

IAB 네트워크의 무선 백홀 링크와 접속 링크의 트래픽 로드 분석

권재홍, 고영채
고려대학교

hugokwon@korea.ac.kr, koyc@korea.ac.kr

Traffic Load Analysis of wireless backhaul link and access link for IAB network

Jae-Hong Kwon, Young-Chai Ko
Korea University

요약

본 논문에서는 5G 통신의 integrated access and backhaul 네트워크에서 사용자 접속 링크와 무선 백홀 링크의 트래픽 로드 분석을 다룬다. 다중홉 백홀을 모든 IAB 노드에 지원하기 위하여 시간이나 주파수 자원을 사용자 접속 링크와 무선 백홀 링크에 효율적으로 분배하는 것이 중요하다. 최적의 자원 분배를 위해서는 먼저 무선 백홀과 사용자 접속 링크가 최대 요구하는 트래픽 양을 예측하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 확률적 기하학 분석을 통해 IAB 네트워크 전체에서 무선 백홀의 트래픽 로드 최대량과 임의의 IAB 노드의 사용자 접속 링크의 트래픽 로드를 예측하는 수식을 유도한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 유도한 수식의 정확도를 검증한다.

I. 서론

5세대 이동통신 주파수로 사용되고 있는 밀리미터웨이브 대역은 짧은 파장으로 인해 높은 전파 감쇠를 가지며 이로 인한 좁은 커버리지 문제를 가지고 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 다중홉 무선 백홀을 지원하는 IAB(integrated access and backhaul) 기술이 주목받고 있다 [1]. IAB네트워크에서는 각 IAB노드들이 사용자들에게 데이터 통신을 지원할 뿐 아니라 다른 노드들의 무선 백홀을 동시에 지원해야 한다 [2].

무선 자원을 활용해 백홀과 사용자 접속 링크를 모두 지원하기 위해서는 각 IAB노드들의 트래픽 로드와 전체 백홀 트래픽 로드 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 확률적 기하학 분석을 통해 각 IAB노드의 사용자 접속 링크와 무선 백홀 링크의 최대 트래픽 로드를 분석한다.

II. 사용자 접속링크와 무선 백홀 트래픽 로드 분석

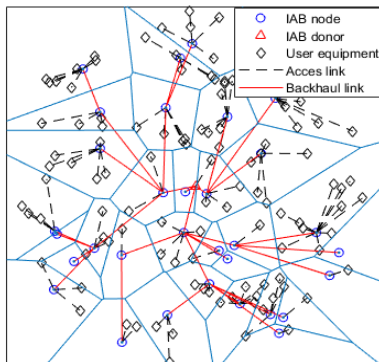


그림 1. 포아송 점 과정과 voronoi tessellation으로 표현한 IAB 네트워크

II-1. IAB네트워크 모델

N_{IAB} 개의 IAB노드와 N_{UE} 명의 사용자들은 각각 λ_{IAB} 와 λ_{UE} 의 밀도를 갖는 포아송 점 과정을 따라 분포하고 코어 네트워크와 유선으로 연결된 IAB donor가 셀의 중앙에 위치한다고 가정한다. 각 사용자들은 가장 가까운 IAB노드로 접속하며 모두 동일한 r_u 라는 트래픽 로드를 가진다. 즉 각 IAB노드들에 걸리는 트래픽 로드는 접속하는 사용자의 숫자에 의해 결정된다. 임의의 IAB노드에 접속하는 사용자 숫자를 N_u 라고 하고 최대 숫자를 N_u^* 라고 한다.

