

기회적 Grant-Free 랜덤 액세스 시스템을 위한 압축 센싱 기반 단말 검출기법

배유경, 이기훈, 정방철

충남대학교 전자공학과

ykb1103@o.cnu.ac.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Compressed Sensing-Aided Active Device Detection for Opportunistic Grant-Free Random Access Systems

Yoo-Kyung Bae, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung

Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University

요약

본 논문은 각각 단일 안테나를 가지며 산발적으로 패킷을 생성하는 다수의 단말이 다중 안테나를 갖는 기지국으로 데이터를 전송하는 Grant-free 상향링크 네트워크를 고려한다. 이때, 각 단말의 무선 채널 이득에 기반한 기회적 전송을 기반으로 동시 직교 매칭 퍼스uits (Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit: SOMP)을 통한 활성 단말 검출기법의 성능을 분석했다. 결과적으로 제안한 기법이 낮은 신호 대 잡음 비(Signal-to-Noise Ratio: SNR) 구간에서도 매우 향상된 정확한 복구율(Exact Recovery Ratio: ERR) 성능을 보이는 것으로 분석했다.

I. 서론

5세대 (Fifth-Generation: 5G) 이동통신 시스템의 주요 서비스 유형 중 하나인 대규모 사물통신 (massive Machine Type Communications: mMTC)의 주요 성능 요구사항은 단위 면적당 수용할 수 있는 무선 단말의 수이며, 이를 연결 밀도(connection density)로 정의한다. 5G에서는 연결 밀도를 단위 면적(km²) 당 백만 개(10⁶ devices/km²) 수준으로 정의하며, 6G 이동통신 시스템은 천만 개(10⁷ devices/km²) 수준의 초연결성을 요구할 것으로 전망된다 [1]. 이 같은 초연결 네트워크의 핵심 인프라 중 하나인 사물인터넷 (Internet-of-Things: IoT) 단말의 수는 2025년까지 전 세계적으로 750억 개에 이를 것으로 전망됨에 따라 최근 mMTC 네트워크의 효율적인 신호처리를 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다 [2-4].

통상적으로 mMTC 네트워크의 단말은 에너지 효율 향상을 위해 산발적(sporadic)으로 데이터를 전송하며, 기지국은 대규모로 연결된 단말에 비해 매우 적은 수의 단말이 전송한 데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 기술이 요구된다. 이에 따라 최근 대규모 단말의 랜덤 액세스 과정에서 야기되는 신호 오버헤드(signaling overhead) 및 지연 문제를 완화할 수 있는 기술로 Grant-free 랜덤 액세스가 각광받고 있다 [3], [4].

Grant-free 랜덤 액세스는 각 단말이 기지국의 허가(grant) 없이 사전 할당된 프리앰블(preamble)을 기반으로 메타데이터(meta-data)와 데이터를 순차적으로 전송하고, 기지국은 수신한 메타데이터로부터 사전 정의된 프리앰블을 통해 활성 단말 검출과 해당 단말의 무선 채널 정보(channel state information: CSI)를 추정한 후 데이터를 검출한다. 특히, 이처럼 산발적으로 발생하는 신호의 효율적인 처리를 위해 압축 센싱(Compressed Sensing) 기반의 검출 기법이 활발히 연구되고 있다 [3].

한편, 시분할 이중통신(time-division duplexing: TDD) 시스템의 채널 가역성(reciprocity)을 고려하는 경우 대규모로 연결된 단말이 기지국에서 광역전파(broadcast)하는 파일럿 신호를 기반으로 자신의 무선 채널 정보를 비교적 용이하게 추정할 수 있다 [5]. [6]에서는 이 같은 CSIT (CSI at Transmitter) 환경을 기반으로 산발성 제어 기술을 제안했으며, mMTC 네트워크의 전송률을 향상할 수 있는 것으로 분석했다. 하지만, 이는 각 단말에서 신호 전처리 과정이 요구되며, 기지국이 다중 안테나를 갖는 경우 적용이 어렵다.

