

자유공간 광통신 빔 조향 시스템의 이해

백기욱, 윤효상*

*한국과학기술원

4mie@kaist.ac.kr, *hyosang.yoon@kaist.ac.kr

A Study on the Free-Space Optical Communication Beam Pointing Systems

Baeck, Ki Wook, Yoon, Hyo Sang*

*KAIST

요약

본 논문은 자유공간 광통신 시스템의 핵심 요소인 빔 조향 시스템에 대한 연구이다. 빔 지향-획득-추적 과정으로 불리는 광통신 빔 조향의 절차와 각 단계 수행에 필요한 조건, 빔 조향 방식의 종류 및 하드웨어, 그리고 정밀 빔 조향을 위한 제어 기법에 대해 포괄적으로 고찰하였다. 특히 빔 조향 시스템의 제어 메커니즘에 관한 핵심 개념과 특성에 대해 조명함으로써 관련 기술의 경향성을 명확히 하였다. 본 연구를 통해 빔 조향 시스템에 대한 체계적 이해를 높이고 자유공간 광통신 개발 기술 발전의 방향을 알아보고자 한다.

I. 서론

자유공간 광통신은 전파 통신을 기반으로 하는 위성 통신의 통신 속도를 끌어올리기 위해서 레이저를 이용하는 통신 기술이다. 위성이 레이저 통신 링크를 구축하기 위해선 레이저를 수신 대상에게 정확히 보내는 조향 절차가 선행되어야 하며, 레이저는 수십 μrad 수준의 좁은 빔폭을 가지므로 빔 조향은 자유공간 광통신 기술의 중요한 문제이다. 본 고에서는 우주에서 위성 통신 기술에 적용하기 위해 연구되고 있는 우주 광통신 기술과 위성의 레이저 조향 메커니즘, 그리고 제어를 위한 하드웨어, 제어 기법, 시스템에 대해 분석해본다.

II. 본론

빔 지향-획득-추적 절차는 무선 광통신 임무를 수행하려면 신호광을 상대방에게 성공적으로 발송하기 위한 메커니즘을 의미한다. ‘지향’은 스스로가 보내고자 하는 방향으로 정확히 신호를 조준하는 것을 의미하고, ‘획득’은 신호를 상대방에게 도달하게끔 하는 작업이며, ‘추적’은 획득 이후 서로 간의 링크를 형성해서 통신을 지속하는 것을 뜻한다. 세 과정 모두 무선 광통신 기술 개발에 있어 놓치지 말아야 할 중요 지점들이다.

1) 빔 지향

빔 지향은 위성의 자세 회전이나 그림 1처럼 광통신 터미널의 가대(gimbal)를 이용해 통신 상대를 바라보는 거친 지향(Coarse Pointing) 절차를 의미하며, 또한 조준의 정확도를 포괄하는 개념이다. 통신 위성은 송수신 위성 간 상대적인 위치와 속도 등 공간 파라미터에 대해 정확하게 파악해야 하고, 레이저가 발신되는 방향벡터에 대한 지식(knowledge)을 정확하게 가지고 있어야만 한다. 이러한 종류의 지식의 정확성이 통신 수립에 직결된다. 거친 지향을 수행하는 송신 위성은 GPS로 자신의 위치를 수 \times 수십 m 수준 오차로 측정해낼 수 있지만 수신 위성의 위치는 추측해야 한다. 이를 위해 RF 통신으로 예비 링크를 연결해서 수신 위성의 GPS 정보를 받는 방법을 생각해볼 수 있겠으나 이는 각 위성 본체에 광 터미널과 RF 터미널이 같은 면에 설치된 경우에만 가능하다. 따라서 위성은 지상국과 교신할 때마다 자신의 임무 상 스케줄링 되어있는 타 위성들의 궤도 정보 TLE (Two Line Element)를 받아 저장하고, 통신 시점에 상대 위성

의 궤도 위치를 시간에 따라 계산하여 추정한다. TLE 정보를 이용한 역학적 위치 추정은 데이터가 오래될수록 오차가 커지지만, 통상적인 지상국 망문주기에 대해선 수 km 수준의 오차를 기대한다 [1].

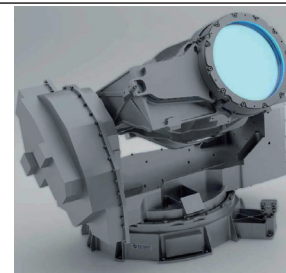


그림 1 가대에 장착된 위성 광통신 터미널. SCOT-135, TESAT [2]

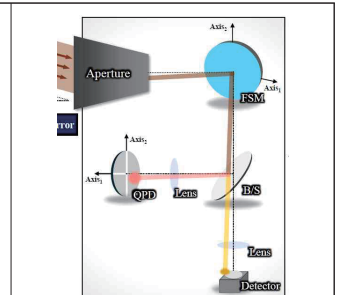


그림 2 빔 조향 시스템 예시.

