

주파수 효율적 다중 중계 노드 협력 시스템에서 상향링크 비직교 다중 접속의 아웃티지 확률 분석

염정선, 정방철
충남대학교

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

Outage Probability Analysis of Spectrally-Efficient Uplink Cooperative NOMA in Relay Networks

Jeong Seon Yeom and Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문은 다중 중계 노드가 존재하는 협력 중계 시스템에서 상향링크 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)의 성능을 분석한다. 구체적으로 페이딩 채널에서 두 개의 송신 노드와 K 개의 반이중 통신 (half duplex) 중계 노드가 그리고 하나의 수신 노드가 존재하며 복호화 성능을 향상하기 위해서 결합 복호화 (joint decoding) 기법을 적용한다. 또한, 반이중 통신 중계 노드 시스템의 듀티 사이클 로스 (duty cycle loss)를 극복하기 위해서 전송 중계 노드 선택 기법을 기반으로 한 다중 중계 노드의 협력을 통해 주파수 효율적 기술을 접목한다. 이를 통해 감소된 듀티 사이클 로스는 주파수 효율성을 높임으로써 아웃티지 확률이 감소한다. 본 논문은 아웃티지 확률의 수학적 분석 방법을 제공하며 이를 토대로 한 분석 결과를 Monte-Carlo 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 성능 분석의 정확함을 검증하며 또한 연속 간섭 제거 (successive interference cancellation)을 적용한 경우와 성능을 비교한다.

I. 서론

현재 사물인터넷 (internet-of-things, IoT) 단말의 수는 급격하게 증가하는 추세로, 2030년에 약 1,250억 개의 IoT 단말들이 전 세계적으로 존재할 것으로 전망된다. 이로 인해, 주파수 효율적 기술이 대두되고 있으며, 그 중 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 기술이 활발히 연구되었다. 상향링크 NOMA는 다수의 단말이 주파수 또는 코드 도메인에서 비직교 방식으로 수신기로 신호를 동시에 전송하며 수신기는 중첩되어 수신된 신호를 복호화하는 기술이다. 최근 수신기에서 중첩 신호를 복호화할 때, 오류 성능을 향상하기 위해서 연속 간섭 제거 (successive interference cancellation, SIC) 기법이 아닌 결합 복호화 (joint decoding, JD) 기법을 적용한 연구가 활발하다 [1]. 또한, IoT 단말의 전력 소비를 줄이기 위해서 다수의 중계 노드가 있는 협력 통신 시스템이 NOMA가 적용되어 연구되고 있다 [2].

본 논문은 협력적 중계 시스템에서 상향링크 NOMA 기술의 아웃티지 확률을 수학적으로 분석한다. 추가로 반이중 통신 (half duplex) 중계 시스템의 듀티 사이클 손실 (duty cycle loss)를 감소시키기 위해 다중 중계 노드를 활용한 주파수 효율적 중계 기술과 단일 중계 노드 선택기법을 적용한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 두 개의 송신 노드와 K 개의 중계 노드 그리고 수신 노드로 구성된다. 모든 노드는 단일 안테나를 가지며 송신 노드의 신호는 반드시 중계 노드를 통해 수신 신호로 수신된다. 본 논문의 주파수 효율적 중계 기술은 다음과 같다. $n-1$ 번째 시간 슬롯의 신호를 복호화에 성공한 중계 노드들 중 하나의 중계 노드를 선택하여 해당 $n-1$ 번째 시간 슬롯의 신호를 수신 노드에 전송하며 다른 나머지 중계 노드들은 듀티 사이클 손실없이 연속적으로 송신 노드로부터 n 번째 시간 슬롯의 신호를 수신받는다. 그러므로 수신 모드인 중계 노드는 송신 모드의 중계 노드들로부터 $n-1$ 번째 시간 슬롯의 신호에 대한 간섭 신호를 받는다. 하지만 n 번째 시간 슬롯의 신호를 복호화에 성공한 중계 노드들은 간섭 채널을 알고 있다고 가정하여 완벽한 간섭 제거가 가능하다. 그러므로 k 번째 중계 노드에서 n 번째 시간 슬롯의 수신 신호 모델은 다음과 같다.

$$y_k[n] = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_i} h_{i,k} x_i[n] + 0^{1_{D[n-1]}(k)} \sqrt{P_{r^*}} h_{r^*,k} x_{r^*}[n-1] + w_k. \quad (1)$$

여기서 $[n]$ 은 n 번째 타임 슬롯에 해당하는 표기법이며 i 와 r^* 는 각각 i 번째 송신 노드와 중계 노드 선택 기법에 의해 선택된 r^* 번째 중계 노드를 의미한다. 중계 노드에서 n 번째 타임 슬롯에 수신된 신호를 복호화에 성공한 중계 노드의 색인은 집합 $D[n]$ 에 포함된다. 전송 전력과 무선 채널, 신호 그리고 잡음에 해당하는 변수는 각각 P , h , x 그리고 w 에 해당한다. 모든 채널 $h(\cdot)$ 는 $CN(0, \sigma(\cdot))$ 의 분포를 따르며 w_k 는 $CN(0, N_0)$ 의 분포를 따르며 해당 변수에 대한 시간 슬롯 표기법은 생략한다. 함수 $1_A(z)$ 는 지시 함수이다. 중계 노드에서 JD 기법의 복호화 성공 조건은 다음과 같다.

