

상향링크 간헐적 NOMA 시스템을 위한 다중 안테나 기반 신호 수신 기법

조민곤, 이영석, 이기훈, 정방철

충남대학교

mgcho@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Signal Detection Technique with Multiple Antennas for Uplink Bursty NOMA Systems

Min-Gon Cho, Young-Seok Lee, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung

Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University

요약

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 두 개의 사물인터넷 (Internet-of-things: IoT) 단말이 다중 안테나를 갖는 하나의 액세스 포인트 (access point: AP)로 패킷을 전송하는 상향링크 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access: NOMA) 기반 IoT 네트워크를 고려한다. 이때, 각 단말은 패킷 발생 여부 혹은 매체 접근 제어 메커니즘에 따라 간헐적으로 신호를 전송하며, 이 같은 상향링크 간헐적 NOMA (bursty NOMA: B-NOMA) 네트워크를 위한 두 단계 구조 (송신 단말 검파, 송신 데이터 검파)의 신호 수신 기법을 제안했다. 결과적으로 제안한 수신 기법은 확장된 결합 최대 우도 검파 기반의 수신 기법보다 낮은 연산량을 가지면서 전송 단말 검출 확률 및 비트 당 오류율 관점에서 더 우수한 성능을 갖는 것을 확인했다.

I. 서론

6G (sixth-generation) 이동통신과 같은 차세대 통신시스템은 더욱 높은 주파수 효율, 연결 밀도, 낮은 전송 지연과 같은 주요 성능 목표를 기반으로 다양한 기술들이 연구되고 있으며, 비직교 다중 접속 (non-orthogonal multiple access: NOMA)은 이러한 주요 성능 지표를 향상할 수 있는 무선 액세스 기술 중 하나로써 각광받고 있다. 전통적으로 통신시스템은 네트워크 내의 각 무선 단말에 서로 직교하는 시간, 주파수 혹은 코드를 할당하여 운용하였으나, 무선 단말 수의 급증에 따라 이 같은 직교 무선 자원이 부족할 것으로 전망된다. 특히, 스마트폰, 태블릿, 노트북과 같은 개인 무선 기기 활용의 증가와 동시에 초연결 네트워크의 핵심 인프라 중 하나로 주목받는 사물인터넷 (Internet-of-things: IoT) 단말 수가 급증하면서 무선 자원 부족 문제는 더욱 대두되고 있다 [1], [2].

NOMA는 둘 이상의 무선 단말이 동일한 무선 자원을 공유하여 신호를 송수신하는 기술이다. 구체적으로 다수의 단말이 서로 다른 전력 (power-domain: PD-NOMA) 혹은 코드 (code-domain: CD-NOMA)를 기반으로 동일한 무선 자원 블록 (radio resource block)을 공유하여 통신하는 기술이며, 이 같은 NOMA의 수신기로는 주로 순차적 간섭 제거 (successive interference cancellation: SIC) 혹은 결합 최대 우도 (joint maximum-likelihood: JML) 검파기가 활용된다. SIC 기반의 수신기는 JML 검파기 대비 낮은 복잡도와 연산량을 갖는 장점이 있지만, 검파 과정 중 오류가 발생하는 경우 해당 신호 이후 검파하는 신호 또한 오류가 발생하는 오류 전파 (error propagation)의 가능성이 있다. 또한, JML 검파기는 NOMA 기반의 네트워크에서 최적의 검파 성능을 달성하나, 노드의 수 혹은 변조 차수에 따라 복잡도가 기하급수적으로 증가하는 한계가 있다 [3], [4].

한편, 최근 [5]에서 상향링크 간헐적 NOMA 네트워크를 고려한 수신기 구조를 제안했다. 구체적으로 두 무선 단말이 상시가 아닌 서로 독립적인 일정 확률에 따라 기지국으로 같은 무선 자원 블록을 통해 패킷을 전송하는 통신 환경을 고려하였으며, 이는 IoT 단말의 에너지 효율 향상을 위한 간헐적 전송이나 매체 접근 제어 메커니즘에 따른 전송을 고려했을 때, 더욱 현실적인 시스템 모델로 간주할 수 있다 [6], [7]. 이때, 두 단말의 신호를 검출하기 위해서는 각 단말이 패킷을 전송하지 않는 경우를 기존 JML의 후보 성상에 추가로 고려하여 확장된 JML (Extended JML: E-JML) 검파를 해야 한다. 하지만, 통상적으로 한 패킷은 다수의 변조 심볼로 구성되며, E-JML은 두 단말이 모두 신호를 전송하지 않아도 모든 후보 성상에 대해 최소 거리 기준에 따라 신호 검파를 해야 한다. 각 단말의 확장 확률이 낮을수록 이에 대한 비효율성은 더욱 증가할 뿐만 아니라 E-JML은 최적의 성능을 달성하지 못하는 것으로 나타난다. 이에 따라 [5]에서는 패킷의 일부 심볼을 파일럿 신호로 활용하여 전송 단말을 먼저 추정하고 해당 단말의 신호를 검출하는 두 단계 구조의 수신기 구조를 제안했다.

