급격히 감소하는 물질 특성이 있다. 특히 Sub-THz 대역은 물론 적외선 영역에서도 동작 가능성이 검증되어 스위칭 소자로서의 활용 가능성이 높게 평가된다. 그러나 VO₂ 기반 소자를 실제 회로에 적용하기 위해서는 국소적인 열 제어의 공간 분해능 확보와 정밀 제어가 필수적이며, 이는 공정 방식에 따라 실현 가능성에 큰 차이를 보인다. 리소그래피 기반 공정은 정밀한 열 제어 성능을 제공하지만, 비용과 복잡성이 크다. 반면 스크린 프린팅은 비용 측면에서 유리하나 정밀한 열 제어에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 VO₂ 기반 스위치의 국소 열 제어 정밀도와 구동 효율을 개선하기 위해, 열 활성화 영역의 군집화를 통한 정밀 열 설계 기능을 제안한다.

II. 본론

그림 1에 제시된 시간 지연 방식의 위상 천이기는 스위치 소자를 이용해 상단의 기준 경로 또는 하단의 지연 경로 중 하나를 선택하여, 두 경로 간 물리적 길이 차이를 이용해 위상을 제어한다. VO₂의 열에 의해 금속과 절연체 상태 간 상전이가 발생하는 물질 특성을 이용하여 회로 내 전류 흐름을 제어하는 스위치로 활용된다. 스위치를 닫기 위해서는 선택적으로 특정 영역을 가열해야 하나, 인접한 비활성 영역으로의 열 전도는 비의도적인 상전이를 유발할 수 있다. 이는 ON/OFF 상태 간 저항 차이를 감소시켜 스위칭 특성을 저하시킬 수 있다. 기존의 위상 천이기 구조는 T-접합의 두 분기점에 스위치를 밀집 배치하거나 별도의 매칭 회로를 삽입하는 방식으로 구현되기 때문에 열 간섭에 취약하다. 본 논문에서는 이를 방지하기 위해 두 스위치를 공간적으로 이격하여 배치하는 구조를 제안하며, 이격 거리는 전송선의 임피던스 주기성과 위상 일관성을 고려하여 기준 경로와 지연 경로의 스위치 모두 반파장으로 설정하였다.

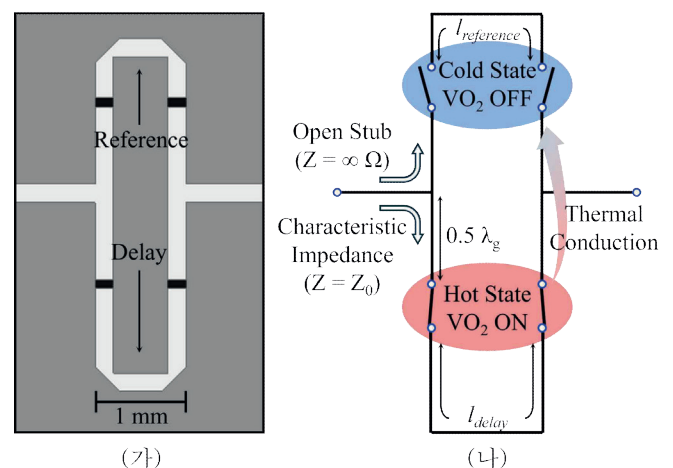


그림 1. 단일 비트 위상 천이기의 (가) 상부 구조도, (나) 회로 개략도

멀티비트 위상 천이기는 각 비트가 2진 가중치에 해당하는 위상 천이를 제공하며, 전체 출력 위상은 이들의 합으로 구성된다. 하지만 이 구조는 회로 내에서 가열 영역과 비가열 영역이 번갈아 배치되기 때문에, 열 간섭을 효과적으로 제어하기 어렵다는 한계를 가진다. 특히 스크린 프린팅 기반의 기계적 제작 공정에서는 미세 열 제어에 필요한 고정밀 패턴 구현이 기술적으로 제한된다. 따라서 열 활성화 영역의 설계에는 열 전달 매커니즘에 대한 정량적 고려가 필수적이다. 이를 위해서 본 연구에서는 비드만-프란츠 법칙과 푸리에 열전달 법칙을 적용하여 회로 내 열 확산 경로를 분석하였다. 비드만-프란츠 법칙에 따르면 금속의 열전도도는 전기전도도에 비례하며, 푸리에 법칙은 열전도 속도가 재료의 열전도도와 전도체 단면적에 비례함을 나타낸다. 이러한 분석을 바탕으로, 마이크로스트립의 폭은 스크린 인쇄 공정에서 은 잉크로 구현 가능한 최소 해상도인 $200\text{ }\mu\text{m}$ 로 설정하였고, 이 때 전송선로의 특성 임피던스는 $72\text{ }\Omega$ 이다. 기판은 두께 $127\text{ }\mu\text{m}$ 의 RT5880을 사용하였으며, 해당 기판의 열전도도는 $0.2\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 이다.

그림 2는 제안한 2비트 위상 천이기의 열 활성화 구동 개념을 보여준다. 위상 천이기는 두 개의 스테이지로 구성되며, 각 스테이지는 기준 경로와 지연 경로 중 하나를 선택할 수 있다. 포트 5는 기준 위상(0°)으로 설정되며, 포트 6, 7, 8의 출력 위상은 스테이지의 조합에 따라 점진적으로 증가한다. 예를 들어, 스테이지 1에서 지연 경로를 활성화하면 위상 기울기는 -55° 가, 스테이지 2에서 지연 경로를 활성화하면 $+55^\circ$ 의 위상 기울기가 형성된다. 두 스테이지 모두 기준 경로가 선택되면 위상 기울기는 0° 로 유지되어 기준 상태가 된다. 각 스테이지 내부에서는 VO_2 스위치들이 기준 경로와 지연 경로에 따라 각각 선형 배열되며, 이러한 배치는 스위치 라인을 기능적으로 군집화한 열 활성화 영역으로 구성할 수 있게 한다. 이와 같은 구조는 국소 열 자극의 제어 범위를 물리적으로 분리함으로써, 열 간섭을 최소화하고 열 제어의 정밀성과 구동 효율을 동시에 향상시키는 데 기여한다.

