

HAPS 기반 다중 유저 다운링크 통신 시스템 모델링 및 최적화 문제 설계

장기원, *최지환
한국과학기술원 항공우주공학과

wkdrldnjs9@kaist.ac.kr, *jhch@kaist.ac.kr

Modeling and Optimization Problem Design for HAPS-based Multi-User Downlink Communication System

Gee Won Jang, *Jihwan Choi
Dept. of Aerospace Eng., KAIST

요약

본 논문에서는 HAPS(High Altitude Platform Station)가 다중 유저의 다운링크 통신을 지원하는 시스템 모델과 HAPS의 최적 높이 계산을 위한 최적화 문제를 제안한다. HAPS의 높이에 따라 HAPS와 유저 간의 통신 양각이 바뀌며, 이에 따라 자유 공간 경로 손실, 날씨 감쇠, 음영 페이딩, 신틸레이션 감쇠가 변하고 CNR(Carrier-to-Noise Ratio) 계산 시 트레이드오프가 발생할 수 있다. 이러한 점을 기반으로 모든 유저의 통신 용량 합을 최대화하는 것을 목표로 최적화 문제를 설계하였다. 또한 확률 변수를 단순화하거나 새도우드 라이시안 페이딩 채널을 도입하여 최적화 문제를 개선하였다. 마지막으로, 구성된 최적화 문제를 통해 더 정확한 분석이 가능하도록 하는 방안을 논의한다.

I. 서론

HAPS(High Altitude Platform Station)는 약 20km 고도의 성층권에서 활동하는 NTN(Non-Terrestrial Network) 노드의 일종으로 [1], 저궤도 위성과 유사하게 높은 고도에 위치한 채 LoS(Line-of-Sight) 통신을 지원할 수 있다. HAPS는 대표적으로 위성 대비 낮은 비용, 준정적인 위치 유지 등의 장점을 바탕으로 기업, 학계, 나아가 3GPP(3rd Generation Partnership Project)를 필두로 한 여러 표준 단체에서 재난 대응 또는 음영 지역에 대한 통신 지원 등의 목적으로 그 연구가 진행되고 있다.

HAPS를 포함한 NTN 노드는 지상망 대비 상대적으로 저조한 SWaP(Size, Weight, and Power) 조건 아래에서 작동하기 때문에, 네트워크 지원을 위해 이를 운영하려면 보다 정밀한 링크 마진 계산, 나아가서는 이를 기반으로 한 시스템 최적화가 필요하다. 이를 위해 3GPP는 [2]에서 공중 노드로부터 지상으로의 통신 링크의 CNR(Carrier-to-Noise Ratio) 계산식을 소개한다. 계산식에 있는 대기 또는 신틸레이션 감쇠의 경우 관련된 날씨 모델을 활용해 예상 감쇠 값을 계산할 수 있다. 또한 위성 또는 HAPS 다운링크 통신의 음영 페이딩에 대해서는 여러 참고할 만한 연구를 찾아볼 수 있다.

본 논문에서는 HAPS를 활용한 다운링크 통신 시 HAPS의 높이에 따른 통신 시스템의 성능을 평가하는 시나리오와 그 방법을 소개한다. 다운링크 통신을 지원하는 HAPS와 통신이 필요한 유저의 위, 경도가 고정되어 있을 때 HAPS의 높이에 따라 유저와 HAPS 사이 통신 링크의 양각이 변하게 된다. 이에 따라 통신 링크의 CNR 계산 시 고려되는 자유 공간 경로 손실, 날씨 감쇠, 음영 페이딩, 신틸레이션 손실의 변화에 따라 발생하는 트레이드오프 관계를 파악할 수 있다. 이를 반영하는 최적화 문제를 세워 HAPS의 다운링크 통신 지원을 위한 최적 높이 계산의 토대를 마련한다.

