

# 지향 오차 및 대기 난류를 고려한 hybrid FSO/RF 시스템의 APSO 기반 적응형 전송 기법

권송미, 김환진  
경북대학교

{thdal0709, hwanjin}@knu.ac.kr

## 요약

본 논문에서는 대기 난류와 지향 오차(pointing error)가 존재하는 환경에서 가속 입자 군집 최적화(accelerated particle swarm optimization, APSO) 알고리즘을 통한 적응형 전력 할당 및 변조 방식 선택 기법을 사용해, hybrid 광통신(free space optical communication, FSO)/무선 주파수(radio frequency, RF) 시스템의 성능 최적화를 제안한다.

## I. 서 론

최근 저궤도 인공위성(low earth orbit, LEO) 위성군과 지상망을 결합한 통합 네트워크는 전 지구적 서비스 커버리지 확장과 QoS 향상을 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 위성-지상 간의 데이터 수요를 감당하기 위해 기존 RF 대역과 함께, 대규모 대역폭을 가지고 초고속 전송이 가능한 FSO 기술이 필수적으로 요구된다.[1]

기존 연구들은 기상 조건에 따른 FSO 링크의 성능을 분석하고, hybrid FSO/RF 시스템의 최적 전송을 연구해 왔다. 특히 대기 난류 모델링과 APSO 알고리즘을 통한 적응형 전송 기법은 시스템 성능 개선에 유의미한 결과를 보여주었다.[2] 그러나 실제 위성 통신 환경에서는 지향 오차가 채널 신뢰성을 저하시키는 큰 요인이다. 본 논문에서는 기존의 대기 난류 모델에 지향 오차를 추가로 통합하여 업데이트된 FSO 채널 모델을 사용하고, 이를 기반으로 APSO 알고리즘을 적용하는 최적화 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 한층 더 실제적인 채널 환경에서 전력 할당과 변조 방식을 최적화함으로써, 시스템의 총 MI를 극대화하고 hybrid 통신망의 안정성을 개선할 수 있다.

## II. 본론

본 논문에서 고려하는 hybrid FSO/RF 시스템은 채널 상태에 따라 전력 할당량( $\rho, \hat{\rho}$ )과 변조 방식(M-PAM, M-PSK 등)을 동적으로 변경하여 전체 MI를 최대화하는 적응형 전송 구조를 갖는다. 최적의 전송 파라미터 세트를 결정하기 위해 루프 테이블 기반의 APSO 알고리즘을 사용한다. 그리고 기존 연구에서 다루지 않았던 지향 오차 성분을 추가하여, 실제 환경에서의 성능을 분석하기 위한 채널 모델을 다음과 같이 수립한다.

FSO 링크는 신호 의존적 가우시안 잡음 모델을 기반으로 하며, 수신 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$y = \eta\kappa_s + \sqrt{\eta\kappa_s}z. \quad (1)$$

여기서  $\kappa_s$ 는  $\lambda + Phs$ 이고,  $P$ 는 전력,  $h$ 는 FSO 채널의 fading gain,  $s$ 는 FSO 채널의 심볼이다.  $\eta$ 는

검출기 효율(photodetector efficiency),  $\lambda$ 는 배경 광 복사 강도(background light irradiation),  $z$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 가우시안 잡음이다.

대기 난류에 의한 fading을 모델링하기 위한 Gamma-Gamma 분포의 확률 밀도 함수(PDF)는 다음과 같다.

$$f_{I^p}(x) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}} x^{\frac{\alpha+\beta-1}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta x}), \quad x > 0. \quad (2)$$

이 때  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 small-scale과 large-scale의 대기 난류 값이고,  $K_v(\cdot)$ 는 제2종 변형 베셀 함수이다.

본 연구에서는 추가적으로 송수신기 간 정렬 불량으로 인한 지향 오차( $I^p$ )를 고려한다.[3] 지향 오차의 PDF는 modified Rayleigh 분포를 적용해 다음과 같이 도출된다.

$$f_{I^p}(I_p) = \frac{\xi_{eq}^2}{P_0^{\xi_{eq}^2}} I_p^{\xi_{eq}^2-1}, \quad 0 \leq I_p \leq P_0. \quad (3)$$

이 때  $\xi_{eq}$ 는 지향 오차 계수이고,  $P_0$ 는 안테나 배열 오차가 없을 때의 collected power이다.