2) 빔 획득

거친 지향 과정을 통해 두 위성이 서로를 관심 영역에 둔 이후 두 위성이 서로의 실제 위치를 확인하는 과정이 획득 과정이다. 이는 마치 먼 바다의 어선이 등대의 불빛을 보고 선착장의 방향을 찾는 것과 유사하다. 두 위성은 TLE로 추정된 방향벡터를 시작점으로 주변 수 km 영역에 레이저를 나선형 궤적으로 평면을 가득 채우듯 움직이며 빛을 뿌리는 방식으로 위치를 알린다. 간단한 숫자 예시를 통해 생각해보자. 1,000 km 떨어진 위성의 위치 예측 오차가 3 km이고 빔폭(Full Width)이 100 μrad 인 레이저를 사용한다면 약 30바퀴를 회전해야 상대 위성에게 닿을 수 있다. 이렇게 레이저를 보내고 받는 도중 위성은 계속 위치가 바뀌므로, 한 번으로 완료되는 것이 아니라 신호가 발견될 때마다 조금씩 위치 추정 오차를 줄여가며 2차, 3차, n차 획득 과정을 거치는 것이다. 획득 기술은 빛을 흘뿌리고 확인하는 시간을 최대한 줄이는 것이 중요할 것이다. 이에 가장 선도적인 기술을 가진 Starlink 시스템은 약 10초 내외의 시간에 획득을 수행한 바 있다 [3]. 달리 말하면 10초 내에 몇 번씩이나 나선을 그어야 하는 것이다. 빔의 방향을 빠르게 나선형으로 움직이기 위해 가대나 위성 자세제어 대신 통신 터미널 내부 광학계의 빔 조향 시스템이 필요하다. 이에 대한 설명은 빔 추적 과정에서 이어진다.

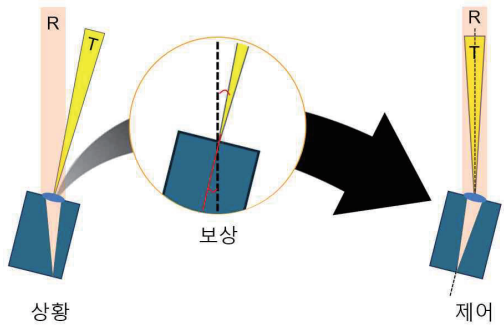


그림 3 빔 조향 제어 과정의 모식도. 수신 위치를 중심 위치에 정확하게 두면 송신광도 정확하게 상대방을 향하게 된다.

3) 빔 추적

일반 광통신 수신부는 렌즈와 광다이오드로 구성되는데, 무선 광통신 장비에는 빔 조향 시스템이 추가된다. 그림 3과 같이 입사광의 각도를 측정하고 그 역방향으로 빛을 움직여 광다이오드에 계속 닿을 수 있게 한다. 제어 기법에 대해서 다음 섹션에서 설명될 예정이다. 기술적으로는 센서와 조향 장치의 성능을 향상시키는 개발이 주로 진행 중이다. 센서로는 4개의 다이오드를 이용하는 사분면 센서(Quadrant PhotoDiode, QPD)나, 여러개의 광 검출소자를 이용하는 초점면 배열(Focal Plane Array, FPA)이 모두 연구되고 있으며 일반적으로 속도가 빠른 QPD를 이용한다. 조향 장치는 전통적으로는 거울의 각도를 조절하는 고속 조향 거울(Fast Steering Mirror, FSM)을 기반으로 하여 기술이 개발되어왔고 우주에서 실증된 조향 장치는 FSM 뿐이다. 이외에는 여러 개의 렌즈를 수평 이동시켜 방향을 제어하는 광학 흔들림 보정 장치(Lens Shift Optical Image Stabilizer, LS-OIS)에 대한 연구가 수행된 바 있고 [4], 광학 위상 배열기(Optical Phased Array, OPA)의 개발은 활발한 편이며 [5], 편광기술을 접목한 액정 스위치(Liquid Crystal Switch, LCS)는 검토되는 수준이다 [6]. 위상 배열기 등의 비기계적인 조향 장치는 우주 기술로서 적합하지만, 빔 조향부는 제어가 정밀하고 성능이 일관적이며 손실을 최소화해야 하기 때문에 기계적 방식의 한계를 극복할지를 지켜볼 필요가 있다.

4) 빔 조향 제어 기법

그림 3을 통해 간단하게 이해할 수 있는 빔 조향 시스템은, 두 위성이 각자의 수신광을 각자의 광학 중심선(principal axis)에 맞추도록 하는 시스템이다. 통신계의 모든 광학 소자를 중심선 위에 두고, 두 위성의 중심선을 맞춘다는 간단한 제어 원칙이 적용된다. 따라서 기틀이 되는 제어 루프는 그림 4와 같이 표현할 수 있다. 항상 입사광의 방향이 QPD의 중심을 향하도록 FSM을 제어하는 피드백 제어기를 통해 빔 추적을 달성한다.

