

무인기 통신 네트워크에서 정보의 나이 분석

이용¹, 김민건², 이제민¹

¹ 전자전기컴퓨터공학과, 성균관대학교; ² 전기전자컴퓨터공학과, 대구경북과학기술원

lee@skku.edu, alsrjs1807@dgist.ac.kr, jemin.lee@skku.edu

Age of Information Analysis in UAV Communication Networks

Yong Lee¹, Mingun Kim², Jemin Lee¹

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan Univ.;

²Department of Electrical and Computer Science, DGIST.

요 약

본 논문은 무인기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 고려한 네트워크 환경에서 정보의 나이 (Age of Information, AoI)에 대해 분석하였다. 확률 기하 (stochastic geometry) 이론을 이용해서 사용자 (User Equipment, UE)가 UAV 로 받은 콘텐츠의 AoI 가 나이 제한을 초과하는 확률인 위반 확률 (violation probability) 수식을 도출하였다. UAV 의 높이와 밀도가 위반 확률에 주는 영향을 분석하였다.

I. 서 론

최근 무선통신 기술이 발전함에 따라 높은 데이터 전송용량 및 낮은 설치비용이 요구된다. 이를 만족시키기 위해, 무인기 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)를 고려한 네트워크 환경에서 전송용량을 높이는 방법에 대한 연구가 증가하고 있다. 또한, 화재경보 센서나 자율주행 차량은 높은 전송용량뿐만 아니라 전송정보의 신선도도 중요하고, 이를 수치화하기 위해 정보의 나이 (Age of Information, AoI)라는 개념이 최근 활용되고 있다 [1]. 그러나 UAV 를 고려한 네트워크 환경에서 전송용량을 높이려고 하는 연구는 많지만, AoI 를 고려하는 연구는 많지 않다. 따라서 본 논문은 UAV 를 고려한 네트워크 환경에서 AoI 에 대해 분석하고, 사용자 (User Equipment, UE)가 UAV 로부터 받은 콘텐츠의 AoI 가 나이 제한을 초과하는 확률인 위반 확률 (violation probability)을 도출하고, UAV 높이와 밀도가 위반 확률에 주는 영향을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 UAV 와 UE 가 PPP (Poisson Point Process)로 분포된 네트워크 환경을 고려한다. UAV 와 UE 사이의 통신 환경은 LoS (Line-of-Sight)와 NLoS(Non-Line-of-Sight)를 모두 고려하고, LoS 확률은 아래처럼 표현된다.

$$\rho^{(L)}(r) = \frac{1}{1 + a \exp\left(-b\left(\frac{180}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{H_u}{r}\right) - a\right)\right)}$$

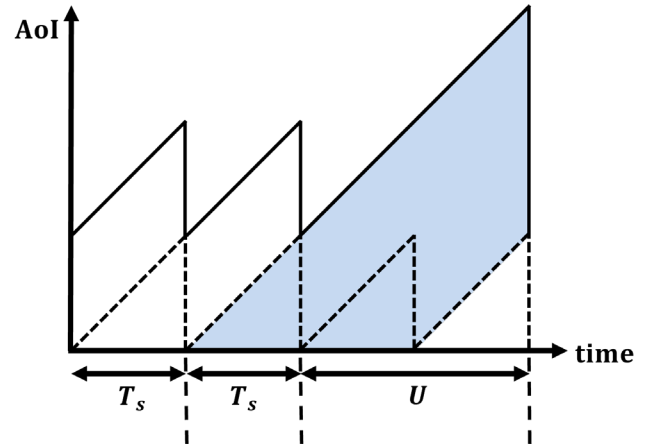


그림 1. UE 가 UAV 로부터 받은 콘텐츠의 AoI

이 때 a 와 b 는 UAV 와 UE 이 있는 환경에서 건물의 모양과 분포에 따라 결정되는 상수이다. H_u 는 UAV 의 높이이고, r 는 UAV 와 UE 간의 수평 거리이다. NLoS 확률은 $p^{(N)}(r) = 1 - p^{(L)}(r)$ 이다.

UAV 와 UE 사이의 링크가 LoS 일 때 채널은 경로 손실 지수 α_L 인 Nakagami- m fading 으로 모델링 되어 있고, 채널 이득은 $h_L \sim \Gamma(m, 1/m)$ 이다. UAV 와 UE 사이의 링크가 NLoS 일 때 채널은 경로 손실 지수 α_N 인 Rayleigh fading 으로 모델링 되어 있고, 채널 이득은 $h_N \sim \text{Exp}(1)$ 이다.