본 논문에서는 기지국이 다중 안테나를 갖는 상향링크 간헐적 NOMA (bursty NOMA: B-NOMA) 네트워크에서 패킷의 첫 심볼만 온-오프 변조 (on-off keying: OOK) 신호를 통해 전송 여부를 송신하고 나머지 심볼에 데이터를 전송하는 통신 환경을 고려한다. 기지국은 다중 안테나로 수신된 OOK 신호로부터 송신 단말을 검파한 후 해당 단말의 신호를 검파하는 두 단계의 수신 기법을 제안한다. 또한, 제안한 수신 기법에 대해 각 단말의 전송 확률 및 액세스 포인트 안테나 수에 따른 신호 대 잡음 비 (signal-to-noise ratio: SNR) 대비 전송 단말 검출 확률 (exact recovery ratio: ERR)과 비트 당 오류율 (bit-error-rate: BER) 성능을 모의실험을 통해 분석한다.

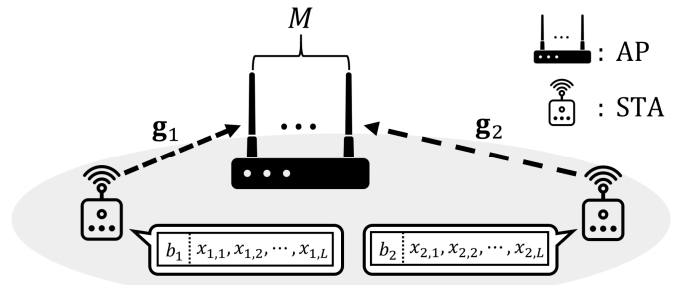


그림 1. 상향링크 B-NOMA 시스템 모델

II. 상향링크 B-NOMA 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 단일 안테나를 갖는 두 IoT 단말 (stations: STAs)과 M ($\in \mathbb{N}$)개의 안테나를 갖는 하나의 액세스 포인트 (access point: AP)가 존재하는 상향링크 간헐적 NOMA (bursty NOMA: B-NOMA) 네트워크를 고려한다. 구체적으로 두 단말은 서로 독립적으로 α ($= (0,1]$)의 동일한 확률에 따라 동일한 무선 자원 블록을 통해 액세스 포인트로 신호를 전송한다. 그림 1은 또한 각 단말이 액세스 지점으로 전송하는 패킷 $([b_k, \mathbf{x}_k], k \in [1,2])$ 및 단말과 액세스 지점 사이 무선 채널 ($\mathbf{g}_k$)을 나타낸다. 여기서 b_k 는 k 번째 단말의 전송 여부를 나타내기 위한 지표 (indicator) 비트로써 자신이 신호를 전송하는 경우 1을 아닌 경우 0을 전송한다. 즉, 각 단말의 b_k 는 α 의 확률에 따라 1의 값을 갖고 $1-\alpha$ 의 확률로 0의 값을 갖는 베르누이 랜덤변수를 따른다고 가정한다. 또한, $\mathbf{x}_k$ ($= [x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,L}]$)는 k 번째 단말의 변조 신호 벡터이며, 이는 데이터 비트를 나타낸다. 한편, 실제 패킷은 하나의 지표 비트와 다수의 변조 심볼로 구성될 수 있으나 본 논문에서는 각 단말의 패킷을 지표 비트와 하나의 직교 위상 편이 변조 (quadrature phase shift keying: QPSK) 신호 (즉, $L=1$) 한 쌍 $([b_k, \mathbf{x}_k])$ 으로 고려한다. 아울러, 액세스 포인트는 자신의 각 안테나와 단말 사이의 무선 채널 정보를 갖고 있으며, 이를 기반으로 각 단말의 송신전력을 스케줄링한다고 가정한다.