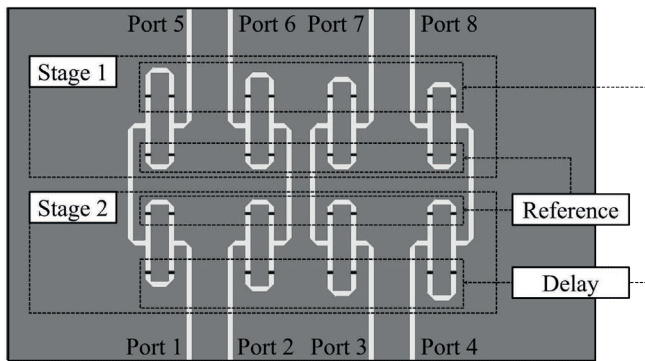


그림 2. 2비트 위상 천이기의 상부 구조도

그림 3은 스테이지 1에서 기준 경로, 스테이지 2에서 지연 경로를 선택한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션은 ANSYS사의 고주파 전자기 해석 도구인 HFSS를 사용하여 수행되었으며, 목표 출력 주파수는 105 GHz 로 설정되었다. 이 조건에서 위상 기울기를 55° 를 구현하도록 설계된 회로에 대해, 포트 5를 기준 위상(0°)으로 설정하였을 때, 포트 6, 7, 8의 출력 위상은 각각 55.07° , 112.62° , 169.62° 로 나타났다. 전체 출력 포트에 대해 계산된 최대 위상 오차는 4.62° 이며, 이는 Sub-THz 대역에서의 정밀 빔 조향을 구현하는 데 충분히 허용 가능한 수준이다. 삽입 손실은 최악의 경우 5.88 dB 로 나타났다. 이러한 결과는 제안한 2비트 위상 천이기 구조가 실질적인 Sub-THz 안테나 시스템에 적용 가능성을 시사한다.

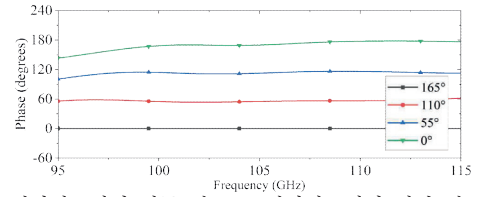


그림 3. 스테이지 1에서 기준 경로, 스테이지 2에서 지연 경로를 선택한 경우의 출력 포트별 위상 시뮬레이션 결과

그림 4는 제안된 4소자 위상 배열 안테나의 상부 구조와 확대도를 나타낸다. 각 안테나 소자에는 앞서 설계한 2비트 위상 천이기에서 산출된 105 GHz 기준의 위상 값을 적용하였다. 시뮬레이션 결과, 배열 안테나의 최대 이득은 12.21 dB 로 확인되었다. 그림 5는 -18° 에서 $+18^\circ$ 범위 내에서의 빔 조향 성능을 보여주며, 조향된 빔과 정면 빔 사이의 반 전력(-3 dB) 빔폭이 서로 중첩되도록 설계되어, 연속적인 각도 범위에서 빔 커버리지를 유지할 수 있도록 구성되었다.

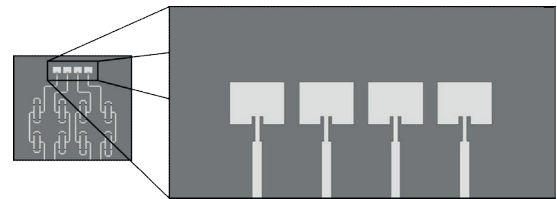


그림 4. 4x1 위상 배열 안테나의 상부 구조도 및 확대도

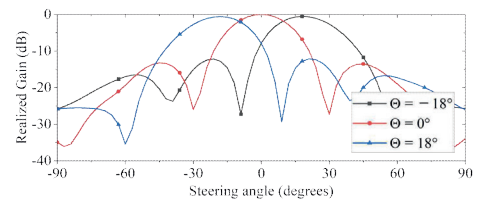


그림 5. 105 GHz 에서 빔 조향 각도에 대한 안테나 이득

III. 결론

본 연구에서는 VO_2 스위치를 기반으로 한 Sub-THz 대역 위상 배열 안테나를 설계하였다. VO_2 의 상변화 특성을 활용해 스위칭 기능을 구현하면서도, 열 간섭에 의한 성능 저하를 방지하기 위해 두 가지 설계 전략을 제안하였다. 첫째, 기준 경로와 지연 경로 스위치를 반파장 거리로 이격 배치하여 열 간섭을 최소화하였고, 둘째, 스위치 라인을 기능적으로 군집화한 열 활성화 영역으로 구성하여 제어 정밀도와 구동 효율을 향상시켰다. 제안한 구조는 Sub-THz 대역에서 안정적인 빔포밍 구현을 가능하게 하며, 향후 고주파 무선 통신 및 고해상도 센싱 시스템에 적용 가능한 실용적 설계 기반을 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] M. Shafi, R. K. Jha, and S. Jain, "6G: Technology evolution in future wireless networks," IEEE Access, vol. 12, pp. 57548 - 57573, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3385230.
- [2] H. Srieddeen, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, "An overview of signal processing techniques for terahertz communications," Proc. IEEE, vol. 109, no. 10, pp. 1628 - 1665, Oct. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3100811.