

무선통신용 InP 기반 집적형 빔조향기 설계

박태현, 권오기, 이철욱

한국전자통신연구원

thpark@etri.re.kr

Design of a InP-Based Integrated Beam-Steering Device for Wireless Communications

Tae-Hyun Park, Oh-Kee Kwon, Chul-Wook Lee

Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

본 논문에서는 자유공간 통신을 위한 OPA 구조를 제안하고, LEO 위성 간 통신링크 버짓 검토를 통해 송신단의 요구출력과 함께 OPA 기능구성 및 조향특성을 검토한다. 제안구조는 레이저 송신부와 빔조향부가 집적된 구성으로 빔조향을 통해 통신경로 설정 후 바로 고속의 광신호를 전달하는 구성으로서, InP 화합물 반도체 기반에서 기능 구성을 설계하였다. InP 집적구조는 광이득부와 원활한 집적 및 고속변조 동작과 함께 외부 충격과 진동에 안정적이며, 극한조건에서 물질간 균일한 응력, 열전달 차이를 최소화 할 수 있으므로, 우주환경에 적합한 구성이며, 본 발표에서는 제안 구성을 바탕으로 주요 기능과 OPA 방사특성에 대해 설명한다.

I. 서 론

저궤도 위성 (LEO) 간 레이저 빔을 직접 교환하는 ISL (Inter-Satellite Link)은 위성 간 거리가 수백에서 수천 킬로미터에 달함에 따라 광학 경로 손실·대기 흡수·빔 포인팅 오차 등 다양한 손실이 누적된다. 이러한 손실 이후에도 수신전력은 수신기의 감도보다 높게 유지되어야 하며, 10 Gbps 급 OOK (On-off keying)@4000km 링크에서 약 0.5W 이상의 광출력이 필요하다 [1].

현재 대부분의 FSO (Free-Space Optical Communication) 시스템은 Fast steering mirror 또는 Gimbaled mirror 기반의 기계식 빔포인팅을 사용하고 있으며 [2], 통신 터미널이 소형·경량화·저전력화 (Size, Weight, Power; SWaP)를 지향함에 따라 기계식 구동부가 없는 솔리드 스테이트 빔포인팅 기술인 Optical Phased Array (OPA)의 도입 요구가 커지고 있다. 수백 Hz 수준의 스티어링 속도를 가지는 기계식 PA와 비교해, 수십 kHz-MHz 대역의 고속·고정밀 스티어링 응답을 제공하는 OPA는 궤도 편차나 플랫폼 진동으로 인한 빔 지터링을 실시간으로 보정할 수 있다 [3].

실리콘 포토닉스 (SiPh) OPA는 CMOS 공정 호환성을 기반으로 패시브 소자의 대규모 집적과 비용·공정 안정성 측면에서 강점을 지닌다. 다만 자체적으로 광증폭 기능을 제공하지 않기 때문에 별도의 III-V 광원·증폭기 모듈을 추가해야 하며, 이 과정에서 모드 매칭 손실, 테이퍼 삽입 손실로 인한 출력 저하 및 이중 접합부간 열팽창 계수 차이로 인한 응력 누적 문제가 발생할 수 있다 [4]. 이에 비해 InP기반의 단일집적 OPA는 레이저·증폭기·변조기와 같은 능동 소자 및 위상 쉬프터 등 수동 소자를 단일 웨이퍼 상에서 연속적으로 집적함으로써, 모드 매칭 손실과 이중 접합 관련 응력 문제를 최소화한다. 또한 단일 물질계 구성으로 열·기계적 안정성이 확보되어 온도가 빠르게 변하는 우주 환경에서도 파장 안정성을 효과적으로 유지할 수 있다 [5].

UCSB Coldren 그룹이 개발한 InP 기반 8채널 OPA는 1550 nm 대역에서 $\pm 10^\circ$ 횡방향 조향 시 FWHM 1.7° 및 10 dB 부엽 억제비율(SLSR)을 달성했으나, 고속 신호 변조기의 부재로 통신 시스템에 직접 적용하기에는 한계가 있다 [6]. 본 논문에서는 광원, 변조, 분기, 증폭, 조향 기능을 가진 소자를 하나의 InP 기판 상에 모듈리식으로 통합함으로써, 통신소자

로서 사용가능한 OPA를 설계 및 제안하고자 한다. 구체적으로는 파장가변 레이저, 전기흡수 변조기(EAM), MMI 분배기, 광증폭기(SOA), 위상 지연기, OPA를 단일 칩에 모듈리식 통합하는 구조를 제안하고, 이를 기반으로 구현 가능 범위와 주요 파라미터를 설계한다.