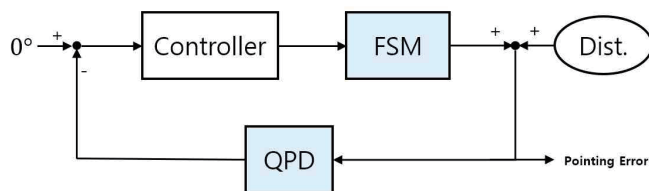


그림 4 빔 조향 제어를 위한 피드백 제어루프

그림 4의 제어기는 오차를 0으로 만들기 위한 제어 규칙을 가지고 있으나 외란(Dist.)이 즉각적으로 오차를 발생시키기 때문에 실제로는 오차가 0이 될 수 없으며, 외란의 변화율에 따라 제어 후의 오차가 더 커질 수 있다. 이러한 상황에 대응하는 방법으로 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB) 혹은 내부 모델 제어(Internal Model Control, IMC) 기법이 제안되었다. 두 기법은 측정값으로부터 외란을 직접 복원하여 상쇄하는 입력을 만들어내는 기법이다. 그림 5와 6에 표현된 외란 복원 지점은 노란색으로

강조되어 있다. 두 제어기는 외란의 발생원에 대해 다른 입장을 가지고 있다. 외란 관측기는 구동장치 P의 입력 신호가 왜곡에 초점을, 내부 모델 제어기는 외란 환경의 존재에 초점을 둔다. 각 제어기가 바라보는 외란은 전달함수 P를 사이에 두고 변환 관계에 있을 뿐이지만, 구동 장치의 성질에 따라 적합한 제어기가 다르다. 무선 광통신 빔 조향 시스템의 경우, 구동 장치가 강건한 편이며 외란 환경의 불규칙성이 적어 내부 모델 제어기를 사용하는 것이 적합하다고 할 수 있다.

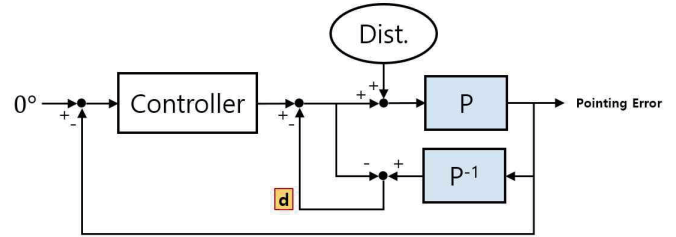


그림 5 외란 관측기 다이어그램 개념도. (실제 구현 시 변형됨)

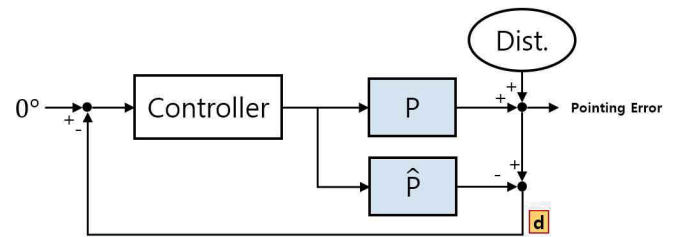


그림 6 내부 모델 제어기 다이어그램 개념도. (실제 구현 시 변형됨)

III. 결론

본 논문에서는 위성의 자유공간 광통신 터미널이 빔 조향을 수행하는 절차인 지향-획득-추적 과정의 기술적인 핵심 요소를 고찰하고, 근본적인 제어 원리에 대해 알아보았다. 빔 조향 시스템에 대한 종합적 이해는 최적의 시스템을 개발하는 토대가 될 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-040, 이종 위성군 우주 감시정찰 기술 특화연구센터)

참고 문헌

- [1] Vallado, David, et al. "Revisiting spacetrack report# 3." AIAA/AAS astrodynamics specialist conference and exhibit. 2006.
- [2] url: <https://www.tesat.de/>
- [3] Brashears, Travis R. "Achieving 99% link uptime on a fleet of 100G space laser inter-satellite links in LEO." Free-Space Laser Communications XXXVI. Vol. 12877. SPIE, 2024.
- [4] Bekkali, Abdelmoula, Hideo Fujita, and Michikazu Hattori. "New generation free-space optical communication systems with advanced optical beam stabilizer." Journal of Lightwave Technology 40.5 (2022): 1509-1518.
- [5] McManamon, Paul F., et al. "Optical phased array technology." Proceedings of the IEEE 84.2 (1996): 268-298.
- [6] Zhang, Guanxiong, et al. "Non-mechanical optical beam-steering of a liquid crystal laser." Optics & Laser Technology 157 (2023): 108623.