

대규모 디바이스 동시 접속을 위한 초저지연 랜덤 액세스 기법

윤지영, 최완

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어공동통신연구소

Jiyyun423@snu.ac.kr, wanchoi@snu.ac.kr

Random Access Scheme for the Massive Connectivity with Ultra Low Latency

Jiyoung Yun, Wan Choi

Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University

요 약

5G 및 B5G 셀룰러 통신을 위해서 대규모 다중 접속 서비스를 지원하는 새로운 랜덤 액세스 기법들이 소개되었다. 특히 초대규모 다중 접속을 저전력, 저지연성, 적은 오류 확률로 지원하는 URA (unsourced random access) 기법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 현재 대부분의 URA 기법들은 무선 통신 채널 환경을 반영하지 못했다는 한계를 가지고 있다. 대규모 다중 접속 환경은 채널 상관 시간이 단일 통신 프레임 시간보다 짧은 경우가 존재하기 때문에, 동적 채널 (dynamic channel)에서의 간섭 및 오류를 극복할 수 있는 프로토콜 개발이 해결해야 하는 중요한 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 대규모 페이딩 및 소규모 페이딩을 동시에 고려한 무선 채널 환경에서 통신 노드의 에너지 효율성을 극대화하기 위한 대규모 랜덤 액세스 기법을 제안한다. 제안 기법은 두 단계 채널 부호를 통해 대규모 사용자의 간섭 제어 및 무선 채널 페이딩으로 인한 오류 정정을 동시에 수행한다. 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 무선 페이딩 채널 환경에서 저전력으로 대규모 사용자에게 초저지연 통신을 지원할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

최근 5G 및 B5G 셀룰러 통신에서 대규모 사물 통신이 주목받고 있다. 대규모 연결 시스템은 수많은 사용자 대비 실시간 활성 사용자의 수가 적은 특성이 있다. 이러한 특성을 바탕으로 압축 센싱 기법을 활용한 랜덤 액세스 기법들이 제안되었다 [1-3]. 압축 센싱 기법을 활용한 랜덤 액세스 기법은 서로 다른 사용자의 프리앰블이 같은 시간, 주파수 통신 자원을 이용할 때에 사용자의 다른 프리앰블을 복원한다. 즉, 두 개 이상의 사용자가 같은 통신 자원을 공유하는 랜덤 액세스를 지원한다. 하지만 기존 압축 센싱 기반 랜덤 액세스 기법은 시스템 내의 모든 잠재 사용자가 서로 다른 프리앰블을 할당받아야 하므로 대규모 통신에서 활용하기에 적합하지 않을 수 있다.

최근 더 많은 수의 사용자를 하나의 통신 시스템에서 지원하기 위해 시스템 내의 모든 사용자가 같은 코드북을 공유하는 URA (unsourced random access) 프로토콜이 제안되었다 [4]. 기존 압축 센싱 기반 grant-free 랜덤 액세스는 사전에 사용자에 서로 다른 통신 자원을 할당하는 방법으로 작동한다. 이와 달리 URA는 시스템 내의 모든 잠재 사용자가 동일한 코드북 자원을 공유하고, 기지국은 한 프레임 내에 송신된 메시지의 리스트를 복원한다. URA는 시스템 내에 존재하는 전체 사용자 중 실시간 비활성 사용자가 통신 시스템의 성능에 영향을 미치지 않게 해 대규모 통신 환경에서 저전력/저지연/고신뢰 통신을 가능케 한다. 하지만 기존 URA 프로토콜 기반 통신 알고리즘은 무선 환경에서 빠르게 변하는 채널에 적합한 방법을 제안하지 못하였다는 한계가 있다.

본 연구에서는 기존 URA 기법들의 한계를 극복하기 위해 두 단계의 부호화-복호화 구조에서 강력한 간섭 제어-오류 정정 부호를 제안한다. 제안하는 URA 기법은 내부 코드로 압축 센싱을 활용해서 대규모 사용자의 송신 심볼을 복원하고, 외부 코드로 대규모 사용자 간의 간섭 제어 및 페이딩 채널로 인한 심볼 오류 정정을 수행한다.