II-2. 무선 백홀 링크의 트래픽 로드 분석

먼저 각 IAB노드에 걸릴 수 있는 최대 트래픽 로드를 분석한다. 다중홉 백홀을 지원하는 IAB네트워크에서 가장 최대 트래픽이 걸리는 계층은 IAB donor에 직접적으로 연결되어 있는 두 번째 계층의 IAB노드들이다. 이 때 무선 백홀에 부과되는 최대 트래픽 로드는 전체 트래픽 로드에서 IAB donor에 직접 접속하는 사용자 트래픽을 뺀 값이 된다. 따라서 무선 백홀 링크의 최대 트래픽은 다음과 같이 표현된다

$$R_B^* \approx r_u \left(N_{UE} - \sum_{n=1}^{\infty} n p_n \right). \quad (1)$$

이 때 p_n 은 셀 안에 n 명의 사용자가 있을 확률을 의미하며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$p_n = \mathbb{E} \left[\frac{(\lambda_{UE} S_c)^n}{\Gamma(n+1)} e^{-\lambda_{UE} S_c} \right]. \quad (2)$$

여기에서 S_c 는 IAB노드 하나의 커버리지 영역을 의미한다. 식 (2)를 구하기 위해서는 S_c 의 분포를 알아야 하는데, [3]에 따르면 S_c 의 확률밀도함수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{S_c}(x) \approx \frac{(b\lambda_{IAB})^a}{\Gamma(a)} x^{a-1} e^{-b\lambda_{IAB}x}, \quad (3)$$

여기에서 a 와 b 는 커브피팅 파라미터로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 $a \approx b \approx 3.5$ 값이 매우 정확한 결과를 갖는다는 것이 알려져 있다 [4]. 식 (3)을 (2)에 대입하여 p_n 을 구하면 다음과 같다.

$$p_n = \frac{\Gamma(a+n)\lambda_{UE}^n (b\lambda_{IAB})^a}{\Gamma(n+1)\Gamma(a)(\lambda_{UE} + b\lambda_{IAB})^{a+n}}. \quad (4)$$

식 (4)를 (1)에 대입하면 무선 백홀 링크의 최대 트래픽 로드를 알 수 있다.

II-3. 사용자 접속 링크의 트래픽 로드 분석

사용자 접속 링크의 최대 트래픽 로드를 알기 위해서는 임의의 IAB노드에 접속하는 최대 사용자 숫자를 알아야 한다. 최대 커버리지 영역을 가지는 IAB노드에 접속하는 사용자가 가장 많다고 가정하면 최대 커버리지 영역의 확률밀도함수를 유도해야 한다. 최대 영역을 S_c^* 라고 하면 S_c^* 의 확률밀도함수는 다음과 같다

$$f_{S_c^*}(x) = N_{IAB} f_{S_c}(x) \{F_{S_c}(x)\}^{N_{IAB}-1} \quad (5)$$

이 때 S_c^* 의 누적분포함수는 다음과 같다.

$$F_{S_c^*}(x) = \frac{\gamma_{ic}(a, b\lambda_{IAB}x)}{\Gamma(a)}, \quad (6)$$

식 (2)와 같은 방법으로 최대 사용자 숫자 p_n^* 을 유도하면 다음과 같다.

$$p_n^* = \mathbb{E} \left[\frac{(\lambda_{UE} S_c^*)^n}{\Gamma(n+1)} e^{-\lambda_{UE} S_c^*} \right]. \quad (7)$$

식 (7)의 값을 구하기 위해서 불완전감마함수의 근사형태인 $\gamma_{ic}(s, x) \approx 1 - e^{-x}(1+x)^{s-1}$ 을 적용하면 [5],

$$p_n^* \approx \frac{\lambda_{UE}^n \tilde{b}^a}{\Gamma(n+1)\Gamma(a)^{N_{IAB}}} \int_0^{S_{th}} x^{n+a-1} e^{(-\lambda_{UE} + \tilde{b})x} \times \left(1 - e^{-\tilde{b}x} (1 + \tilde{b}x)^{a-1} \right)^{N_{IAB}-1} dx \quad (8)$$

이 때 $\tilde{b} = b\lambda_{IAB}$ 이다. 적분 기호가 없는 closed-form 구하기 위하여 식 (8)에 binomial expansion을 적용하면 다음과 같다

$$p_n^* \approx \frac{\lambda_{UE}^n \tilde{b}^a}{\Gamma(n+1)\Gamma(a)^{N_{IAB}}} \sum_{k=0}^{N_{IAB}-1} \int_0^{S_{th}} x^{n+a-1} (1 + \tilde{b}x)^{(a-1)k} \times \left(e^{(-\lambda_{UE} + \tilde{b} - k\tilde{b})x} \right) dx \quad (9)$$