II. 지정학적 모델

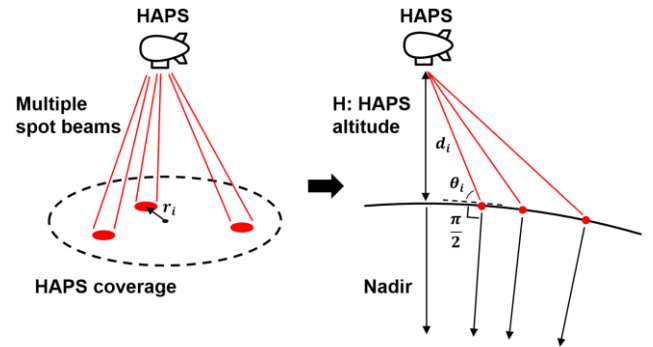


그림 1. HAPS 다운링크 통신 지원을 묘사하는 지정학적 모델

최적화 문제를 설계하기에 앞서, 먼저 그림 1과 같은 지정학적 모델을 소개하도록 한다. 그림 1의 왼쪽은 높은 고도에서 스폿 빔(spot beam)을 활용하여 미리 설정한 통신 범위를 담당하는 HAPS를 묘사한 것이다. 해당 시나리오는 그림 1의 오른쪽과 같이 통신 링크를 모두 2차원으로 정리할 수 있으며, 이를 통해 최적화 문제 풀이 시 필요한 계산식을 도출할 수 있다. 지구의 반지름을 R_E , HAPS의 고도를 H , 위, 경도를 활용하여 계산한 HAPS와 i 번째 유저 간의 지표면 상에서의 거리를 r_i 라고 하였을 때, i 번째 유저로부터 HAPS까지의 통신 거리 d_i 및 통신 양각 θ_i 은 아래와 같이 계산할 수 있으며, 이후 두 가지는 CNR 계산식의 각종 경로 손실을 계산할 때 활용된다.

$$d_i = \sqrt{R_E^2 + (R_E + H)^2 - 2R_E(R_E + H)\cos\frac{r_i}{R_E}} \quad (1)$$

$$\theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{R_E(R_E + H)\cos\frac{r_i}{R_E} - R_E^2 - H^2}{d_i R_E}\right) \quad (2)$$

III. 최적화 문제 설계

통신 시스템의 성능 평가를 위해서는 통신의 오수신 확률, 통신 지연 시간 등 다양한 평가 기준을 제안할 수 있다. 본 논문에서는 HAPS로부터 다운링크 통신을 지원 받는 모든 유저의 통신 용량의 합을 평가 기준으로 설계한다. 이를 최대화하는 최적화 문제는 아래와 같이 작성할 수 있다.

$$\max_H \sum_i BW_i \log_2(1 + CNR_i) \quad (3a)$$

$$\text{s.t. } CNR_i \text{ [dB]} = EIRP_i + \left(\frac{G}{T}\right)_i - k - PL_{FS,i} - PL_{A,i} - PL_{SM,i} - PL_{SL,i} - BW_i \quad (3b)$$

$$20 \times 10^3 \leq H \text{ [m]} \leq 26 \times 10^3 \quad (3c)$$

$$\sum_i p_i = p_{total} \quad (3d)$$

$$BW_i = BW_{max} \quad (3e)$$

$$Pr\{PL_{rain} \geq x \text{ [dB]}\} = OP \text{ [%]} \quad (3f)$$

$$Pr\{PL_{SL} \geq y \text{ [dB]}\} = OP \text{ [%]} \quad (3g)$$

식 (3b)는 표준 문서[2]에서 확인할 수 있는 링크 마진 계산 식이며, $EIRP$ 는 실효 등방성 복사 전력, G/T 는 이득 대 잡음 온도비, k 는 볼츠만 상수, PL_{FS} 은 자유 공간 경로 손실, PL_A 은 대기에 의한 경로 손실, PL_{rain} 은 강우 감쇠로 PL_A 에 포함되어 있는 값이며, PL_{SM} 은 음영 페이딩 마진, PL_{SL} 은 신틸레이션 손실, B 는 채널의 대역폭이다. 또한 p_i 는 i 번째 유저에게 할당되는 송신 전력, p_{total} 은 HAPS가 운용할 수 있는 총 송신 전력을 의미한다. 해당 시나리오에서는 스폿 빔을 활용함으로써 공간 분할 다중 접속이 완벽하게 이루어진다고 가정, 유저 간 간섭을 무시하고 각 유저에게 주파수 재사용 없이 할당할 수 있는 최대의 통신 대역폭을 할당한다고 가정한다.

IV. 최적화 문제 재구성

강우 감쇠, 음영 페이딩, 신틸레이션 손실의 경우 확률 밀도함수로 설명할 수 있는 확률 변수이다. 원활한 최적화 문제 풀이를 위해, 아래와 같은 문제 재구성 절차를 진행하도록 한다.