본 논문에서는 기지국이 다중 안테나를 갖는 mMTC 네트워크에서 CSI를 통한 단말의 기회적 전송 기반 Grant-free 랜덤 액세스를 제안한다. 각 단말은 기지국에서 주기적으로 광역전파하는 파일럿 신호와 임계 무선 채널 이득으로부터 CSI를 획득하고 임계 무선 채널 이득에 따라 기회적으로 신호를 전송하며, 기지국은 다중 측정 벡터(multiple-measurement vector: MMV) 기반의 압축 센싱 기법인 동시 직교 매칭 퍼스uits (Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit: SOMP)을 통해 활성 단말을 검출한다.

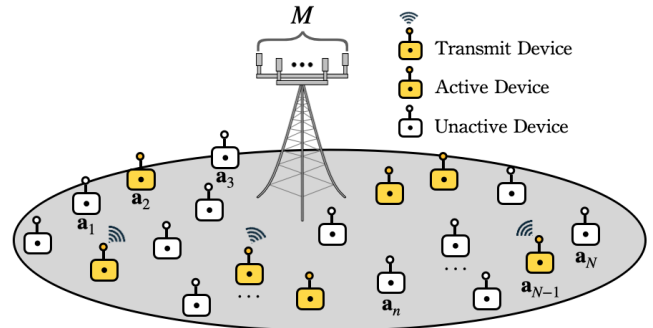


그림 1. 기회적 Grant-free 랜덤 액세스 시스템 모델

II. 기회적 Grant-free 랜덤 액세스

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 단일 안테나를 갖는 N 개의 무선 단말이 M 개의 안테나를 가진 기지국으로 데이터를 송신하는 상향링크 네트워크를 고려한다. 각 단말에는 고유 아이디 같은 길이 L 의 프리앰블 $\mathbf{a}_n = [a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,L}]^T (n \in \{1, 2, \dots, N\})$ 이 할당되어 있으며, 기지국은 모든 단말에 할당된 프리앰블의 집합 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N]$ 를 갖고 있다고 가정한다. 여기서 프리앰블 \mathbf{a}_n 의 각 원소 $a_{n,i}$ 은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1/L)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정하며, $\|\mathbf{a}_n\|^2 = 1$ 이다. 즉, 각 단말은 정규화된 비직교 프리앰블이 할당된다고 가정한다.

각 단말은 에너지 효율 향상을 위해 단말의 활성 확률 $\epsilon (\ll 1)$ 에 따라 데이터가 발생한다. 기지국에서 각 단말의 활성 확률값은 안다고 가정하며, 단말의 기회적 전송을 위해 각 단말과 기지국 안테나 사이 무선 채널 이득 $\gamma_n = \|\mathbf{h}_n\|^2$ 이 임계값 $\gamma_{th} (\geq 0)$ 이상인 단말만 전송을 허용한다. 여기서 $\mathbf{h}_n = [h_{n,1}, h_{n,2}, \dots, h_{n,M}]^T$ 은 n 번째 단말의 무선 채널 벡터이며, $h_{n,m} (m \in \{1, 2, \dots, M\})$ 은 n 번째 단말과 기지국의 m 번째 안테나 사이 무선 채널을 나타낸다. 본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 의 동일한 분포를 따른다고 가정한다.

한편, 이로부터 무선 채널 이득에 따른 각 단말의 송신 확률은 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$\Pr(\|\mathbf{h}_n\|^2 \geq \gamma_{th}) = 1 - \Pr(\|\mathbf{h}_n\|^2 < \gamma_{th}) = e^{-\gamma_{th}} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\gamma_{th}^m}{m!}.$$

이를 기반으로 단말의 활성 확률 및 무선 채널 이득을 고려한 시간슬롯 당 실질적인 평균 활성 단말 수 K 는 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$K = N \Pr(\alpha_n = 1) \Pr(\gamma_n \geq \gamma_{th}) = N \epsilon e^{-\gamma_{th}} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\gamma_{th}^m}{m!},$$

