

확률적 가시선 채널 모델을 고려한 우주-공중-지상 통합 네트워크의 간섭 조정

정민주, 이기송

동국대학교

alswn874@naver.com, kslee851105@gmail.com

Interference Coordination for Space-Air-Ground Integrated Networks With Probabilistic LoS Channel Models

Chung Minju, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문은 확률적 가시선 채널 모델을 고려한 우주-공중-지상 통합 네트워크의 간섭을 조정함으로써 위성 지상국의 성능을 임계값 이상 보장하면서 무인 항공기가 서비스하는 지상 노드의 스펙트럼 효율성을 최대화하는 방안을 연구하였다. 이를 위해 현실적인 제약 조건을 고려하여 시스템을 수학적 으로 모델링한 후, 최적화 기법을 사용하여 문제의 비볼록성을 해결하고 최적의 자원 할당 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 위성의 지상국에 미치는 간섭을 줄이면서 지상 노드의 스펙트럼 효율성을 최대화하는 무인 항공기의 최적 경로 및 통신 자원 할당을 도출되는 것을 확인하였고, 제안 방안은 기존 방안보다 성능이 뛰어남을 확인하였다.

I. 서론

우주-공중-지상 통합 네트워크(Space-Air-Ground Integrated Networks, SAGIN)는 넓은 지역에 대한 무결점한 연결, 높은 처리량, 차세대 통신에 대한 강력한 내구성 등과 같은 장점으로 인해 주목을 받고 있다[1-2]. 특히 위성-지상 링크는 지상 간섭에 매우 민감하기 때문에[3], 통합 네트워크의 성능을 향상시키기 위해 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 효율적으로 사용하는 것이 필요하다. 공중-지상 링크를 활용하는 UAV 통신의 경우 UAV가 충분히 높게 비행하는 경우 가시선(Line-of-Sight, LoS) 채널이 보장될 수 있지만, 그렇지 않은 경우 건물 등과 같은 장애물로 인해 비가시선(Non-Line-of-Sight, NLoS) 채널이 존재할 수 있다. 따라서 공중-지상 링크의 LoS와 NLoS 상태를 모두 고려하기 위한 확률적 LoS 채널 모델에 대한 연구가 이루어 지고 있다. 하지만 SAGIN에서의 확률적 LoS을 고려하여 서로 다른 두 네트워크의 성능을 향상시키고자 하는 연구는 아직 존재하지 않는다.

따라서 본 논문에서는 확률적 LoS 채널 모델을 고려하여, 위성 네트워크의 성능을 임계값 이상 보장하면서도 UAV가 서비스하는 지상 노드의 스펙트럼 효율성을 최대화하기 위한 UAV의 최적의 경로 및 자원 할당 방안을 제안하고자 한다.

II. 본론

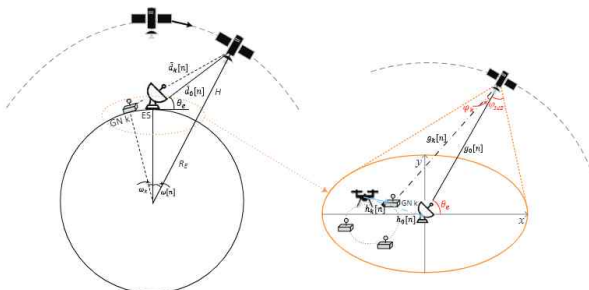


그림 1. 시스템 모델

본 논문에서는 한 대의 UAV가 출발점에서 도착점까지 비행하며 K개의 지상 노드를 서비스하고, 하나의 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO)이 지상국(Earth Station, ES)과 통신하는 시스템을 고려한다. 이때 UAV는 총 비행시간 T를 N개의 타임슬롯으로 나누어 사용하며, 비행의 시작은 출발점에서, 비행의 마무리는 도착점에서 이루어지도록 한다 (C1). 각 타임슬롯에서 UAV 최대 이동 거리는 최대속도와 타임슬롯 길이의 곱으로 제한하고 (C2), UAV의 수직 최대 이동거리는 수직 최대속도와 타임슬롯 길이의 곱으로 제한한다 (C3). 또한, UAV의 비행 고도 높이를 H_{\min} 에서 H_{\max} 사이로 제한한다 (C4). UAV는 각 타임슬롯 마다 어떤 지상 노드를 서비스 할지를 결정하는데, 타임슬롯 n일 때의 노드 k의 스케줄링 지표(Scheduling Indicator)를 $S_k[n]$ 으로 표현한다. 이는 이진 변수로 그 값이 1이면 서비스, 0이면 서비스하지 않는 것을 나타낸다 (C5). 또한, 타임슬롯 n에서 UAV는 여러 개의 노드를 동시에 서비스할 수 없고, 한 개 이하의 노드를 서비스해야 한다 (C6). 각 타임슬롯마다 UAV의 전송 전력은 0보다 크고 최대 송신 전력인 P_{peak} 보다 작아야하며 (C7), UAV의 평균 전송 전력은 P_{avg} 보다 작아야 한다 (C8).

