

Massive MIMO 시스템에서 mMTC를 위한 반직교 랜덤 액세스

김도우*, 문석재*, 이장원^o

Semi-Orthogonal Random Access for mMTC in Massive MIMO Systems

Dowu Kim*, Seokjae Moon*, Jang-Won Lee^o

요약

Fifth Generation (5G)과 Sixth Generation (6G) 시스템에서는 Machine Type Communication Device (MTC)의 수가 급속도로 증가함에 따라 많은 수의 MTC가 동시다발적으로 next generation Node B (gNB)와의 접속을 시도할 것으로 예상된다. 이와 같은 mMTC 환경에서는 두 대 이상의 MTC가 같은 프리앰블을 선택하여 접속 요청을 시도하는 프리앰블 충돌 상황이 증가하게 되므로 접속 성공률은 감소하고 접속 지연시간이 증가하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 프리앰블 충돌 확률을 줄이기 위해 massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 시스템의 특성을 이용하여 MTC가 Semi-Orthogonal Multiple Access (SOMA) 기술을 통해 Radio Resource Control (RRC) 연결 요청을 하는 Semi-Orthogonal Random Access (SORA) 기법을 제시한다. MTC와 gNB 사이의 각 단계 별 랜덤 액세스 절차의 세부 시그널링을 제시하며 시뮬레이션 결과를 통해 SORA 기법이 기존 기법들보다 mMTC 환경에서 접속 성공률이 높은 것을 보인다.

Key Words : 5G, 6G, massive MIMO, Semi-Orthogonal Multiple Access, mMTC, Random Access

ABSTRACT

As the number of Machine Type Communication Devices (MTCs) is rapidly increasing in Fifth Generation (5G) and Sixth Generation (6G) systems, it is expected that a large number of MTCs will simultaneously attempt to connect to the next generation Node B (gNB). In such a mMTC environment, the number of preamble collisions where two or more MTCs select the same preamble will increase, leading to the reduced connection success rate and increased latency. In this paper, in order to reduce the probability of preamble collision, we propose a Semi-Orthogonal Random Access (SORA) where each MTC transmits its Radio Resource Control (RRC) connection request through Semi-Orthogonal Multiple Access (SOMA) using the properties of the massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system. We provide the detailed signaling procedures for each step between the MTCs and the gNB, and through simulation, we show that SORA achieves a higher access success rate in the mMTC environment compared with the existing techniques.

※ 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1A2C2084870).

• First Author : Yonsei University Department of Electrical & Electronic Engineering, dowu@yonsei.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Yonsei University Department of Electrical & Electronic Engineering, jangwon@yonsei.ac.kr, 중신회원

* Yonsei University Department of Electrical & Electronic Engineering, sjmoon@yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202102-042-B-RN, Received February 24, 2021; Revised March 24, 2021; Accepted March 24, 2021

I. 서 론

Fifth Generation (5G) New Radio (NR)에서는 스마트 미터링, 공장 자동화 등 km^2 당 약 100만대의 Machine Type Communication Device (MTC)의 통신을 지원하는 massive Machine Type Communications (mMTC)가 주요 시나리오 중 하나로 고려된다. 또한 차세대 통신인 Sixth Generation (6G)에서는 mMTC의 규모가 더욱 커질 것으로 예상된다^[1]. 이러한 mMTC 환경에서는 많은 수의 MTC가 동시다발적으로 next generation Node B (gNB)와 Radio Resource Control (RRC) 연결을 맺기 위하여 랜덤 액세스를 통한 초기 접속을 시도한다. 랜덤 액세스는 한정된 수의 프리앰블 자원을 복수의 MTC가 공유하여 경쟁 기반 방식으로 프리앰블을 전송하는 프리앰블 전송 단계와 프리앰블 검출에 성공한 MTC가 gNB로 RRC 연결 요청 메시지를 전송하는 RRC 연결 요청 단계로 구성된다. 대규모 접속이 예상되는 mMTC 환경의 프리앰블 전송 단계에서는 복수의 MTC가 동시에 동일 프리앰블을 선택하여 해당 MTC가 모두 랜덤 액세스에 실패하게 되는 비효율성이 존재한다. 복수의 MTC가 서로 다른 프리앰블을 전송하여 gNB가 해당 MTC의 프리앰블 검출에 성공하더라도 RRC 연결 요청단계에서 Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) 자원의 양이 부족하여 랜덤 액세스에 실패하는 문제도 있다. mMTC 환경에서는 이러한 랜덤 액세스 자원 부족으로 인해 프리앰블 재전송이 빈번하게 발생할 것으로 예상되며 이로 인해 접속 지연 시간이 크게 증가하는 문제가 있다.