II. 본론

ISL은 두 위성 사이에 우주 공간상 LOS (Line Of Sight) 경로를 형성하므로 감쇠나 페이딩이 발생하지 않는다고 가정하였고, 송신 요구전력은 수신기 감도, 송·수신 광학 효율, 송·수신 안테나 이득, 송·수신 포인팅 손실 그리고 자유공간 경로 손실 (FSPL)을 고려하여 계산하였다. OPA에서 방사된 1550 nm 빔은 외부 콜리메이터를 거쳐 직경 10 cm 송신 개구로 출사되며, 이 경우 회절 한계에 따라 발산각은 15 μ rad.이다. 이 빔이 2000 km 공간에 전파될 때 FSPL은 약 264 dB이고, 여기에 송·수신 안테나 이득 (215 dB)을 합산하면 전체 링크 손실은 49.5 dB가 된다. 송·수신 광학 효율이 각각 0.8 (-1.94 dB), 포인팅 오차 1 μ rad에 따른 손실이 0.33 dB라고 가정하고, 수신단에 23 dB 이득의 전치 증폭기를 포함한 APD 수신기의 감도를 -15 dBm으로 설정할 때, 100 Gbps OOK 링크에서 총 손실을 보상하고 3 dB의 링크 마진을 확보하기 위해 필요한 송신 전력은 약 50 mW (17 dBm)이다.

그림 1은 제안된 빔조향기의 기능 구성도를 나타낸다. 파장가변 광원 (TLS)의 이득부에서 생성된 광은 공진기내에 파장선택 특성으로 단일 모드로 발진하며, 전방거울로 10 mW의 광파워로 출력된다. 이 광은 EAM을 통과하면서 고속 변조되며 [7], 이후 다단의 MMI를 거쳐 총 8채널로 분기된다. 분기 과정에서 감쇄된 광은 2단의 MMI 이후에 위치한 SOA를 통해 증폭된다. 최종적으로 OPA 배열 상부의 격자부를 통해 방사된 빔은, 위상지연기 제어를 통해 방위 조향이 가능하며, TLS의 파장가변을 통해 고도 조향된다. EAM 삽입 손실 (3 dB), MMI 총손실 (7 dB), 각 위상 배열 광도파로 손실 (2 dB), 안테나 손실 (4 dB)을 모두 감안하여, 목표 송신 전력 수준을 확보하기 위해서는 각 SOA가 8채널의 경우 9 dB, 16채널의 경우 13 dB 이상의 광 이득을 제공해야 한다.

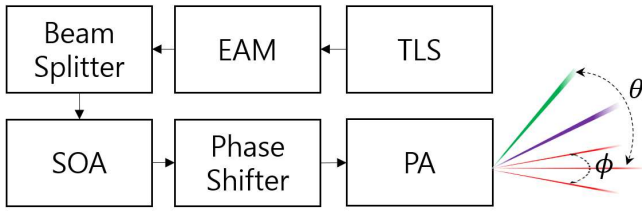


그림1. 빔조향기 기능 구성도

1D OPA에서는 배열된 N 개의 방사 광도파로 간 위상 기울기 $\Delta\phi$ 를 통해 방위각(azimuth)을, 방사 격자의 파장 의존성을 통해 고도각(elevation)을 조향함으로써 두 직교 축에 대한 빔 제어가 가능하다. 주기 400 nm, 유효 굴절률 3.28 조건에서의 고도각 파장 민감도는 $0.18^\circ/\text{nm}$ 으로 계산되며, 30 nm 파장 조정 시 약 5.35° 의 고도 조향이 가능하다. 격자 길이가 200 μm 일 경우 고도빔의 반치폭은 약 0.5° 이다. $\lambda = 1550$ nm, 배열간격 $d = 6$ μm 조건에서 위상 기울기 $\Delta\phi = 0.42$ rad를 인가하면 약 $\pm 1^\circ$ 의 방위 조향이 가능하며, 최대 $\pm 15^\circ$ 까지 조향 범위를 갖는다.