여기에서 변수 a 의 값이 정수가 아닌 실수이므로 binomial expansion을 적용할 수는 없으며 뉴턴의 일반화된 binomial expansion을 적용할 수 있다. 식 (9)는 다음과 같이 전개된다.

$$p_n^* \approx \frac{N_{IAB} \lambda_{UE}^n (b\lambda_{IAB})^a}{\Gamma(n+1)\Gamma(a)^{N_{IAB}}} \sum_{k=0}^{N_{IAB}-1} \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^k \times \binom{N_{IAB}-1}{k} \binom{(a-1)k}{i} \frac{(b\lambda_{IAB})^i \gamma_{ic}(i+n+a, (\lambda_{UE} + b\lambda_{IAB} + kb\lambda_{IAB})S_{th})}{(\lambda_{UE} + b\lambda_{IAB} + kb\lambda_{IAB})^{i+n+a}}. \quad (10)$$

이 때 사용자 접속 링크의 최대 트래픽 로드 R_U^* 는 다음과 같다

$$R_U^* \approx \sum_{n=1}^{\infty} n p_n^* \quad (11)$$

II-4. 시뮬레이션 결과를 통한 검증

그림 2는 본 논문에서 유도한 식 (4)와 식 (7)의 정확도를 검증한 것으로 상당히 높은 정확도를 갖는다는 것을 알 수 있다. $a \approx b \approx 3.5$ 의 근사값이 상당히 높은 정확

도를 갖지만 여전히 그림 2에서 확인할 수 있듯이 약간의 오차를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

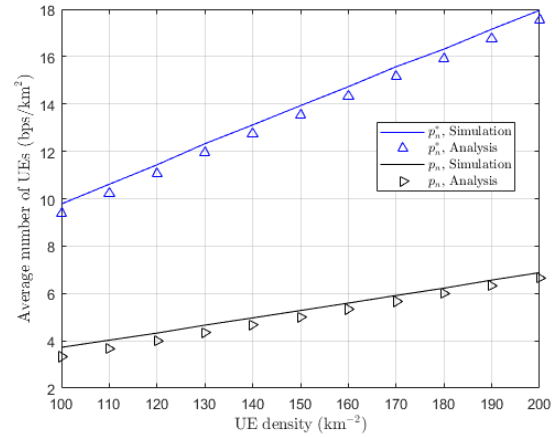


그림 2. 서로 다른 사용자 밀도에 따른 식 (4)와 식 (7)의 검증

III. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 IAB네트워크를 활용할 때 무선 백홀과 사용자 접속 링크가 같은 무선 자원을 공유한다는 점을 고려하여 무선 백홀 링크의 최대 트래픽 로드와 사용자 접속 링크의 최대 트래픽 로드를 분석하였다. 확률적 기하학 분석에 기반하여 수식으로 유도된 각각의 트래픽 로드의 식은 IAB네트워크에서 무선 통신 자원의 할당 및 분배에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT)(NRF-2020R1A4A1019628)

참고 문헌

- [1] M. Polese, et al, "Integrated Access and Backhaul in 5G mmWave Networks: Potential and Challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 58, no. 3, pp.62-68, 2020.
- [2] 3GPP, "NR: Study on Integrated Access and Backhaul," Tech. Rep., Dec. 2018.
- [3] J.-S. Ferenc and Z. Neda, "On the Size Distribution of Poisson Voronoi Cells," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 385, no. 2, pp. 518-527, 2007.
- [4] S. Lee and K. Huang, "Coverage and economy of cellular networks with many base stations," IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 7, pp. 1038-1040, 2012.
- [5] P. Amore, "Asymptotic and exact series representations for the incomplete gamma function," Europhysics Letters, vol. 71, no. 1, pp.1-7, July 2005.