두 단말의 간헐적 송신에 따라 액세스 포인트의 각 안테나로 수신되는 지표 비트 $\mathbf{y}_{\text{Ind}} (\in \mathbb{C}^{M \times 1})$ 와 변조 신호 $\mathbf{y}_{\text{Mod}} (\in \mathbb{C}^{M \times 1})$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{\text{Ind}} &= \mathbf{h}_1 \sqrt{P_1 d_1^{-\eta}} b_1 + \mathbf{h}_2 \sqrt{P_2 d_2^{-\eta}} b_2 + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{g}_1 \sqrt{P_1} b_1 + \mathbf{g}_2 \sqrt{P_2} b_2 + \mathbf{n}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{y}_{\text{Mod}} = \mathbf{g}_1 \sqrt{P_1} x_1 b_1 + \mathbf{g}_2 \sqrt{P_2} x_2 b_2 + \mathbf{n},$$

여기서 $\mathbf{h}_k$ ($= [h_{k,1}, \dots, h_{k,M}]^T$)은 k 번째 단말과 액세스 포인트 사이의 무선 채널 벡터를 나타내며, 본 논문에서 모든 무선 채널 $h_{k,m}$ ($m \in \{1, \dots, M\}$)은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0,1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다. 또한, d_k 와 η 는 각각 k 번째 단말과 액세스 포인트 사이 거리 및 경로 손실 지수를 나타내며, 이 같은 대규모 페이딩을 고려한 등가 무선 채널을 $\mathbf{g}_k$ ($= \sqrt{d_k^{-\eta}} \mathbf{h}_k = \sigma_k^2 \mathbf{h}_k$)로 정의한다. 즉, $\mathbf{g}_k$ 는 $\mathcal{CN}(0, \sigma_k^2 \cdot \mathbf{I}_M)$ 의 분포를 따른다. 끝으로 P_k 와 $\mathbf{n}$ ($= [n_1, \dots, n_M]^T$)은 각 단말의 송신전력 및 통신 과정에서 액세스 포인트에 발생하는 열잡음 벡터를 각각 나타내며, $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, N_0 \cdot \mathbf{I}_M)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

III. 제안하는 B-NOMA를 위한 다중 안테나 기반 신호 수신 기법

엑세스 포인트는 수신된 패킷($\mathbf{y}_{\text{Ind}}, \mathbf{y}_{\text{Mod}}$)으로부터 다음과 같이 두 단계에 걸쳐 송신 단말과 해당 단말의 데이터를 검파한다.

A. 송신 단말 검파

엑세스 포인트는 $\mathbf{y}_{\text{Ind}}$ 로부터 각 단말의 송신전력 P_k 과 무선 채널 벡터 $\mathbf{g}_k$ 를 기반으로 다음과 같은 JML 검파를 통해 송신 단말을 검파한다:

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min_{\mathbf{b}, \mathbf{b}_2 \in \{0,1\}} \|\mathbf{y}_{\text{Ind}} - \mathbf{g}_{1V}\sqrt{P_1}\mathbf{b}_1 - \mathbf{g}_{2V}\sqrt{P_2}\mathbf{b}_2\|^2,$$

여기서 $\hat{\mathbf{b}} (= [\hat{b}_1, \hat{b}_2])$ 은 검파한 각 단말의 지표 비트 ($\mathbf{b} = [b_1, b_2]$)로 구성되는 벡터를 나타낸다.

B. 송신 데이터 검파

앞서 추정된 지표 비트 벡터 $\hat{\mathbf{b}}$ 를 기반으로 엑세스 포인트는 수신된 $\mathbf{y}_{\text{Mod}}$ 로부터 총 세 가지 경우로 나누어 데이터 신호를 검파한다.

1) 두 단말 모두 송신하지 않았다고 검파한 경우: 우선 $\hat{\mathbf{b}} = [0,0]$ 인 경우 두 단말 모두 전송패킷이 없는 상황이므로 엑세스 포인트는 검파를 수행하지 않는다.