여기서 α_n 은 단말의 기본적인 활성화 인덱스를 나타내며, 활성 단말의

알고리즘 1. SOMP 기반 활성 단말 검출 알고리즘

Input : $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{L \times M}$, $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{L \times M}$
Initialization : $\mathbf{R}^{(0)} = \mathbf{Y}$, $\Lambda^{(0)} = \emptyset$, and $k = 1$
1: while $k \leq K$
 2: $\lambda_k = \arg \max_{n \in \mathcal{N}} \left(\sum_{m=1}^M |\langle \mathbf{a}_n, \mathbf{r}_m^{(k-1)} \rangle| \right)$
 3: $\Lambda^{(k)} = \Lambda^{(k-1)} \cup \{\lambda_k\}$
 4: $\mathbf{P} = \mathbf{A}(\Lambda^{(k)}) (\mathbf{A}(\Lambda^{(k)})^H \mathbf{A}(\Lambda^{(k)}))^{-1} \mathbf{A}(\Lambda^{(k)})^H$
 5: $\mathbf{R}^{(k)} = (\mathbf{I}_L - \mathbf{P}) \mathbf{Y}$
 6: $k \leftarrow k + 1$
7: end while
Output : $\Lambda^{(K)}$

경우 1의 값을 할당하고 아닌 경우 0의 값이 할당된다. 즉, 각 단말의 α_n 은 ϵ 의 확률로 1의 값을 갖고, $1 - \epsilon$ 의 확률로 0이 된다. 기본 활성화 인덱스와 임계 무선 채널 이득 조건을 모두 만족하는 실제 활성화된 송신 단말의 집합을 다음과 같이 정의한다:

$$\Omega = \{n | \alpha_n = 1, \gamma_n \geq \gamma_{th}\}.$$

기지국은 주기적으로 파일럿 신호와 무선 채널 이득 임계값을 광역전파하며, 각 단말은 이를 통해 자신과 기지국 안테나 사이 무선 채널 정보 \mathbf{h}_n 와 γ_{th} 를 각각 획득한다. 이후, 각 단말은 다음과 같은 조건에 따라 메타데이터 x_n 과 데이터를 순차적으로 전송한다:

$$x_n = \begin{cases} 1, & \text{when } \alpha_n = 1, \gamma_n \geq \gamma_{th} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

기지국의 각 안테나로 수신되는 메타데이터 신호 $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{L \times M}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\mathbf{Y} = \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_n \mathbf{h}_n^T x_n + \mathbf{Z},$$

여기서 $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{L \times M}$ 는 신호 송수신 과정에서 발생하는 열잡음 행렬을 나타내며, 본 논문에서 모든 잡음은 $\mathcal{CN}(0, N_0/L)$ 의 분포를 따른다고 가정한다.

기지국은 수신한 신호 \mathbf{Y} 와 사전 정의된 프리엠블 집합 \mathbf{A} 를 기반으로 알고리즘 1과 같은 과정을 통해 활성 단말 검출을 수행한다. 다중 안테나로 수신된 신호는 결합 희소성(joint sparsity)을 가지므로, MMV기반 압축 센싱 기법의 대표적인 휴리스틱(heuristic) 알고리즘 중 하나인 SOMP를 통해 검출을 수행한다. 구체적으로, 우선 수신 신호 \mathbf{Y} 를 알고리즘의 초기 잔차 $\mathbf{R}^{(0)}$ 로 정의하며, 추정된 활성 단말의 집합인 $\Lambda^{(0)}$ 를 공집합으로 초기화한다.

알고리즘 1에서 $\mathbf{r}_m^{(k)}$ 는 k 번째 반복 과정에서 잔차 $\mathbf{R}^{(k)}$ 의 m 번째 열을 나타낸다. 기지국은 활성 단말 수 K 를 알고 있다고 가정하며, 이에 따라 총 K 번 반복하여 활성 단말을 추정한다 (1). 우선, 프리엠블 집합 \mathbf{A} 의 각 열(단말에 할당된 프리엠블 \mathbf{a}_n) 중 잔차 행렬 각 열 $\mathbf{r}_m^{(k-1)}$ 과 내적인 결과의 l^1 노름(norm) 값이 최대가 되는 열의 인덱스를 활성 단말로 추정한다 (2), (3). 이후, 추정된 활성 단말 $\Lambda^{(k)}$ 에 해당하는 프리엠블을 기반으로 투영행렬을 형성하며, 수신 신호에서 현재 추정된 단말들의 프리엠블 성분을 제거하여 잔차를 업데이트한다 (4), (5). 이 과정을 K 번 반복하며, 끝으로 추정된 활성 단말 집합 $\Lambda^{(K)}$ 을 출력한다.

