

소규모 페이딩 환경에서 UAV 통신을 위한 정확한 에르고딕 전송률 평가 및 최적화

박기태, 이기송

동국대학교

xor17045@gmail.com, kslee851105@gmail.com

Accurate Ergodic Rate Evaluation and Optimization for UAV Communications under Small-Scale Fading

Park Gitae, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문은 소규모 페이딩 환경에서 평균 채널 이득에 기반한 전송률 계산이 실제 전송률을 과대평가하는 문제를 해결하기 위해, 전송률의 기대값을 직접 고려한 UAV 궤적 및 스케줄링 최적화 기법을 제안한다. 수치적 구분구적법을 활용하여 기대 전송률의 계산 가능한 하한을 도출하고, 이를 기반으로 비행 완료 시간을 최소화하는 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 기존 방안은 전송률을 과대평가하여 실제 운용 시 목표 전송률을 달성하지 못한 반면, 제안 방안은 채널 불확실성을 보수적으로 반영하여 실제 환경에서도 목표 전송률을 신뢰성 있게 보장함을 확인하였다.

I. 서론

최근 가시선 확보가 용이하고 기동성이 뛰어난 무인 항공기(UAV)를 활용한 무선 통신 연구가 활발히 이루어지고 있다. UAV 통신 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 UAV의 비행 궤적과 통신 자원 할당을 공동으로 최적화하는 것이 필수적이다. 그러나 실제 도심 환경에서의 UAV 통신 채널을 소규모 페이딩과 shadowing이 무작위적으로 변하는 특성을 가지므로, 궤적을 사전에 설계하는 오프라인 최적화 단계에서는 순간적인 채널 상태 정보를 정확히 파악하기 어렵다. 이로 인해 많은 기존 연구에서는 수식의 복잡성을 줄이고자 순간 채널 전력 이득 대신 그 평균값을 Shannon capacity에 직접 대입하여 전송률을 평가하고 최적화를 수행해왔다^{[1][2]}.

하지만 이러한 기존 연구들의 문제는 최소 전송률 보장과 같은 신뢰성 제약이 요구되는 경우, 평균 채널 대입 방식이 실제 기대 전송률을 낙관적으로 평가할 수 있다는 점이다. 특히 전송률은 채널 이득에 대한 오목 함수이므로, 평균 채널을 대입해 얻은 값은 실제 기대 전송률을 과대평가하게 된다. 이로 인해 최소 평균 전송률과 같은 신뢰성 제약이 포함된 문제에서, 평균 채널 대입 방식은 오프라인 최적해가 실제 운용시 제약을 위반하는 문제를 초래한다.

따라서 본 논문에서는 소규모 페이딩 환경에서 기대 전송률을 직접 최적화에 반영하기 위한 수치적 구분구적법 기반의 최적화 방식을 제안한다. closed-form 형태로 계산하기 어려운 기대 전송률을 계산 가능한 하한 형태로 근사하고, 이를 이용하여 최소 평균 전송률 제약을 엄격히 만족하면서 UAV의 비행 완료 시간을 최소화하는 궤적 및 스케줄링 공동 최적화 문제를 설계한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 UAV가 K 개의 지상 단말(GN)로부터 데이터를 수집하는 시스템을 고려한다. UAV의 비행시간 T 는 N 개의 타임슬롯으로 이산화되며, 각 슬롯의 길이 $\delta[n]$ 은 가변적이다. 따라서 총 비행 완료 시

간은 $T = \sum_{n=1}^N \delta[n]$ 이다. UAV는 고도 H_{\min} 과 H_{\max} 사이를 비행하며, 각 슬롯마다 최대 속도 제약 내에서 이동한다. UAV와 GN k 사이의 무선 채널은 고도각에 의존하는 PLoS 모델을 따른다. 채널의 전력 이득 $h_k[n]$ 은 채널 상태에 따라 다음과 같이 모델링된다.

$$h_k[n] = \begin{cases} h_k^L[n] \triangleq \beta_L |g_k^L|^2 d_k[n]^{-\alpha_L}, & \text{if LoS} \\ h_k^N[n] \triangleq \beta_N S_k[n] |g_k^N|^2 d_k[n]^{-\alpha_N}, & \text{if NLoS} \end{cases} \quad (1)$$

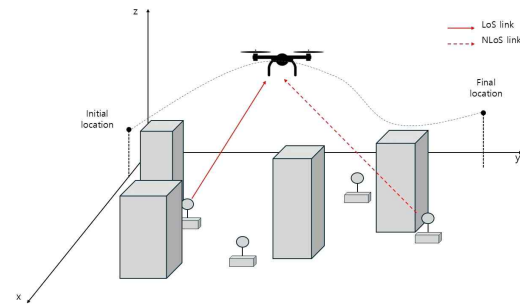


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

여기서 $|g_k^L[n]|^2, |g_k^N[n]|^2, S_k[n]$ 은 각각 Rician 페이딩, Rayleigh 페이딩, shadowing 이득을 나타낸다. 또한, $d_k[n]$ 은 UAV와 GN k 사이의 거리, α_L, α_N 은 LoS/NLoS에서의 경로 손실 지수, β_L, β_N 은 LoS/NLoS에서의 기준 채널 이득을 나타낸다.

