

다중채널 상향링크용 기회적 비직교 랜덤 액세스

염정선, 정방철
충남대학교

jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Opportunistic Non-Orthogonal Random Access for Multi-Channel Uplink Networks

Jeong Seon Yeom and Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문은 상향링크 시스템에서 다중 채널을 이용한 기회적 비직교 랜덤 액세스(non-orthogonal random access: NORA)의 아웃티지 확률을 수학적으로 분석한다. 구체적으로 페딩 채널에서 K 개의 단말들은 M 개의 직교 채널을 사용하여 access point(AP)에게 신호를 전송할 수 있다. 기회적 전송을 통한 성능 향상을 위해서 k 번째 단말은 채널 이득이 임계치 τ_k 이상인 채널 중 하나의 채널을 무작위로 선택하여 신호를 전송한다. AP는 각 직교 채널에 대해서 독립적으로 연속 간섭제거 기법이 아닌 결합 복호화 기법을 사용하여 다중 신호를 복호화한다. 본 논문은 결합 복호화 기법의 복잡한 복호화 성공 조건을 단순화하여 아웃티지 확률의 상한(upper bound)을 수학적으로 분석하고 이에 대한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션과 비교한다.

1. 서론

급격하게 증가하는 사물인터넷 단말의 수는 2030년에 약 1,250억 개가 전 세계적으로 존재할 것으로 전망된다. 이에 따라, 주파수 효율성을 향상시킬 수 있는 비직교 랜덤 액세스(non-orthogonal random access: NORA) 기술이 연구되고 있다. NORA는 다수의 단말이 access point(AP)에 랜덤 액세스하는 상향링크 시스템에서 시간, 주파수 또는 코드 도메인에서 비직교 방식으로 전송을 하는 경우, 충돌 신호들에 대해서도 해당 신호들을 복호화할 수 있는 기술이다. 일반적으로 IoT 네트워크는 다중 협대역 채널을 이용하여 충돌 확률을 감소시킨다. 문헌 [1]은 다중채널 상향링크에서 다수의 단말이 존재하는 경우 연속 간섭 제거(successive interference cancellation) 기법으로 신호를 복호화한다. 하지만 다중 접속 시스템에서 결합 복호화 기법이 최적으로 알려져 있다 [2]. 본 논문은 다중채널 상향링크에서 NORA를 고려하며 또한 채널 이득이 임계치 이상인 경우의 채널만을 사용하는 기회적 전송의 아웃티지 확률을 수학적으로 분석한다.

II. 시스템 모델 및 아웃티지 확률 성능 분석

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 K 개의 단말이 사용 가능한 M 개의 동일 직교 채널을 이용하여 단일 안테나를 갖는 한 개의 AP에게 동시에 신호를 전송하는 시스템을 고려한다. 각 단말은 에너지 효율성 및 주파수 효율성을 향상시키기 위해서 AP까지의 직교 채널 별 채널 이득에 따라서 기회적으로 신호를 전송한다. 구체적인 설명은 다음과 같다. k 번째 ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$) 단말로부터 AP까지 m 번째 ($m \in \{1, 2, \dots, M\}$) 직교 채널의 채널 계수를 $g_{k,m}$ 로 정의하며 모든 m 에 대해서 $\mathcal{CN}(0, \lambda)$ 의 독립 분포를 따른다고 가정한다. 각 단말은 특정 채널 이득 임계치 τ_k 를 넘는 직교 채널만을 사용하며 이산 균등분포(uniform distribution)로 하나의 직교 채널을 선택하여 AP에 신호를 전송한다. AP가 m 번째 직교 채널로 수신하는 신호는 y_m 은 다음과 같다.

$$y_m = \sum_{k \in D_m} \sqrt{P_t d_k^{-\alpha}} h_{k,m} x_k + n_m, \quad (1)$$

여기서 D_m 은 m 번째 직교 채널로 신호를 전송하는 단말 인덱스의 집합이며 P_t 와 d 는 단말의 송신 전력 및 단말과 AP까지의 거리를 나타낸다. 경로 감쇄 지수는 α 이다. 앞서 설명한 채널 $g_{k,m}$ 은 $\sqrt{d^{-\alpha}} h_{k,m}$ 이다. 즉, $\lambda = d^{-\alpha}$ 이다. k 번째 단말의 신호는 x_k 이며 AP에서 m 번째 직교 채널에 대한 가우시안 잡음 n_m 은 $\mathcal{CN}(0, N_0)$ 의 분포를 따른다.

AP는 각 직교 채널에 대해서 독립적으로 결합 복호화 기법을 사용하여 m 번째 직교 채널에 대한 복호화 성공 조건 S_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$S_m = \left\{ \log_2 \left(1 + \sum_{k \in D} \frac{P_t |g_k|^2}{N_0} \right) \geq \sum_{k \in D} R_k, \forall D \subseteq D_m \right\}, \quad (2)$$

여기서 R_k 은 k 번째 단말의 목표 전송률이다.