2) 한 단말만 송신했다고 검파한 경우: $\hat{\mathbf{b}} = [1,0]$ 혹은 $\hat{\mathbf{b}} = [0,1]$ 인 경우 두 단말 중 한 단말의 전송패킷만 있는 상황이므로 엑세스 포인트는 다음과 같은 최대 우도 (maximum-likelihood: ML) 검파기를 통해 해당 단말 $\hat{k}$ 의 변조 심볼 $\hat{x}_{\hat{k}}$ 을 검파한다:

$$\hat{x}_{\hat{k}} = \arg \min_{x \in \mathcal{X}} \|\mathbf{y}_{\text{Mod}} - \mathbf{g}_{\hat{k}V}\sqrt{P_{\hat{k}}}\mathbf{x}\|^2,$$

여기서 $\mathcal{X} = \{(1+j)/\sqrt{2}, (1-j)/\sqrt{2}, (-1-j)/\sqrt{2}, (-1+j)/\sqrt{2}\}$ 는 정규화된 QPSK 변조 심볼의 집합을 나타낸다.

3) 두 단말 모두 송신했다고 검파한 경우: 마지막으로, $\hat{\mathbf{b}} = [1,1]$ 인 경우 두 단말 모두 패킷을 전송한 상황이므로 엑세스 포인트는 다음과 같은 JML 검파기를 통해 두 단말의 변조 심볼 $\hat{\mathbf{x}} (= [\hat{x}_1, \hat{x}_2])$ 을 검파한다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathcal{X}} \|\mathbf{y}_{\text{Mod}} - \mathbf{g}_{1V}\sqrt{P_1}\mathbf{x}_1 - \mathbf{g}_{2V}\sqrt{P_2}\mathbf{x}_2\|^2.$$

한편, 다음과 같이 정의되는 E-JML 검파기를 이용하여 $\mathbf{y}_{\text{Mod}}$ 으로부터 지표 비트와 데이터 비트를 동시에 검파할 수도 있다.

$$[\hat{\mathbf{b}}, \hat{\mathbf{x}}] = \arg \min_{\mathbf{b}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathcal{X}_{\text{ext}}} \|\mathbf{y}_{\text{Mod}} - \mathbf{g}_{1V}\sqrt{P_1}\mathbf{x}_1 - \mathbf{g}_{2V}\sqrt{P_2}\mathbf{x}_2\|^2,$$

여기서 $\mathcal{X}_{\text{ext}} (= \{0 \cup \mathcal{X}\})$ 이다.

IV. 모의실험 결과

모의실험은 상향링크 간헐적 NOMA (B-NOMA) 시스템 고려하여 제안한 다중 안테나 기반 신호 수신 기법의 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 대비 전송 단말 검출 확률 (exact recovery ratio: ERR)과 비트 당 오류율 (bit-error-rate: BER) 성능을 각각 비교 분석했다. 각 단말은 서로 독립적으로 $\alpha = 0.5$ 의 확률에 따라 정규화된 송신전력으로 신호를 전송하며, 두 번째 단말이 첫 번째 단말보다 상대적으로 더 멀리 있는 통신 환경을 가정했다. 즉, $P_1 = P_2 = 1$ 이고 $\sigma_1^2 = 2\sigma_2^2 = 1$ 이다. 또한, 엑세스 포인트는 각각 2, 4, 8개의 안테나를 갖는 상황 ($M \in \{2, 4, 8\}$)을 고려했다.

구체적으로 그림 2는 제안하는 두 단계 신호 수신 기법 (proposed, 실선)과 E-JML (O (STA1), $\diamond$ (STA2)) 기반 검파 기법의 SNR 대비 ERR 성능 모의실험 결과를 나타내며, 본 논문에서 ERR는 다음과 같이 정의했다:

$$\text{ERR} = \begin{cases} 1, & \text{when } \hat{\mathbf{b}} = \mathbf{b}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

또한, 그림 3은 본 논문에서 제안한 신호 수신 기법 (실선 (STA1), 점선 (STA2))과 E-JML (O (STA1), $\diamond$ (STA2)) 검파 기법의 SNR 대비 BER 성능 모의실험 결과를 나타낸다. 결론적으로 제안한 두 단계 신호 수신 기법이 ERR 및 BER 관점에서 E-JML 검파보다 더 우수한 성능을 보이는 것으로 확인했다. 또한, E-JML의 경우 각 단말의 전송 여부와 무관하게 $(M+1)^2$ 개의 후보 성상에 대해 검파를 해야 하지만, 제안하는 기법은 두 단말의 전송 확률에 따라 평균적으로 $2\alpha M + \alpha^2 M^2$ 개의 후보 성상에 대해 검파를 수행하므로, 훨씬 낮은 연산량을 갖는다.