각 GN는 송신 전력 P 로 데이터를 전송하며, 잡음 전력을 σ^2 이라 할 때 순간 전송률은 $R_k[n] = s_k[n] \log_2(1 + P h_k[n] / \sigma^2)$ 이다. 여기서 $s_k[n]$ 은 스케줄링 인디케이터이다.

타임슬롯 n 에서 PLoS를 반영한 GN k 의 기대 전송률은 다음과 같다.

$$\mathbb{E}[R_k[n]] = s_k[n]P_k^L[n]\mathbb{E}\left[\log_2\left(1 + \frac{Ph_k^L[n]}{\sigma^2}\right)\right] + s_k[n](1 - P_k^L[n])\mathbb{E}\left[\log_2\left(1 + \frac{Ph_k^N[n]}{\sigma^2}\right)\right]. \quad (2)$$

이때, $\mathbb{E}[\cdot]$ 는 $|g_k^L[n]|^2, |g_k^N[n]|^2, S_k[n]$ 에 대한 평균을 의미한다.

본 논문의 목표는 모든 GN에 대해 평균 기대 전송률 \bar{R}_k 가 최소 평균 전송률 R_{\min} 을 만족하면서, UAV의 비행 완료 시간 T 를 최소화하는 것이다.

III. 기존 평균 채널 대입 방식의 한계

오프라인 최적화 단계에서는 순간적인 채널 이득을 사전에 정확히 알 수 없다. 이로 인해 많은 기존 연구는 순간 채널 전력 이득을 평균값으로 치환한 뒤, 이를 Shannon capacity에 직접 대입하여 전송률을 다음과 같이 근사하는 방식을 사용했다.

$$R_k^{\text{avg}}[n] \triangleq s_k[n]P_k^L[n]\log_2\left(1 + \frac{PE[h_k^L[n]]}{\sigma^2}\right) + s_k[n](1 - P_k^L[n])\log_2\left(1 + \frac{PE[h_k^N[n]]}{\sigma^2}\right). \quad (3)$$

문제는 전송률 함수가 채널 이득에 대한 오목 함수라는 점이다. 즉,

$$\mathbb{E}[R_k[n]] \leq R_k^{\text{avg}}[n], \quad (4)$$

가 항상 성립하므로, 평균 채널 대입으로 계산한 기대 전송률은 실제 기대 전송률의 근사치가 아닌 상계가 된다. 따라서 최소 전송률 제약과 같은 신뢰성 제약이 포함된 문제에서, 평균 채널 기반 최적화는 오프라인 최적화 단계에서 제약을 만족하는 것처럼 보이지만, 실제 운용 시 제약을 위반하는 상황을 초래하게 된다. 특히 완료시간 최적화 문제는 해가 제약 경계에 근접하도록 최적화하는 경향이 강해, 이러한 낙관적 평가에 기반한 설계는 제약을 위반할 확률이 더욱 커진다. 이에 본 논문에서는 기대 전송률을 계산 가능한 형태로 변형하고, 이를 최적화 문제에 직접 반영한다.

IV. 제안방안

기존 연구들이 채널 평균화를 이용하여 전송률을 낙관적으로 근사한 것과 달리, 본 논문에서는 실제 전송률의 하한을 도출하여 최적화의 신뢰성을 보장하는 기법을 제안한다.

복합 페이딩 분포를 반영하기 위해 각 페이딩 성분의 누적 분포 함수를 이용하여 확률 분포를 이산화한다. 예를 들어 Rician 분포의 누적 분포 함수의 치역인 확률 범위 $[0, 1]$ 을 U_L 개의 등간격 구간으로 분할한다. 이때 $u \in \{1, \dots, U_L\}$ 번째 구간의 누적 확률 구간은 $\left[\frac{u-1}{U_L}, \frac{u}{U_L}\right]$ 이다. u 번째 구간의 대푯값 $\gamma_{L,u}$ 는 전송률의 하한을 보장하기 위해 해당 구간 내 최소값으로 선정하며, 이는 역누적분포함수 $F_{Ric}^{-1}(\cdot)$ 으로 결정된다.

$$\gamma_{L,u} \triangleq F_{Ric}^{-1}(u - 1/U_L) \quad (5)$$

동일한 방식으로 NLoS의 Rayleigh 페이딩 및 세도잉 분포에 대해서도 각 확률 범위를 U_N, U_S 등분 하여, 샘플 $\gamma_{N,i}$ 와 $\xi_{S,j}$ 를 도출한다.

