

다중렌즈 무선 광통신 시스템의 점근적 심볼 오류율 상계 분석

김종민, 박기홍*, 고영채, Mohamed-Slim Alouini*

고려대학교, *King Abdullah University of Science and Technology

{botboy0441, koyc}@korea.ac.kr, *{kihong.park, slim.alouini}@kaust.edu.sa

Asymptotic Upper Bound Analysis of Symbol Error Rate in Multi-Lens Free Space Optical Communication Systems

Jong-Min Kim, Ki-Hong Park*, Young-Chai Ko, Mohamed-Slim Alouini*

Korea Univ., *King Abdullah University of Science and Technology

요약

본 논문에서는 다중렌즈 기반 무선 광통신 시스템에서 점근적 심볼 오류율의 상계를 유도하고, 이를 통해 시스템의 성능 특성을 분석하였다. 고정 빔 정렬 오차(boresight)가 없고, 렌즈 배열이 대칭적 정다각형 형태를 가질 때, 제안된 상계는 고 신호 대 잡음비 영역에서 실제 심볼 오류율과 근사도가 높은 정밀한 경계를 제시함을 확인하였다.

I. 서론

전 세계의 인터넷 연결망은 여전히 광케이블에 의존하고 있으나, 그 설치 비용은 1 km당 약 37,000달러에서 50,000달러에 이르는 것으로 알려져 있다[1]. 이에 따라 고비용의 유선 인프라를 대체할 수 있는 기술로서, 적외선 레이저 빔을 이용한 무선 광통신 기술이 지난 수십 년간 활발히 연구되고 있다. 무선 광통신은 복잡한 유선 케이블 없이도 수백 km 이상의 초장거리 전송이 가능하며, 주파수 사용권의 제약 없이 넓은 대역폭을 활용함으로써 Tbps급 고속 통신을 지원할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 무선 광통신은 지형이나 지물의 제약을 받지 않고 지상 및 비지상망 기반의 효율적인 백홀 네트워크 구축에 유리하다.

그러나 무선 광통신의 가장 큰 한계로 지적되는 문제는 빔 정렬 오차이다. 매우 좁은 빔폭 특성으로 인해 미세한 조준 오차만 발생해도 통신이 단절될 수 있다. 이러한 빔 정렬 오차로 인한 성능 저하를 완화하기 위해 다중렌즈 기반의 수신기법이 제안되고 있으며, 이 경우 단일 송신 빔으로 인해 각 수신 렌즈 간 상관관계가 형성된다. 따라서 이는 일반적인 RF 통신의 다중 수신 시스템과는 다른 성능 분석이 요구된다. 본 논문에서는 무선 광통신 시스템의 고 신호 대 잡음비 영역에서 점근적 비트오류율의 상계에 대한 성능을 분석한다. 근사 해석과 함께 다이버시티 이득 및 다이버시티 오더에 대하여 논의하고, 이를 바탕으로 다중렌즈 기반 무선 광통신 시스템의 성능 추이를 분석한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 송신 렌즈를 가진 송신기가 M 개의 렌즈로 구성된 수신기로 신호를 전송하는 SIMO (Single Input Multiple Output) 환경을 가정한다. 송신단은 광 세기 변복조(Intensity Modulation and Direct Detection, IM/DD) 방식을 사용하여 데이터를 전송하며, 수신단은 동등 이득 결합(Equal Gain Combining, EGC) 기법을 통해 신호를 결합한다. 송신 빔의 세기는 가우시안 분포를 따른다고 가정하며, 수신단

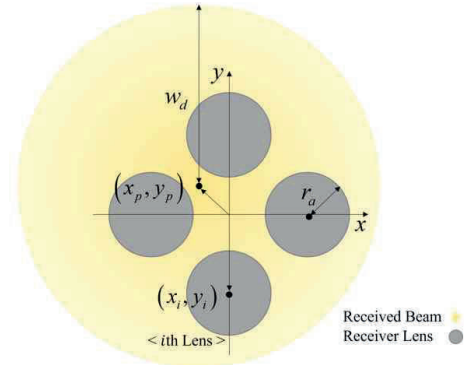


그림 1 수신 렌즈와 수신 빔 모델

에서 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y = \sum_{i=1}^M h_i x + n \quad (1)$$

이때 n 은 AWGN(additive white Gaussian noise)이다. 식 (1)의 h_i 는 i 번째 렌즈에서의 채널 이득이며, 이는 광-전기 변환 이득 η , 대기 난기 감쇠 이득 $h_{a,i}$, 그리고 빔 정렬 오차 $h_{p,i}$ 를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$h_i = \eta h_{a,i} h_{p,i} \quad (2)$$

본 연구에서 $\eta = 1$, $h_{a,i}$ 는 $LN(\mu, \sigma^2)$ 의 로그 정규(log-normal) 확률변수로 정의된다. 또한, $h_{p,i}$ 는 가우시안 확률 분포를 따르는 수신 렌즈와 수신 빔 중심 간의 상대 좌표 (x_p, y_p) 에 대한 함수로 표현되는 기하학적 손실로 다음과 같이 정의된다[2].

$$h_{p,i} = A_0 \exp\left(-2 \frac{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}{w_{d,eq}^2}\right) \quad (3)$$

본 연구에서는 x_p 와 y_p 는 $N(0, \sigma_p^2)$ 의 가우시안 확률변수로 정의된다. 또

한 식 (3)에서, $A_0 = (erf(v))^2$, $v = \sqrt{\pi} r_a / \sqrt{2} w_d$, $w_{d,eq}^2 = w_d^2 \frac{\sqrt{\pi} erf(v)}{(2v \exp(-v^2))}$,

$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) dx$ 의 관계식의 정의를 따르며, r_a , w_d 는 수신

렌즈의 반지름과 수신 빔의 반지름을 의미한다. 또한, (x_i, y_i) 는 i 번째 렌즈의 중심 좌표이며, 렌즈 배열은 대칭을 이루는 정다각형 형태로 가정한다.