$$S_k = \{\log_2(1 + \sum_{w \in W} q_{w,k}) \geq N \sum_{w \in W} R_w / (N-1)\}, \quad (2)$$

여기서 만약 $k \notin D[n-1]$ 이면 $\forall W \subseteq \{1, 2, r^*\}$ 그리고 $W \neq r^*$ 이며 만약 $k \in D[n-1]$ 이면 $\forall W \subseteq \{1, 2\}$ 이다. $q_{w,k}$ 는 $P_w |h_{w,k}|^2 / N_0$ 이다. R 은 목표 전송율이다. 전송 중계 노드 선택은 다음과 같이 수신 노드까지의 채널 이득이 가장 큰 중계 노드를 선택하여 협업 다중성을 향상한다.

$$r^* = \arg \max_{k \in D} |h_{k,d}|^2. \quad (3)$$

여기서 $h_{k,d}$ 는 k 번째 중계 노드로부터 수신 노드까지의 무선 채널이다. 수신 노드에서의 n 번째 시간 슬롯의 수신 신호 모델은 다음과 같으며

$$y_d[n] = \sqrt{P_{k^*}} h_{k^*,d} x_{k^*}[n] + w_d, \quad (4)$$

복호화 성공 조건은 다음과 같다.

$$S_d = \{\log_2(1 + P_{k^*} |h_{k^*,d}|^2 / N_0) \geq N(R_1 + R_2) / (N-1)\}. \quad (5)$$

III. 정확한 아웃티지 확률 분석 방법

본 논문에서 고려하는 다중 중계 노드 기반 협력 통신 시스템에서의 상향링크 NOMA의 아웃티지 확률 분석 결과는 논문의 분량 제한으로 기재하지 못하므로 이를 대체하여 분석 방법을 간략히 소개한다.

우선 복호화 집합을 조건부로 한 아웃티지 확률과 복호화 집합의 확률을 각각 유도하여 전체 확률의 법칙을 사용한다. 이때 복호화 집합은 이전 시간 슬롯의 복호화 집합에 의존하기 때문에 채널 환경을 단순화하여 복호화 집합의 크기만을 상태로 정의한 마르코프 연쇄 (Markov chain)를 적용한다. 또한, 중계 노드와 수신 노드에서의 JD 기법의 아웃티지 확률은 각각 3차원과 2차원 아웃티지 영역을 적절하게 분리하여 정확하게 유도할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

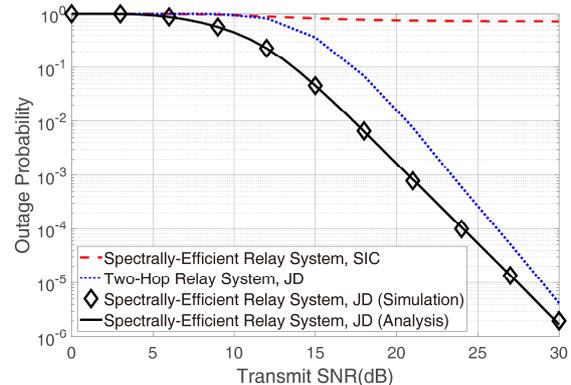


그림 1 다중 중계 노드 협력 시스템에서 상향링크 NOMA의 아웃티지 확률

그림 1은 주파수 효율적 다중 중계 노드 기반 협력 통신 시스템에서 상향링크 NOMA의 아웃티지 확률을 보인다. 중계 노드의 수는 $K=4$ 이며 두 송신 노드의 목표 전송율은 각각 1이다. 채널의 분산은 $\sigma_{2,k}^2 = 1/8$ 이며 나머지는 1이다. 수학적 분석 결과와 Monte-Carlo 시뮬레이션 결과가 동일하며 본 논문에서 고려하는 기법이 SIC 복호화 기법과 기존 중계 시스템 (two-hop relay system)보다 아웃티지 확률 측면에서 우수하다는 것을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2020-0-00144, 제조 현장의 무선 연결성 한계 극복을 위한 산업용 비면허대역 무선 IoT 네트워크 핵심기술 개발)

참고 문헌

- [1] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER Performance of Uplink NOMA With Joint Maximum-Likelihood Detector," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [2] Y. -B. Kim, K. Yamazaki, and B. C. Jung, "Virtual Full-Duplex Cooperative NOMA: Relay Selection and Interference Cancellation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 12, pp. 5882-5893, Dec. 2019.