마지막으로 실제 활성화된 송신 단말 Ω 과 기지국이 추정한 활성 단말을 비교한다. 본 논문에서는 모든 송신 단말을 정확히 추정할 확률인 정확한 복구율(exact recovery ratio: ERR) 성능을 다음과 같이 정의한다:

$$ERR = \begin{cases} 1, & \text{when } \Omega = \Lambda^{(K)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

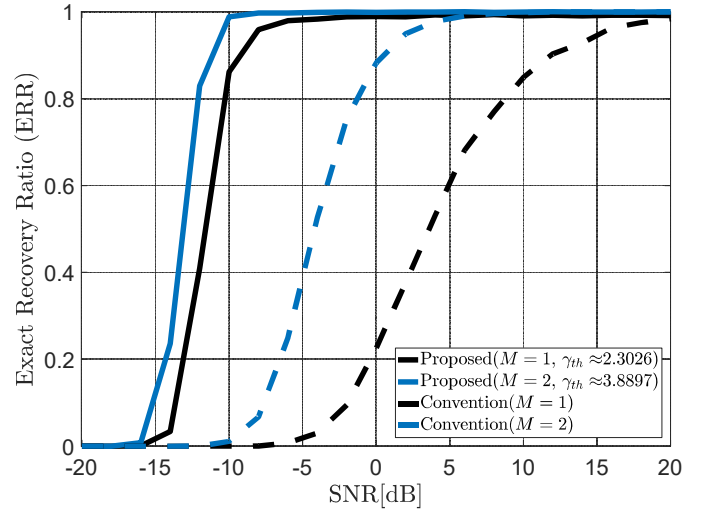


그림 2. 기회적 Grant-free 랜덤 액세스의 SNR 대비 ERR 성능

III. 모의실험 결과 및 결론

그림 2는 본 논문에서 고려한 Grant-free 랜덤 액세스 과정에서 자신의 무선 채널 이득이 임계값 이상인 단말만 신호를 전송하는 기회적 전송 기법(Proposed)과 채널 이득과 무관하게 전송하는 기존 기법(Conventional)의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR) 대비 ERR 성능 비교 결과를 나타낸다. 두 시스템 모두 SOMP 기반하여 활성 단말 검출을 수행한다. 모의실험 환경은 프리엠블 길이가 200($L=200$)이고, 총 1000개 단말($N=1000$)이 활성 확률 0.2($\epsilon=0.2$)로 기지국에 데이터를 전송한다. 또한, 기지국의 안테나 수는 각각 1, 2 개($M=1, 2$)를 고려했다. 동등한 비교를 위해 활성화되는 평균 단말의 수 K 는 두 상황 모두 20개로 정의하였으며, $M=1, 2$ 일 때, γ_{th} 는 각각 2.3026, 3.8897로 정의했다. 결과적으로 임계 무선 채널 이득에 기반하여 기회적으로 전송하는 경우 기존 기법 대비 매우 낮은 SNR 구간에서도 향상된 ERR 성능을 보이는 것으로 분석했다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2019R1A2B5B01070697).

참고 문헌

- [1] Z. Zhang *et al.*, "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sept. 2019.
- [2] H. S. Jang, H. Jin, B. C. Jung and T. Q. S. Quek, "Versatile Access Control for Massive IoT: Throughput, Latency, and Energy Efficiency," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 19, no. 8, pp. 1984-1997, Aug. 2020.
- [3] L. Liu *et al.*, "Sparse Signal Processing for Grant-Free Massive Connectivity: A Future Paradigm for Random Access Protocols in the Internet of Things," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 35, no. 5, pp. 88-99, Sept. 2018.
- [4] T. Kim and B. C. Jung, "Performance Analysis of Grant-Free Multiple Access for Supporting Sporadic Traffic in Massive IoT Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 166648-166656, Nov. 2019.
- [5] M. Shirvanimoghaddam, M. Dohler and S. J. Johnson, "Massive nonorthogonal multiple access for cellular IoT: Potentials and limitations," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 55-61, Sept. 2017.
- [6] J. Hong, W. Choi and B. D. Rao, "Sparsity Controlled Random Multiple Access With Compressed Sensing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 2, pp. 998-1010, Feb. 2015.