UAV 와 UE 사이의 링크가 LoS 이나 NLoS 일 때 UE 의 SIR (Signal-to-Interference Ratio)은 아래와 같다.

$$\text{SIR}_\varepsilon = \frac{h_\varepsilon(r^2 + H_u^2)^{-\frac{\alpha_\varepsilon}{2}}}{I_L + I_N}, \quad \varepsilon \in \{L, N\}$$

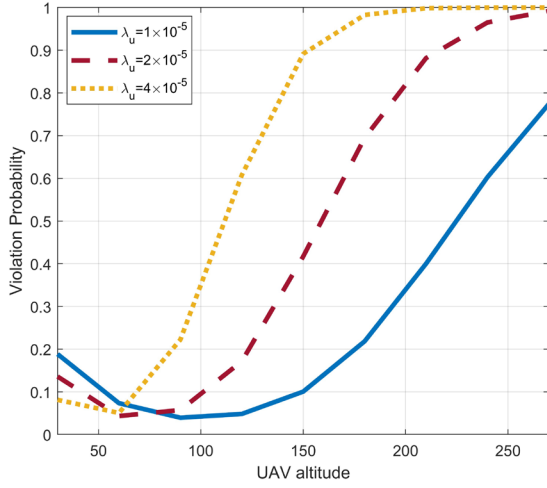


그림 2. UAV 높이에 따른 위반 확률의 변화

이 때 I_L 와 I_N 은 UE와 연결된 UAV를 제외한 UAV에서 LoS 링크나 NLoS 링크로 받는 간섭이다.

III. AoI 분석

그림 1은 UE가 UAV로부터 받은 콘텐츠의 AoI이다. T_S 는 UAV와 UE 사이의 전송 주기이다. U 는 UE에서 콘텐츠가 성공적으로 업데이트하는 시간 간격이다.

U 와 T_S 를 사용해서 UE에서의 위반 확률 수식은 아래처럼 표현된다 [2].

$$\mathcal{P}_u(v_{th}) = (1 - p_u)^{x_{th}-1}$$

위 식에서 $x_{th} = \left\lceil \frac{v_{th}}{T_S} \right\rceil$ 이고, v_{th} 는 위반 확률 한계 (violation probability threshold)이다. p_u 는 T_S 시간 내 통신 성공 확률이고, 아래와 같다.

$$p_u = A_L \mathbb{P}[SIR_L > \zeta] + A_N \mathbb{P}[SIR_N > \zeta]$$

여기서 ζ 는 target SIR이고, A_L 와 A_N 은 UE가 UAV와 LoS 링크나 NLoS 링크로 연결하는 확률이다.

본 논문에서는 UAV의 높이와 밀도가 위반 확률에 주는 영향을 분석한다. 결과에 사용된 파라미터 값들은 $\lambda_u = 1 \times 10^{-5} \text{node/m}^2$, $\alpha_L = 2.5$, $\alpha_{NL} = 4$, $a = 12.0810$, $b = 0.1139$, $\zeta = 0 \text{dB}$, $T_S = 1 \text{s}$, $v_{th} = 4 \text{s}$ 이다.

그림 2는 UAV 높이에 따른 위반 확률의 변화이다. 그림 2를 통해, 각각 다른 UAV 밀도에 따라 위반 확률 최소화하는 최적의 높이가 존재하고, 밀도가 증가함에 따라 최적의 높이가 낮아지는 것을 알 수 있다.

그림 3은 UAV 밀도에 따른 위반 확률의 변화이다. 그림 3을 통해, 각각 다른 UAV 높이에 따라 위반 확률 최소화하는 최적의 밀도가 존재하고, 높이가 증가함에 따라 최적의 밀도가 낮아지는 것을 알 수 있다.

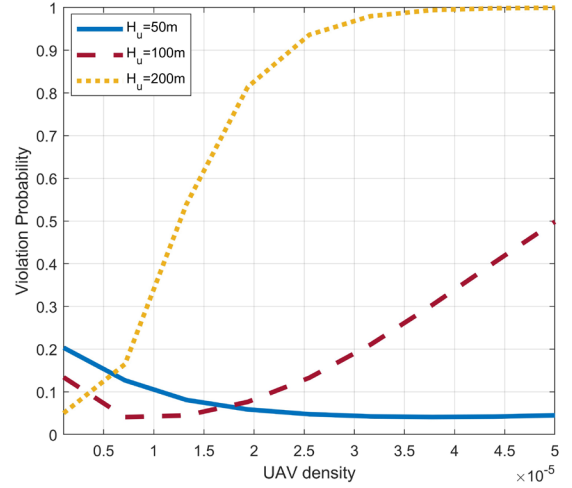


그림 3. UAV 밀도에 따른 위반 확률의 변화

IV. 결론

본 논문에서는 UAV를 고려한 네트워크 환경에서 AoI에 대해 분석하였다. 확률 기하 (stochastic geometry) 이론을 이용해서 UE가 UAV로 받은 콘텐츠의 위반 확률 수식을 도출하였다. 또한, 상기 네트워크에서 각각 다른 UAV 밀도에 따라 위반 확률 최소화하는 최적의 높이가 있고, 각각 다른 UAV 높이에 따라 위반 확률 최소화하는 최적의 밀도가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2020R1A2C2008878).

참고 문헌

- [1] S. Kaul, R. Yates, and M. Gruteser, "Real-time status: How often should one update?" in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, Orlando, FL, USA, Mar. 2012, pp. 1-5.
- [2] J. Kim, M. Kim and J. Lee, "Ensuring Data Freshness in Wireless Monitoring Networks: Age-of-Information Sensitive Coverage and Energy Efficiency Perspectives," *arXiv preprint, arXiv:2103.07149*, 2021.