$S$ 가 FSO 링크의 input constellations일 때, 선택된  $S$ 에 대해  $pr_o(y|s)$ 에 대한 MI를 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(S, pr_o(y|s)) &= \log_2 |S| \\ &- \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \int_{y \in C} pr_o(y|s) \log_2 \left( \frac{pr_o(y|s)}{\sum_{s' \in S} pr_o(y|s')} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$pr_o(y|s, h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\kappa_s}} \exp \left( -\frac{(y - \kappa_s)^2}{2\kappa_s} \right). \quad (5)$$

RF 채널에서는 위성 통신 환경에 적합한 Rician fading 모델을 적용하며, 수신 신호는

$$\hat{y} = \sqrt{E_s} \hat{h} \hat{s} + \hat{z}, \quad (6)$$

로 정의된다. 이 때  $E_s$ 는 심볼 에너지,  $\hat{s}$ 은 RF 채널의 심볼이다.  $\hat{h}$ 은 RF 채널의 fading gain이고,  $\hat{z}$ 은  $\hat{s}^2$ 의 분산을 가지는 i.i.d. 가우시안 잡음이다.  $\hat{s}$ 는 RF 채널의 input constellations일 때, 선택된  $\hat{s}$ 에 대해

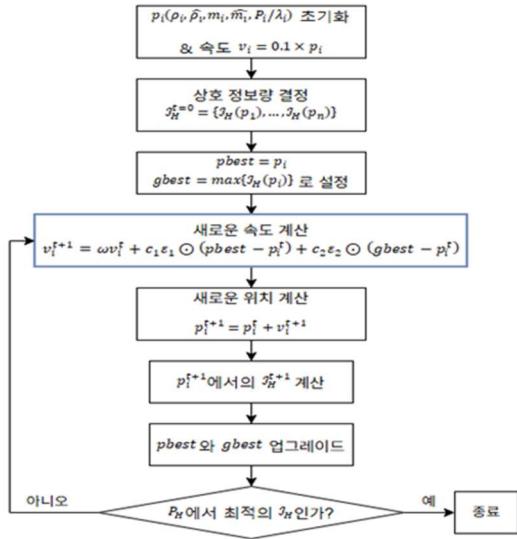


그림 1. APSO 알고리즘의 흐름도.

$pr_r(\hat{y}|\hat{s})$ 에 대한 MI를 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{J}(\hat{s}, pr_r(\hat{y}|\hat{s})) &= \log_2 |\hat{s}| \\ &- \frac{1}{|\hat{s}|} \sum_{\hat{s} \in \hat{s}} \int_{\hat{y} \in C} pr_r(\hat{y}|\hat{s}) \log_2 \left( \frac{pr_r(\hat{y}|\hat{s})}{\sum_{\hat{s} \in \hat{s}} pr_r(\hat{y}|\hat{s})} \right), \quad (7) \end{aligned}$$

$$pr_r(\hat{y}|\hat{s}, \hat{h}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}^2}} \exp\left(-\frac{|\hat{y} - \sqrt{E_s}\hat{h}\hat{s}|^2}{2\hat{\sigma}^2}\right). \quad (8)$$

제약 조건  $P_H \geq P_0 + P_r$  하에서 최적의 전력 분배 방식과 변조 방식( $m, \hat{m}$ )을 선택하기 위해서 APSO 알고리즘을 사용할 수 있다. APSO는 표준 입자 군집 최적화(PSO) 알고리즘을 단순화하고 수렴 속도를 높이기 위해 제안된 변형 알고리즘이다.[4] 그림 1은 APSO 알고리즘의 흐름을 나타낸다.

그림 2는 채널 상태 및 변조 방식에 따른 MI 변화를 나타낸다. X축은 SNR( $P/\lambda$  및  $E_s/N_0$ )을 동일한 dB 스케일로 나타냈으며, Y축은 MI값이다. 실선은 Rician fading 환경( $K=4$ )에서의 RF 성능을 나타낸다. 파선은 지향 오차를 고려하지 않은 순수 대기 난류 환경( $\alpha = 1, \beta = 2$ )에서의 FSO 성능이고, 점선은 지향 오차가 반영된( $\xi = 1.2$ ) 성능이다. 지향 오차를 고려하는 경우 MI값이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이를 륙업 테이블로 활용하여 APSO 알고리즘을 수행해 시스템의 총 MI를 최대화할 수 있다.