II. 본론

가. 시스템 모델

본 논문에서는 대규모 다중 접속을 지원하기 위해 URA 프로토콜을 고려한다. 먼저 통신 시스템 내부에 존재하는 총사용자 수 및 단일 통신 프레임 시간 내에 통신 자원을 사용하는 활성 사용자 수를 각각 K_{tot} [count], K_a [count]라고 한다. 한 사용자가 단일 통신 프레임에 전송하는 정보를 B [bits]로 정의한다. 또한 하나의 프레임은 L 개의 부 프레임으로 이루어져 있고, 무선 통신 채널의 coherence time의 길이가 하나의 부 프레임에 해당한다고 가정한다. 즉, 한 사용자가 메시지를 L 개의 독립적인 페이딩 블록에 거쳐서 전송하는 시스템을 고려한다. 송신 기기와 수신 기지국 사이 무선 통신 채널은 대규모 페이딩과 소규모 페이딩을 모두 고려한다. 대규모 페이딩 채널은 각 활성 사용자별로 통신하는 동안 일정하다고 가정하며, 사용자 k 의 대규모 페이딩 채널 세기를 g_k 라 할 때, $10 \log_{10} g_k \sim U_{[10 \log g_{min}, 10 \log g_{max}]}$ 이다. 소규모 페이딩 채널은 블록마다 채널이 독립적으로 변하는 Rayleigh fast fading channel을 가정하며 활성 사용자 k 의 l 번째 부 프레임의 무선 채널은 $h_k(l) \sim CN(0,1)$ 이다.

나. 문제 정립 및 제안 알고리즘

먼저 대규모 사용자의 통신 상황에서의 오류 확률을 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon = p_e + p_f$$

이 때, p_e 는 오류 확률, p_f 는 오탐 확률을 의미한다. 평균 에너지 효율은 목표 프레임 오류율을 달성하기 위해 최소로 요구되는 한 비트당 평균 송신 전력으로 정의되며, 식은 다음과 같다.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{nP}{B}$$

이 때, n 은 통신 프레임의 길이를, P 는 활성 사용자들의 평균 송신 전력을 의미한다.

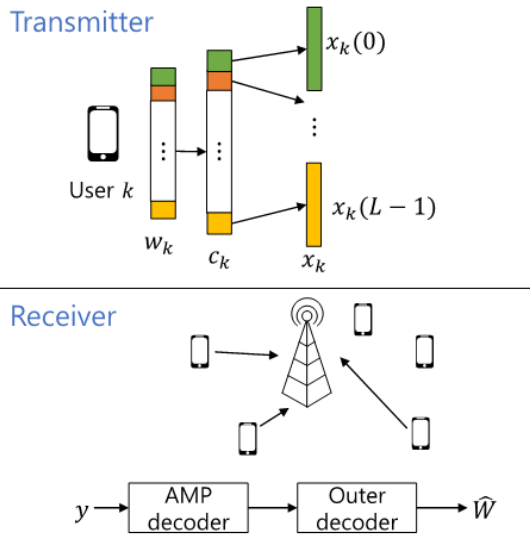


그림 1. 대규모 다중 접속 송수신 기법 개략도.

대규모 다중 접속을 지원하기 위해 수신 단에서는 압축 센싱 기반 신호 검출을 수행한다. 압축 센싱 기법을 적용하려면 신호 송신 중 채널이 일정해야 하므로 전체 메시지를 작은 크기의 메시지로 나눠서 부 프레임에 전송한다. 이때 분할 압축 센싱 기법을 적용하면 부 프레임에서 무선 채널 상태에 따라 정보 전달 시 오류가 발생하기도 한다. 이를 해결하기 위해 메시지를 간섭 제어 및 오류 정정이 가능한 채널 부호를 사용해 부호화한다. 수신신호를 바탕으로 기지국은 부 프레임마다 approximate message passing(AMP) 알고리즘을 통해 신호를 복원한다. 복원된 신호를 심볼의 형태로 변환하고 외부 채널 부호의 복호화를 통해 최대 t 개의 오류가 발생한 메시지를 모두 복원한다.