타임슬롯 n에서의 UAV 수평 좌표와 수직 좌표를 각각 $q[n] = [x[n], y[n]]^T$ 와 $z[n]$ 으로 표현할 수 있고, k번째 노드의 수평 좌표를 $w_k = [x_k, y_k]^T$ 이라 표현할 수 있다. LoS 환경일 때 타임슬롯 n에서의 UAV와 k번째의 노드와의 채널은 다음과 같다.

$$h_k^L[n] = \beta_0 d_k[n]^{-\alpha_L} = \frac{\beta_0}{(\|q[n] - w_k\|^2 + z[n])^{\alpha_L/2}}. \quad (1)$$

여기서 β_0 는 기준 거리에서의 채널 전력 이득이며, α_L 은 LoS 환경일 때의 경로 손실 지수이다. 반면 NLoS 환경일 때 타임슬롯 n에서의 UAV와 k번째의 노드와의 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_k^N[n] = \mu\beta_0 d_k[n]^{-\alpha_N} = \frac{\mu\beta_0}{(\|q[n] - w_k\|^2 + z[n])^{\alpha_N/2}}. \quad (2)$$

여기서 α_N 은 NLoS 환경일 때의 경로 손실 계수이며, $\mu < 1$ 는 NLoS로 인한 추가적인 감쇄지표이다. UAV와 지상 노드 간의 채널의 LoS 확률을 $P_k^L[n]$ 라고 할 때 확률적 LoS를 고려하여, 타임슬롯 n에서의 UAV와 k번째의 노드와의 채널은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_k[n] = P_k^L[n]h_k^L[n] + (1 - P_k^L[n])h_k^N[n]. \quad (3)$$

이를 활용하여 타임슬롯 n에서의 k번째 노드가 달성 가능한 채널 용량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_k[n] = \delta \log_2 \left(1 + \frac{p[n]h_k[n]}{\sigma^2 + p_0g_k[n]} \right). \quad (4)$$

여기서 $p[n]$ 은 UAV의 송신 전력, σ^2 는 잡음 전력, p_0 는 위성의 송신 전력, $g_k[n]$ 은 위성과 지상 노드 k의 채널 전력 이득을 나타낸다.

이를 이용하여 확률적 LoS를 고려한 UAV와 지상 노드 k가 달성 가능한 채널 용량의 기대값은 $E[r_k[n]]$ 이며, 평균 채널 용량 \bar{R}_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{R}_k = \frac{1}{T} \sum_{n \in N} s_k[n] E[r_k[n]]. \quad (5)$$

다음으로 타임슬롯 n에 대한 위성 and 지상국 간의 채널 용량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_0[n] = \delta \log_2 \left(1 + \frac{G_R p_0 g_0[n]}{\sigma^2 + p[n]h_0[n]} \right). \quad (6)$$

여기서 G_R 은 지상국의 안테나 이득, $g_0[n]$ 은 위성 and 지상국의 채널 전력 이득, $h_0[n]$ 은 UAV and 지상국과의 채널 전력 이득을 나타낸다. 이를 이용하여 확률적 LoS를 고려한 위성 and 지상국 간의 달성 가능한 채널 용량의 기대값은 $E[r_0[n]]$ 로 표현할 수 있다.