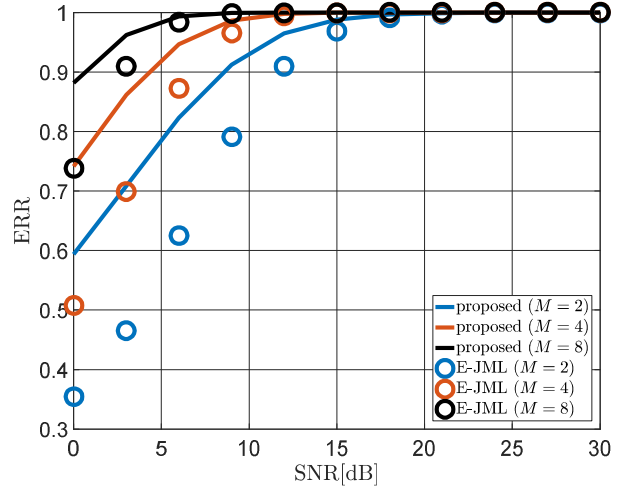


그림 2. 제안하는 B-NOMA 신호 수신 기법의 SNR 대비 ERR 성능

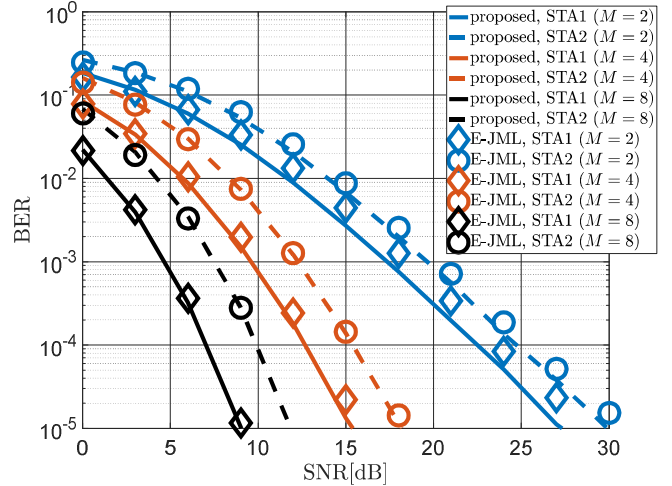


그림 3. 제안하는 B-NOMA 신호 수신 기법의 SNR 대비 BER 성능

V. 결론

본 논문에서는 상향링크 간헐적 비직교 다중 접속 네트워크 (B-NOMA)를 위한 다중 안테나 기반 두 단계 구조의 신호 수신 기법을 제안하고 모의실험을 통해 전송 단말 검출 확률 (ERR) 및 비트 당 오류율 (BER) 성능을 분석했다. 결론적으로 제안한 두 단계 수신 기법이 E-JML 보다 상대적으로 낮은 연산량을 가지면서 우수한 성능을 갖는 것으로 확인했으며, 차후 제안한 다중 안테나 기반 수신 기법의 ERR 및 BER 성능을 수학적으로 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019-0-00964, 스펙트럼 쉐어링을 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발)

참고 문헌

- [1] F. Tariq *et al.*, "A speculative study on 6G," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 4, pp. 118-125, Aug. 2020.
- [2] X. Chen *et al.*, "Massive access for 5G and beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 3, pp. 615-637, Mar. 2021.
- [3] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko and B. C. Jung, "BER performance of uplink NOMA with joint maximum-likelihood detector," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [4] K. -H. Lee, J. S. Yeom, B. C. Jung and J. Joung, "A novel non-orthogonal multiple access with space-time line codes for massive IoT networks," in *Proc. IEEE 90th Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)*, pp. 1-5, Honolulu, HI, USA, Sept. 2019.
- [5] M. B. Shahab, S. J. Johnson, M. Shirvanimoghaddam and M. Dohler, "Receiver design for uplink power domain NOMA with discontinuous transmissions," *IEEE Commun. Lett.*, May 2021 (early access article).
- [6] H. Nam, K. S. Ko, I. Bang and B. C. Jung, "Achievable rate analysis of opportunistic transmission in bursty interference networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 654-657, Mar. 2018.
- [7] 조민근, 이기훈, 배재원, 정방철, "NR-U와 WiFi 공존환경에서 전송률 및 공평성 성능분석," *한국통신학회 학술대회논문집*, pp. 1004-1005, Feb. 2021.