

# 상관 채널 환경에서의 무선 광통신 빔 정렬 오차 추정 알고리즘

차홍설, 고영채  
고려대학교

<chahongseol, koyc>@korea.ac.kr

## Beam Alignment Error Estimation Algorithm on Free Space Optical Communications under Correlated Lognormal Channel

Hong-Seol Cha, Young-Chai Ko  
Korea Univ.

### 요 약

본 논문은 상관 채널 환경에서의 무선 광통신 빔 정렬 오차 추정 알고리즘을 제안한다. 통신 링크와 정렬 오차 추정 링크의 분리 과정에 의해 발생하는 빔 전력 손실을 극복하기 위해 수신 단 평면에 보조 렌즈를 추가하여 통신 링크만을 사용한 빔 정렬 오차 추정 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 상관 채널 환경에서 알고리즘 성능 검증을 진행한다.

### I. 서 론

무선 광통신은 광섬유 등의 매질이 아닌 대기, 우주 공간 등의 매질을 통해 진행되는 통신 기법으로 기존 RF 통신과 다르게 주파수 제약 문제가 없고 고속의 통신 속도, 넓은 대역폭, 그리고 보안성이 보장되는 기술이다. 무선 광통신의 빔은 좁은 발산 각도와 강한 직진성을 가지고 있어, 송수신단 사이의 정밀한 빔 정렬을 요구하며 관련 연구가 활발히 진행되고 있다 [1].

기존 빔 정렬 오차를 추정하기 위해, beam-splitter 를 통해 통신 링크와 오차 추정 링크를 분리하여 진행하는 기법은 통신 링크에 사용되는 총 전력을 감소시키는 문제를 발생시킨다. 이를 극복하고자 수신 렌즈 평면에 보조 렌즈를 추가하여 송신 전력의 분할 없이 빔 정렬 오차를 추정하는 알고리즘을 제안하고, 공간적 상관 채널을 겪는 무선 광통신 환경에서의 성능 검증을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 진행한다.

### II. 시스템 및 채널 모델

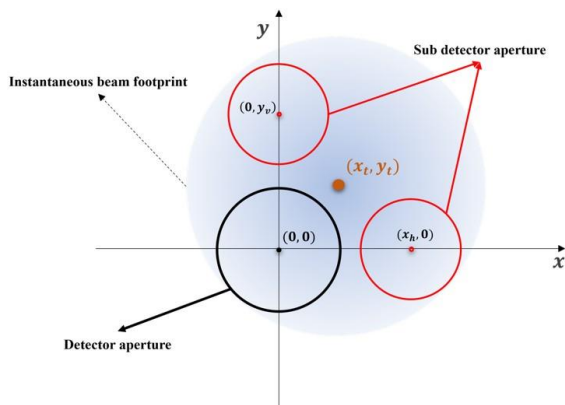


그림 1 수신 단 평면에서의 보조 렌즈 배치도

그림 1 은 본 논문에서 사용한 무선 광통신 시스템 모델로 수신 렌즈 평면에 두개의 보조 렌즈를 각각 수평 및 수직 방향으로 추가하여 위치시킨 상황을 나타낸다.

수신 렌즈 및 보조 렌즈는 각각  $x_h, y_v$  만큼 떨어진 거리에 위치하여 묶여 있는 상황으로, 같은 크기의 빔 정렬 오차를 겪을 뿐더러 공간적 상관관계를 따르는 대기 난류의 영향을 받는다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 상관 채널을 겪는 3 개의 광 검출기를 통해 수신된 신호의 세기를 사용하여 빔 정렬 오차를 추정하고 칼만 필터를 통해 해당 오차의 정확도를 향상시키는 기법이다.