전송률 함수는 단조 증가 함수이므로, 각 확률 구간의 하한값을 대입하여 계산한 평균 전송률은 실제 적분 값보다 항상 작거나 같음이 보장된다. 이를 이용하여 타임슬롯 n 에서의 기대 전송률을 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{R}_k[n] \triangleq s_k[n](P_k^L[n]\hat{R}_k^L[n] + (1 - P_k^L[n])\hat{R}_k^N[n]), \quad (6)$$

여기서 $\hat{R}_k^L[n]$ 과 $\hat{R}_k^N[n]$ 은 LoS/NLoS에서 전송률의 하한이며 다음과 같다.

$$\hat{R}_k^L[n] = \frac{1}{U_L} \sum_{u=1}^{U_L} \log_2\left(1 + \frac{P\beta_L \gamma_{L,u}}{\sigma^2 \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_k\|^{\alpha_L}}\right), \quad (7)$$

$$\hat{R}_k^N[n] = \frac{1}{U_N U_S} \sum_{i=1}^{U_N} \sum_{j=1}^{U_S} \log_2\left(1 + \frac{P\beta_N \gamma_{N,i} \xi_{S,j}}{\sigma^2 \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{w}_k\|^{\alpha_N}}\right), \quad (8)$$

본 논문에서는 도출된 하한을 이용하여 최적화 문제를 계산가능한 형태로 재구성하였다.

V. 시뮬레이션

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해 160개의 타임슬롯을 할당하고, 4개의 노드를 배치하였다. $R_{\min} = 2.4$ bps/Hz 환경을 고려하였으며, 성능 비교를 위해 두 가지 비교방안을 고려하였다.

- Baseline 1(nominal): 평균 채널 대입 기반 최적화,
- Baseline 2(margin): 실제 평균 전송률 제약을 만족하도록 Baseline 1에서 R_{\min} 을 상향 조정하여 최적화.

표 1. R_{\min} 제약조건 및 비행 완료 시간

Table 1. R_{\min} constraint and completion time

| Scheme | R_{\min} (bps/Hz) | Avg rate (bps/Hz) | Completion time(s) |
|-----------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| Proposed | 2.4 | 2.4348 (만족) | 31.3305 |
| Baseline 1 | 2.4 | 2.1717 (위반) | 25.6793 |
| Baseline 2 | 2.65 | 2.4126 (만족) | 35.0715 |

표 1은 두 기법이 R_{\min} 제약조건 하에서 달성한 실제 평균 전송률과 비행 완료 시간을 비교한 것이다. 제안방안은 기대 전송률의 하한을 최적화함으로써 실제 통신 환경에서도 R_{\min} 을 초과하는 2.4348 bps/Hz를 달성하여 신뢰성을 확보하였다. 반면, 기존방안은 오프라인 최적화에서는 제약조건을 만족하는 것으로 나타났으나, 실제 환경에서는 2.1717 bps/Hz에 그쳐 목표 전송률에 도달하지 못하는 문제가 발생하였다. 기존 기법이 목표 전송률을 달성하기 위해서는 제약 조건을 2.65 bps/Hz로 과도하게 상향해야 하며, 이 경우 비행 완료 시간이 약 35초로 제안 방안 대비 크게 증가하여 비효율적임을 확인하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 복합 페이딩 환경에서 UAV의 데이터 수집을 위한 궤적 및 스케줄링 최적화 기법을 제안하였다. 또한, 센스 부동식으로 인한 기존 연구의 전송률 과대평가 문제를 해결하기 위해, 수치적 구분구적법을 도입하여 기대 전송률의 계산 가능한 하한을 도출하였다. 시뮬레이션 결과, 기존방안은 전송률 과대평가로 인해 실제 환경에서 전송률을 달성하지 못하는 반면, 제안방안은 채널의 불확실성을 효과적으로 보상하여 실제 환경에서 목표 전송률을 안정적으로 보장함을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00343262).

참고 문헌

- [1] C. You and R. Zhang, "Hybrid offline-online design for UAV-enabled data harvesting in probabilistic LoS channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 6, pp. 3753–3768, 2020.
- [2] Z. Wang et al., "Robust Secure UAV Relay-Assisted Cognitive Communications with Resource Allocation and Cooperative Jamming," *Journal of Communications and Networks*, vol. 24, no. 2, pp. 139–153, Apr. 2022.