- 1) 식 (3f) 및 (3g)의 오수신 확률 OP 를 특정 값으로 고정하여, 해당 식의 변수의 개수를 줄이고 양각 θ 에 대한 식으로 단순화한다. ITU에서 제공하는 날씨 모델 [3]의 경우 우선적으로 $OP = 0.01\%$ 에 대한 예상 강우 감쇠 값을 먼저 계산한 뒤, 해당 값을 통해 나머지 OP 에 대해 감쇠 값을 계산한다. 따라서 본 문제에서는 계산의 편의를 위해 $OP = 0.01\%$ 로 설정한다.
- 2) 음영 페이딩의 경우 채널을 새도우드 라이시안 페이딩 채널로 모델링하여 분석하도록 하며, 이 경우 식 (3b)를 아래와 같은 확률 변수 식으로 표현할 수 있다 [4].

$$CNR_i \sim SSR(\overline{SNR}_i \cdot b, m, \overline{SNR}_i \cdot \Omega) \quad (4)$$

SSR 은 새도우드 라이시안 페이딩의 제곱을 나타내며, \overline{SNR}_i 는 $CNR_i + PL_{SM,i}$, 즉 식 (3b)에서 음영 페이딩 마진을 제외하고 계산한 값이다. 새도우드 라이시안 페이딩은 b, m, Ω 세 가지 모수로 표현되는 확률 변수이며, 이 모수는 통신 링크의 양각 θ 에 대한 3차 함수로 표현할 수 있다 [5].

- 3) 목적 함수 식의 랜덤성을 제거하기 위해, CNR_i 를 $E[CNR_i]$ 로 대체한다. 새도우드 라이시안 페이딩의 경우 모수 m 이 정수인 경우 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$E[CNR_i] = (2b + \Omega) \cdot \overline{SNR}_i \quad (5)$$

모수 m 이 정수로 표현되지 않는 경우가 많지만, m 을 가까운 정수로 반올림하여도 확률 변수의 통계적 특성이 거의 변하지 않는다는 점을 적극적으로 활용할 수 있다 [4].

앞서 언급한 1), 2), 3)의 과정을 거치면, 최적화 문제 (3)을 다음과 같이 재설계할 수 있다.

$$\max_H \sum_i BW_{max} \log_2(1 + (2b + \Omega) \cdot \overline{SNR}_i) \quad (6a)$$

$$\text{s.t. } \overline{SNR}_i \text{ [dB]} = EIRP_i + \left(\frac{G}{T}\right)_i - k - BW_{max} - PL_{FS,i} - PL_{A,i} - PL_{SL,i} \quad (6b)$$

$$20 \times 10^3 \leq H \text{ [m]} \leq 26 \times 10^3 \quad (6c)$$

$$\sum_i p_i = p_{total} \quad (6d)$$

$$Pr\{PL_{rain} \geq x \text{ [dB]}\} = 0.01\% \quad (6e)$$

$$Pr\{PL_{SL} \geq y \text{ [dB]}\} = 0.01\% \quad (6f)$$

V. 결론

본 논문에서는 HAPS가 다중 유저의 다운링크 통신을 지원하는 시스템 모델을 소개하고, 해당 HAPS의 최적 높이 계산을 위한 최적화 문제를 제안하였다. 또한 강우 감쇠와 신틸레이션 감쇠의 오수신 확률을 고정하고, 음영 페이딩은 새도우드 라이시안 페이딩 채널을 적용하는 방법을 활용해 최적화 문제를 재구성하는 과정을 보였다. 해당 최적화 문제를 풀어 HAPS의 최적 높이를 도출한 이후에는, 베셀 함수를 기반으로 한 안테나 패턴을 반영하여 스폿 빔 간 간섭 효과를 고려하거나 HAPS의 높이에 따른 송신 안테나 이득의 변화를 고려하는 등 시스템의 통신 성능을 더욱 정확하게 평가할 수 있도록 추가적인 요소를 반영해야 할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2069728)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고 문헌

- [1] Kurt, Gunes Karabulut, et al. "A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future." IEEE Communications Surveys & Tutorials 23.2 (2021): 729-779.
- [2] 3rd Generation Partnership Project, "3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; solutions for nr to support non-terrestrial networks (ntn) (release 16)," 3GPP, Tech. Rep. TR 38.821 V16.1.0 (2021-05), 2021.
- [3] I. T. U. R. Sector, Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems, ITU-R P.618-11 (09/2013) ed., ITU-R, 2013.
- [4] Kim, Eunsun, Ian P. Roberts, and Jeffrey G. Andrews. "Downlink Analysis and Evaluation of Multi-Beam LEO Satellite Communication in Shadowed Rician Channels." IEEE Transactions on Vehicular Technology (2023).
- [5] Abdi, Ali, et al. "A new simple model for land mobile satellite channels: First- and second-order statistics." IEEE Transactions on Wireless Communications 2.3 (2003): 519-528.