위에 정의한 수식을 이용해 위성 네트워크의 성능을 임계값 r_{\min} 이상 보장하면서 UAV가 서비스하는 지상 노드의 스펙트럼 효율성을 최대화하기 위한 UAV의 최적의 스케줄링 지표 $S \triangleq \{s_k[n], \forall k, n\}$, 송신 전력 $P \triangleq \{p[n], \forall n\}$, 수평 궤적 $Q \triangleq \{q[n], \forall n\}$, 수직 궤적 $Z \triangleq \{z[n], \forall n\}$ 을 찾기 위한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P1: & \max_{S, P, Q, Z} \min_{k \in K} \bar{R}_k \\ \text{s.t.} & \frac{1}{T} \sum_{n \in N} E[r_0[n]] \geq r_{\min}, \\ & (C1) - (C8) \end{aligned}$$

위의 문제는 최적화 변수 P, Q, Z 에 대해서 비볼록한 문제이므로 일반적으로 풀기 어렵다. 이를 해결하기 위해 1차 테일러 근사와 보조 변수를 이용하여 목적함수와 모든 제약 조건을 볼록하게 변형해준다. 또한, 이진 값만 갖는 $s_k[n]$ 을 연속함수로 변형하여 계산 복잡도를 낮추면서도 문제를 풀기 쉽게 완화해준다 [4]. 이후 BCD 알고리즘(Block Coordinate Descent Algorithm)을 사용하여 최적의 자원 할당을 찾는다.

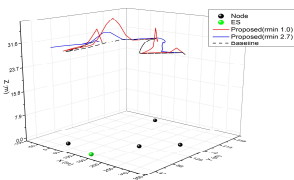


그림 2. 3D UAV 경로

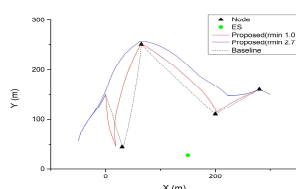


그림 3. 2D UAV 경로

그림 2와 그림 3은 위성의 성능 임계값을 의미하는 r_{\min} 이 각각 1.0 bps/Hz와 2.7 bps/Hz일 때 제안 방안의 UAV 이동 경로와, r_{\min} 이 1.0bps/Hz일 때 확률적 LoS 채널 모델을 고려하지 않은 기존 방안의 UAV 이동 경로를 보여준다. 그림 2에서 제안방안은 r_{\min} 이 커질수록 지상국에 미치는 간섭을 줄이기 위해 지상 노드를 직접적으로 방문하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 2에서 기존 방안은 최저 고도인 30m 주변에서 비행하는 반면, 제안 방안은 이동 중에는 지상 노드와의 LoS 확률을 높여주기 위해 높이 비행하고, 지상 노드 바로 위에 머무를 때는 노드를 효율적으로 서비스하기 위해 최저고도로 낮게 비행하는 것을 확인할 수 있다.

Scheme	Spectral efficiency [bps/Hz]
Proposed (r_{\min} 1.0)	6.4536
Proposed (r_{\min} 2.7)	4.176
Baseline (r_{\min} 1.0)	4.2664

표 1. 제안방안과 기존방안의 스펙트럼 효율 비교

표 1에서 확인할 수 있듯이, 제안 방안이 기존 방안에 비해 더 좋은 성능을 보이며, 위성의 성능을 r_{\min} 이상으로 보장하기 위해 r_{\min} 이 높을 때에는 제안 방안의 스펙트럼 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 확률적 LoS 채널 모델을 고려하여 UAV가 위성의 성능을 임계값 이상으로 보장하며, 자신이 서비스하는 지상 노드의 스펙트럼 효율성을 최대화하는 방안을 제안하였다. 이를 위해 고려하는 시스템을 수학적으로 모델링하고, 다양한 최적화 기법을 이용하여 문제의 비볼록성을 해결하였다. 또한, 완화된 최적화 문제를 풀어 UAV의 최적의 스케줄링 지표, 송신 전력, 3D 경로를 도출하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 방안은 기존 방안보다 높은 성능을 달성함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] Z. Li et al., "Energy efficient resource allocation for UAV-assisted spaceair-ground Internet of remote things networks," IEEE Access, vol. 7, pp. 145348 - 145362, 2019.
- [2] J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah, and N. Kato, "Space-air-ground integrated network: A survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 20, no. 4, pp. 2714 - 2741, Dec. 2018.
- [3] N. Hosseini and D. W. Matolak, "Software defined radios as cognitive relays for satellite ground stations incurring terrestrial interference," in Proc. IEEE CCAA, Jun. 2017, pp. 1 - 4.
- [4] Q. Wu et al., "Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks," IEEE Transactions on Wireless Commun. vol. 38, pp.2109-2121, 2018.