그림 3은 총 전력  $P_H$  변화에 따른 하이브리드 시스템의 총 MI값을 나타낸다. rain의 경우  $\rho$ 는 0.8,  $\hat{\rho}$ 은 0.3으로, fog의 경우  $\rho$ 는 0.3,  $\hat{\rho}$ 은 0.8로 설정하였다. 비적응형 방식(non-adapt)은 날씨 조건을 고려하지 않고 FSO와 RF 링크에 전력을 항상 똑같이 배분하는 방식이다. 채널의 변화에 대응할 수 없기 때문에 9dBm 부근에서 rain의 성능이 급격히 하락하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 적응형 방식(adapt)은 채널 변화에 유동적으로 대응할 수 있기 때문에 안정적인 통신 성능을 유지할 수 있다. Fog의 경우, 적응형 방식이 비적응형 방식에 비해 같은 MI값 기준으로 대략

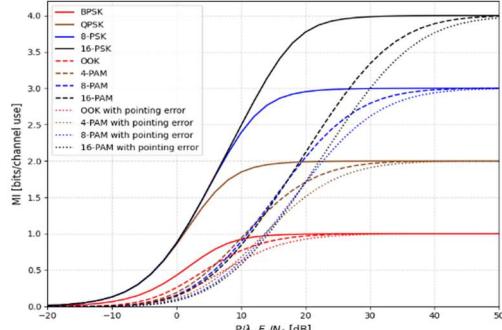


그림 2. MI 변화 그래프. (지향 오차 유무 비교)

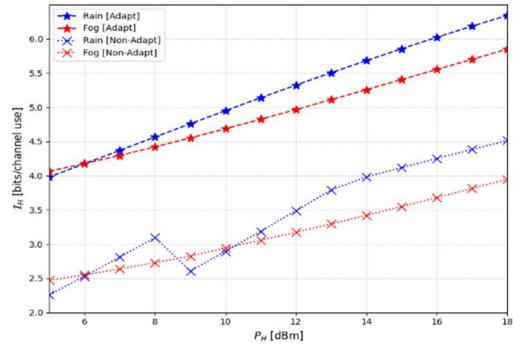


그림 3. 적응형 방식과 비적응형 방식의 성능 비교.

13dB의 전력 이득이 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 지향 오차가 존재하는 환경에서도 본 논문이 제안하는 적응형 방식은 여전히 안정적인 성능을 가진다.

### III. 결론

본 논문에서는 지향 오차가 포함된 통합 채널 모델을 바탕으로 hybrid FSO/RF 시스템의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 지향 오차가 시스템 성능에 미치는 부정적인 영향을 검증하였고, 륙업 테이블 기반 APSO 알고리즘을 적용하여 채널 변화에 최적화된 전력 할당과 변조 방식 선택이 가능함을 확인하였다. 제안된 적응형 방식은 지향 오차가 상존하는 환경에서도 고정형 방식보다 안정적인 성능과 유의미한 전력 이득을 얻었다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 지원으로 지원을 받아 제작하였고 저작권은 항공드론 혁신융합대학에 있습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. Liu et al., "LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains?" in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 7, pp. 30-36, July 2021
- [2] KHAN, Muhammad Nasir; KASHIF, Hasnain; RAFAY, Abdul. "Performance and optimization of hybrid FSO/RF communication system in varying weather". Photonic Network Communications, 2021, 41.1: pp. 47-56.
- [3] S. Shah, M. Siddharth, N. Vishwakarma, R. Swaminathan and A. S. Madhukumar, "Adaptive Combining Based Hybrid FSO/RF Satellite Communication With and Without HAPS," in IEEE Access, vol. 9, pp. 81492-81511, 2021
- [4] S. Fong, R. Wong and A. V. Vasilakos, "Accelerated PSO Swarm Search Feature Selection for Data Stream Mining Big Data," in IEEE Transactions on Services Computing, vol. 9, no. 1, pp. 33-45, 1 Jan.-Feb. 2016