하나의 송신 단에서 송신된 빔 레이저가 수신 단 평면에 위치한 광 검출기들에 수신되는 과정에서 겪는 무선 광통신 채널은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$h_i = h_l h_{a,i} h_{p,i}, \quad i \in \{r, v, h\}, \quad (1)$$

$h_r$ 는 송신 단과 수신 렌즈 사이의 채널 정보를 의미하며,  $h_h, h_v$  는 각각 송신단과 수평, 수직 방향에 위치한 보조 렌즈 사이의 채널 정보를 의미한다. 송수신 거리는 동일하여 거리에 의한 감쇠  $h_l$  은 동일하다고 가정한다.  $h_{a,i}$  는 대기 난류에 의한 감쇠로 평균이 1 인 난수로 표현되는 성분이며, 가까이 위치한 렌즈들은 서로 떨어진 거리 ( $d_{ij}$ )에 대해  $\rho_{ij} = \exp(-d_{ij} / \sqrt{\lambda z})$  의 공분산을 가지는 상관 로그-노말 분포를 따른다 [2]. 마지막으로  $h_{p,i}$ 는 빔 정렬 오차에 의한 성분으로 거리에 대해 빔이 퍼진 정도 및 각 수신 렌즈의 중심과 수신된 빔 중심 사이의 거리에 대한 수식으로 표현할 수 있다 [3].

### III. 빔 정렬 오차 추정 알고리즘

#### 1) 보조 렌즈를 통한 빔 정렬 오차 크기 추정

수신 렌즈 및 보조 렌즈에 수신된 신호의 세기를 통해 추정된 채널  $\hat{h}_i$ 를 이용하여 식의 간편화를 위해 아래와 같이 수식을 정리한다.

$$\tilde{h}_i = \left( \frac{\hat{h}_i}{h_l A_{0,i}} \right)^{(w_{zeq,i} / w_{zeq,i})^2}, \quad i \in \{r, v, h\}, \quad (2)$$

$A_{0,i}, w_{zeq,i}$  는 수신 렌즈 및 보조 렌즈의 크기에 따라 변하는 변수를 의미한다. 식 (2)를 이용하여 보조 렌즈에

수신된 빔이 겪는 채널과 수신 렌즈에 수신된 빔이 겪는 채널 사이의 관계를 정리하여 최종적으로 빔 정렬 오차를 추정할 수 있다.

$$\tilde{x} = \frac{w_{zeq,r}^2}{2x_h} \operatorname{atanh} \left( \frac{\tilde{h}_h - \tilde{h}_r}{\tilde{h}_h + \tilde{h}_r} \right) + \frac{1}{2} x_h \quad (3)$$

$$\tilde{y} = \frac{w_{zeq,r}^2}{2y_v} \operatorname{atanh} \left( \frac{\tilde{h}_v - \tilde{h}_r}{\tilde{h}_v + \tilde{h}_r} \right) + \frac{1}{2} y_v \quad (4)$$

난류에 의한 감쇠 정보를 unknown parameter 로 지정하여 진행되는 알고리즘으로 대기 난류로 인한 감쇠는 시스템의 불확실성에 기여하게 된다.

## 2) 칼만 필터를 통한 오차 보정

칼만 필터는 노이즈가 섞인 측정 값을 통해 시스템의 최적 값을 추정하는 방법으로, 선형 동작 시스템에서 상태 추정 문제에 효과적인 방법이다. 본 알고리즘에서는 빔 정렬 오차 추정 알고리즘을 통해 측정된 값  $\hat{x}, \hat{y}$  과 시스템 설정에 따라 계산된 값을 바탕으로 최종 예측 값인  $\hat{x}, \hat{y}$  를 추정한다.

## IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

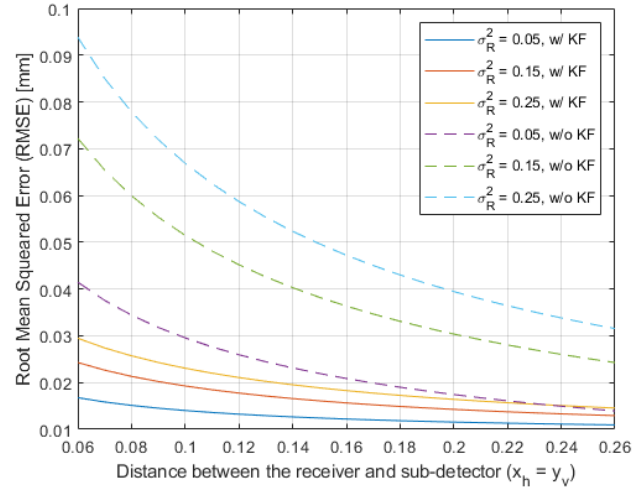


그림 2 제안 알고리즘의 RMSE 성능 결과

Parameter	Symbol	Value
Propagation distance	$z$	8 [km]
Frequency	$f$	1550 [nm]
Beam waist	$w_o$	2 [cm]
Receiver radius	$r_a$	3 [cm]
Sub-detector radius	$r_{sub}$	3 [cm]
Strength of jitter	$\sigma_p$	1 [cm]
Strength of turbulence	$\sigma_R^2$	0.05 : 0.1 : 0.25

표 1 시뮬레이션 파라미터

그림 2 는 수신 렌즈와 보조 렌즈의 중심 사이의 거리에 따른 알고리즘의 RMSE 를 표현한 그래프로, 표

1 의 파라미터 값을 바탕으로 진행한 MATLAB 시뮬레이션 결과이다. 점선과 실선은 각각 칼만 필터를 추가하지 않은 경우와 칼만 필터와 결합하여 빔 정렬 오차를 추정한 경우의 성능 결과이며, 이를 통해 대기 난류의 세기 및 칼만 필터의 적용 유무에 대한 성능을 확인할 수 있다. 칼만 필터 적용의 유무와 상관없이 대기 난류에 의한 상관 채널이 유발하는 알고리즘 오차로 인해 대기 난류의 세기가 강해질수록 알고리즘의 성능이 하락하는 것을 알 수 있으며, 칼만 필터 적용을 통해 그 정도를 낮출 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 3(a)는 전체 iteration 동안의  $x$  위치의 참 값 및 추정 값을 나타낸 그래프로 추정 값은 iteration 이 반복됨에 따라 점차 수렴해 나가는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)와 (c)는 각각  $x, y$  위치의 참 값, 측정 값, 그리고 추정 값을 표현한 그래프로, 추정 값이 참 값 근처에서 나타나는 것을 확인할 수 있다.

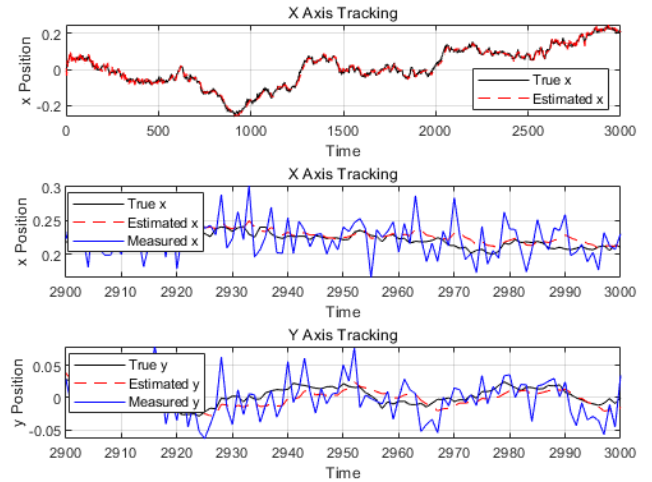


그림 3 칼만 필터를 통한 노이즈 보정

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021-0-00260, 저궤도 군집 소형 위성 간 통신 기술 개발)

## 참 고 문 헌

- [1] Kaymak, Yagiz, et al. "A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications." *IEEE communications surveys & tutorials* 20.2 (2018): 1104-1123.
- [2] M. R. Abaza, R. Mesleh, A. Mansour, and E.-H. M. Aggoune, "Diversity techniques for a free-space optical communication system in correlated log-normal channels," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 1, p. 016102, Jan. 2014.
- [3] A. A. Farid and S. Iranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *IEEE10SA J. lightw. Technol.*, vol. 25, no. 7, pp. 1702-1710, 2007.