송신단에서의 평균 신호 대 잡음비를 $\bar{\gamma} = E[x^2]/N_0$ 로 정의할 때, 채널을 거친 후 수신단에서의 신호 대 잡음비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\gamma = \bar{\gamma} \left(\sum_{i=1}^N h_{a,i} h_{p,i} \right)^2 \quad (4)$$

2. SIMO 무선 광통신 시스템의 점근적 심볼 오류율 상계

SISO(single input single output) 시스템에서 점근적 심볼 오류율은 [3]에서 정의된 코딩 이득 C 와 다이버시티 차수 d 를 이용하여 QPSK의 경우 $P_{SER} = (C\bar{\gamma})^{-d}$ 로 유도된다. 이때, 점근적 심볼 오류율의 상계를 유도하기 위하여 아웃티지 확률의 수식적 변화를 이용한다. 먼저, 아웃티지 확률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{out}(\gamma_{th}) = \Pr\{\gamma < \gamma_{th}\} = \Pr\left\{\sum_{i=1}^N h_{a,i} h_{p,i} < \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}}\right\} \quad (5)$$

이때, γ_{th} 는 신호대잡음비 임계값이다. $h_{p,max} = \max_i h_{p,i}$ 라고 정의하면 고신호 대 잡음비 영역에서 식 (5)의 상계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr\left\{\sum_{i=1}^N h_{a,i} h_{p,i} < \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}}\right\} < \Pr\left\{h_{a,i} h_{p,max} < \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}}\right\} \quad (6)$$

이때, $h_{p,max}$ 의 상계는 빔과 가장 가까운 거리에 위치한 렌즈에서의 $h_{p,i}$ 값이 된다. 이때 그 상계는 다중렌즈 배열의 중심으로부터 가장 바깥쪽에 있는 렌즈와 빔이 나란히 위치할 때에 도달한다. 이를 기반으로 아웃티지 확률의 상계와 SISO 시스템의 점근적 심볼 오류율 간의 관계를 이용하면, SIMO 시스템의 점근적 심볼 오류율 상계를 SISO의 결과를 바탕으로 표현할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$P_{SER} = \left(C\bar{\gamma} \exp\left(-\frac{4}{w_{deq}^2} \left(2a \sqrt{-\frac{w_{deq}^2}{4} \ln\left(\frac{\bar{\gamma}}{A_0^2}\right) + a^2}\right)\right)\right)^{-d} \quad (7)$$

이때, a 는 렌즈 배열의 중심으로부터 렌즈 배열 정다각형의 한 변의 중심까지의 거리이다.

3. 시뮬레이션 결과

본 시뮬레이션에서는 7개의 렌즈 배열을 고려하였으며, $\sigma_p^2 = 0.8$ m로 설정하였다. 또한 $r_a = 0.1$ m, $w_{z0q} = 1$ m, $a = 0.2, 0.4$ m의 조건에서 실제

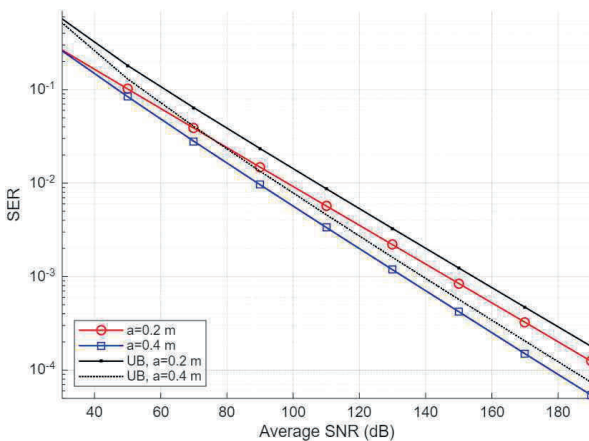


그림 2 신호 대 잡음비에 따른 심볼 에러율과 그 상계 결과

심볼 오류율과 식 (7)을 기반으로 한 상계 결과를 그림 2에 함께 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 본 연구에서 유도된 상계는 고신호 대 잡음비 영역에서 실제 심볼 오류율과 근사도가 높은 정밀한 경계(tight bound)를 제시함을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구의 결과는 렌즈의 개수와 관계없이 다이버시티 오더가 유지됨을 보여준다. 그러나 코딩 이득은 렌즈 간 배열에 따라 감쇠 특성의 영향을 받아 성능 차이를 유발함을 시사한다.

III. 결론

본 논문에서는 다중렌즈 기반 무선 광통신 시스템에서 점근적 심볼 오류율의 상계를 유도하였다. 유도된 결과는 고신호 대 잡음비 영역에서 실제 심볼 오류율과의 근사도가 높은 정밀한 경계를 제시하였으며, 다이버시티 오더는 유지되지만 코딩 이득은 렌즈 배열 구조에 따라 변동됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 유도 결과는 다중렌즈 기반 무선 광통신 시스템의 성능 분석 및 설계 최적화에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-[2023-00242396](tel:202300242396)).

참 고 문 헌

- [1] Dgtl Infra, "Fiber Optic Network Construction: Process and Build Costs," Dgtl Infra, January 15, 2024, (<https://dgtlinfra.com/fiber-optic-network-construction-process-costs/>).
- [2] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors," J. Light. Technol., vol. 25, no. 7, pp. 1702-1710, July 2007.
- [3] F. Yang, J. Cheng and T. A. Tsiftsis, "Free-Space Optical Communication with Nonzero Boresight Pointing Errors," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 62, no. 2, pp. 713-725, Feb. 2014.