다. 시뮬레이션

시뮬레이션은 동시 접속 사용자가 각 10 명, 20 명, 30 명, 40 명, 50 명일 때 에너지 효율성을 측정하였다. 각 사용자는 공통 코드북에서 임의로 하나의 메시지를 선택해서 전송한다. 시뮬레이션을 진행하는 동안 $B = 50, n = 14,000, \epsilon = 0.1$ 로 설정하였다.

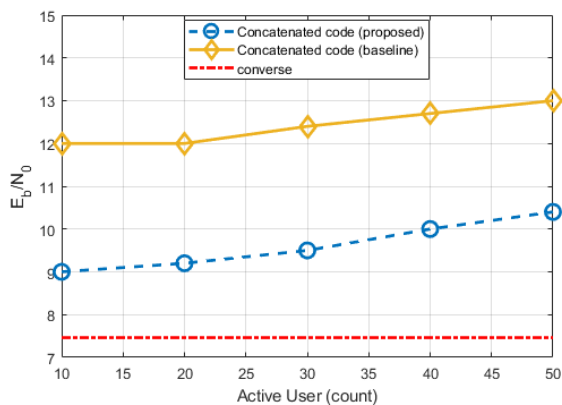


그림 2. 다중 접속 활성 사용자 수에 따른 에너지 효율성

본 연구에서는 사용자의 대규모 페이딩 채널을 고려하지 않은 URA 기법과 대규모 페이딩 채널을 고려해 불완전한 송신 전력 제어를 가정했을 때 제안한 기법의 에너지 효율성을 동시 접속 사용자에 따라

비교하였다. 또한, 완벽한 송신 전력 제어가 가능할 때, 수학적으로 계산한 에너지 효율성의 상계 (converse bound)와 제안한 기법의 성능을 비교하였다. 이때, 불완전한 송신 전력 제어를 가정했을 때 에너지 효율성의 상계는 알려진 바가 없으므로, 완벽한 송신 전력 제어의 성능 상계를 성능 비교군으로 설정했다. 시뮬레이션 결과, 제안한 기법이 기존 기법보다 좋은 에너지 효율 성능을 보이고, 성능 상계와 유사한 정도의 에너지 효율성을 달성함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 대규모 페이딩 및 소규모 페이딩을 모두 고려한 대규모 랜덤 액세스 기법을 제안하였다. 제안 알고리즘은 시스템 내에 있는 모든 사용자가 같은 시간, 주파수, 코드북을 공유하는 상황에서 채널 부호화 기법을 통해 메시지를 부호화하고, 부호화된 메시지를 압축 센싱 기법을 적용할 수 있는 크기의 메시지로 나뉘어 전송한다. 다중 사용자의 신호가 합쳐진 신호를 송신한 기지국은 두 단계의 디코딩을 통해 전송 메시지 리스트를 복원한다. 제안 기법이 두 종류의 채널 페이딩을 고려했을 때 높은 에너지 효율성을 달성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2021-0-02048)

참 고 문 헌

- [1] J. -P. Hong, W. Choi, and B. D. Rao "Sparsity controlled random multiple access with compressed sensing," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 2, pp.998-1010, 2014.
- [2] V. K. Amalladinne, J. -F. Chamberland, and K. R. Narayanan, "A coded compressed sensing scheme for unsourced multiple access," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 66, no. 10, pp.6894-6915, 2021.
- [3] S. Chae, S. Paek, B. Hong and W. Choi, "An overview of the Compressive Sensing based Multiple Access Techniques," Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, 2015.
- [4] Y. Polyanskiy, "A perspective on massive random-access," IEEE International Symposium in Information Theory, 2017.