8채널 OPA는 3 μm 폭의 광도파로를 6 μm 의 균일 간격으로 배열하여 전체 배열길이 45 μm 으로 구성하였다. 출력 빔은 1.69° 의 반치폭(FWHM), 38.5%의 빔형성효율(BFE)을 보여주었다. 방위빔의 반치폭을 1도 이하로 줄이기 위해 16채널 구조도 검토 되었으며, 그림 2 (a)와 같이 0.84° 의 FWHM, 38.5% BFE를 보여주었다.

또한 시야각을 제한하는 격자염을 억제하기 위해, 비균일 배열구조를 설계하였다. 비균일 배열은 간격을 최적화해야 하는 다목적 비선형 문제로 구성되며, 채널 수가 적은 환경에서는 유전 알고리즘 기반의 최적화가 효과적이다. 그림 2 (b)와 같이 동일한 배열 면적 내에서 구성된 비균일 16채널 OPA는, BFE가 3% 감소하였지만, 격자염억제비율(GLSR)은 10 dB로 향상되었다.

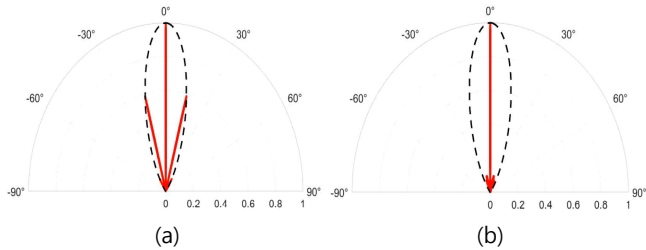


그림2. (a) 균일 16채널 OPA 및 (b) 비균일 15채널 OPA의 원거리장 분포

III. 결론

본 논문에서는 InP 단일집적 기반에서 파장가변 레이저, 변조기, 분배기, 증폭기, 위상지연기 및 OPA를 단일 칩으로 통합한 구조를 설계·제안하고, LEO ISL 요구조건에 맞춘 링크버킷 분석을 수행하였다. 또한, 균일 16채널 OPA 설계에서 기본 특성을 확인하고, 유전알고리즘을 적용한 비균일 배열 최적화를 통해 격자염을 효과적으로 억제하였다. 본 연구는 모놀리식 InP PIC를 활용한 통합 빔조향 광소자 설계 및 링크버킷 최적화 사례를 제시함으로써, 향후 소형 ISL 터미널의 집적화 및 고성능 빔조향 솔루션 개발에 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 ETRI 연구운영지원 (24ZB1300, 화합물 반도체 단일집적형 레이저 빔 조향기 기술)과 MSIP/IITP 차세대 네트워크 산업기술 개발 사업(RS-2024-00396998, 6G 무선엑세스용 지능형 50Gbps/100 Gbps 파장가변 광부품 및 광트랜시버 기술개발) 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] J. Liang, "Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks," 2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Belfast, United Kingdom, pp. 471-476, 2022.
- [2] Martynas Milasevicius, "A Review of Mechanical Fine-Pointing Actuators for Free-Space Optical Communication," Aerospace 11., pp. 5, 2023
- [3] Haiyang Zhang, "Fast beam steering enabled by a chip-scale optical phased array with 8×8 elements," Optics Communications 461, 2020.
- [4] D. Liang, "Recent Progress in Heterogeneous III-V-on-Silicon Photonic Integration", J. Light: Advanced Manufacturing 2, pp. 5, 2021.
- [5] J.J.G.M. Tol, "InP-based photonic circuits: Comparison of monolithic integration techniques", Progress in Quantum Electronics. 34. pp. 135-172, 2010.
- [6] W. Guo, "Two-Dimensional Optical Beam Steering With InP-Based Photonic Integrated Circuits," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 19, no. 4, pp. 6100212-6100212, 2013.
- [7] O. K. Kwon, "100-Gb/s/ λ PAM-4 EAM-Integrated DBR-LD Supporting Multiple Sub-Channels Within 1.29 μm Window," in Journal of Lightwave Technology 41, pp. 6015-6020, 2023