III. 단말 별 아웃티지 확률 성능 분석

본 논문에서는 제안하는 다중채널 상향링크용 기회적 비직교 랜덤 액세스 기법의 단말 별 아웃티지 확률을 수학적으로 분석하기 위해서 다음과 같이 결합 복호화 기법의 성공 조건을 단순화하여 아웃티지 확률의 상한을 유도한다.

$$S_m \supseteq \underline{S}_m = \left\{ \log_2 \left(1 + \sum_{k \in D[m]} \frac{P_t |g_k|^2}{N_0} \right) \geq \sum_{k \in D[m]} R_k \right\}. \quad (3)$$

일반성을 해치지 않고 k 번째 단말이 m 번째 직교 채널로 신호를 전송한다면 k 번째 단말의 아웃티지 확률 $P_{o,k}$ 은 $D[m]$ 에 대한 확률을 조건부 확률로 고려한 전체 확률의 원리에 따라 다음과 같다.

$$P_{o,k} = \sum_{D[m] \subseteq \{1, 2, \dots, K\} \setminus \{k\}} P_{o,k|D[m]} \times \Pr\{D[m]\}, \quad (4)$$

여기서 $P_{o,k|D[m]}$ 은 k 번째 단말과 집합 $D[m]$ 내의 단말들이 m 번째 직교 채널로 신호를 전송한 경우, 해당 직교 채널에 대한 AP의 아웃티지 확률이다. 각 단말의 전송 채널의 분포는 절단된(truncated) 지수 분포를 고려하여 $P_{o,k|D[m]}$ 을 유도할 수 있으며 기회적 전송을 위한 채널 이득 임계치와 채널의 분산으로부터 각 단말의 전송 확률을 유도하여 $D[m]$ 의 확률을 구할 수 있다. 최종적으로 $M=2$ 인 경우, k 번째 단말의 아웃티지 확률의 상한은 다음과 같다.

$$\bar{P}_{o,k} = \sum_{D[m] \subseteq \{1, 2, \dots, K\} \setminus \{k\}} \left[1 - \sum_{n=0}^{|D[m]|-1} \frac{e^{-\lambda(R_{D[m]}^* - \tau_{D[m]})}}{n!} \{ \lambda(R_{D[m]}^* - \tau_{D[m]}) \}^n \right] \times \prod_{u \in D[m]} P_{T,u} \prod_{v \in D^*[m] \setminus \{k\}} (1 - P_{T,v}). \quad (5)$$

여기서, $R_{D[m]}^* = P_t(2^{\sum_{k \in D[m]} R_k} - 1)/N_0$, $\tau_{D[m]} = \sum_{k \in D[m]} \tau_k$ 이며 k 번째 단말의 전송 확률은 $P_{T,k} = e^{-\lambda \tau_k} - e^{-2\lambda \tau_k}/2$ 이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

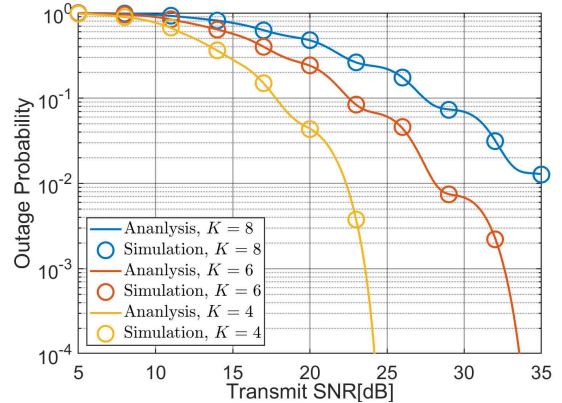


그림 1 다중채널 상향링크용 기회적 NORA의 아웃티지 확률

그림 1은 페딩 채널 환경에서 다중채널 상향링크용 기회적 NORA의 아웃티지 확률을 보인다. 단말의 수는 $K=4, 6, 8$ 이며 전송 확률과 목표 전송률은 각각 0.75와 2이다. 각 단말과 AP간의 정규화된 거리는 1.5로 동일하다. 시뮬레이션 결과로부터 우리는 분석된 아웃티지 확률의 상한은 K 단말의 수 또는 송신 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에 관계없이 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 거의 차이가 없다는 것을 확인할 수가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2020-0-00144-001, 제조 현장의 무선 연결성 한계 극복을 위한 산업용 비면허대역 무선 IoT 네트워크 핵심기술 개발)

참고 문헌

- [1] J.-B. Seo, H. Jin, and B. C. Jung, "Multichannel Uplink NOMA Random Access: Selection Diversity and Bistability," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 9, pp. 1515-1519, Sept. 2019.
- [2] Y. Zhang, K. Peng, Z. Chen, and J. Song, "SIC vs. JD: Uplink NOMA techniques for M2M random access," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, May 2017.