복수의 MTC가 경쟁기반 랜덤 액세스에서 동일 자원을 선택해 발생하는 충돌 문제를 해결하기 위해 [2]에서는 평소에 경쟁 기반 방식으로 접속을 시도하다가 우선순위가 높은 데이터가 발생하면 미리 할당된 자원을 이용하여 비경쟁 기반 방식으로 전송하는 방식을 제시하였다. 이 기법은 우선순위가 낮은 MTC에게 랜덤 액세스 기회가 많이 부여되지 않는 형평성 문제가 존재한다.

[3]에서는 Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 시스템의 channel hardening과 favorable propagation 특성을 이용하여 gNB가 동일 프리앰블을 전송한 MTC에게 신호 이득을 판단할 수 있는 메시지를 전송하고, 해당 MTC 중 가장 강한 신호 이득을 가진다고 판단한 MTC만 프리앰블을 재전송하는 Strongest User Collision Resolution (SUCRe) 기법을 제시하였다. 하지만 복수의 MTC가 자신이

가장 강한 신호 이득을 가지고 있다고 판단하여 프리앰블을 재전송 할 경우 해당 MTC 모두 랜덤 액세스에 실패하게 된다. 또한 동일한 프리앰블을 통해 랜덤 액세스를 시도하는 복수의 MTC 중 최대 한 대의 MTC만 랜덤 액세스를 성공할 수 있다는 점에서 mMTC 환경을 지원하는데 한계가 있다.

기존의 연구들은 mMTC 환경의 프리앰블 전송 단계에서 한정된 프리앰블 문제를 해결하려는 시도를 하였다^[2-3]. 그러나 프리앰블의 수를 증가시켜도 Physical Downlink Control Channel (PDCCH) 자원이 한정되어 있어 성공률의 증가에 한계가 존재한다^[4]. 또한 MTC가 RRC 연결 요청 메시지를 전송하는 PUSCH 자원의 양도 한정적이라는 문제가 존재한다. 이에 따라 파워 또는 코드 도메인을 이용하여 한 PUSCH 자원에 복수의 MTC가 RRC 연결 요청 메시지를 전송하는 Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) 기반 방식에 대한 연구가 진행되었다^[5-6]. [5]에서는 gNB가 동일 프리앰블을 선택한 MTC에 대해 RRC 연결 요청 메시지의 수신 파워를 다르게 하여 디코딩하는 파워 도메인 NOMA 기반의 랜덤 액세스 기법을 제시하였다. 하지만 gNB로부터의 거리가 비슷한 MTC에 대해서는 해당 기법을 적용할 수 없는 단점이 있다. [6]에서는 코드 도메인 NOMA의 한 종류인 Sparse Code Multiple Access (SCMA)를 활용하여 복수의 MTC가 동일 프리앰블을 전송해도 RRC 연결 요청 단계에서 다른 코드 자원을 선택한다면 gNB가 해당 MTC를 구분할 수 있는 랜덤 액세스 기법을 제시하였다. 이 기법은 gNB가 동일 프리앰블을 전송한 MTC의 수를 알 수 없으므로 RRC 연결 요청을 위한 PUSCH 자원을 임의로 할당하기 때문에 PUSCH 자원이 예상보다 많이 할당되거나 부족할 수 있는 비효율적인 측면이 존재한다.

mMTC 환경에서 NOMA를 적용할 경우 한정된 PUSCH 자원 문제로 인해 PUSCH 자원 당 중첩되는 MTC의 수가 매우 클 것으로 예상된다. 이로 인해 gNB에서 수신 신호를 디코딩 할 때 간섭의 크기가 증가한다는 문제가 존재한다. 이런 문제를 해결하기 위해 massive MIMO 시스템의 channel hardening과 favorable propagation 특성을 기반으로 Successive Interference Cancellation (SIC)를 수행하는 Semi-Orthogonal Multiple Access (SOMA) 기법이 제시되었다^[7]. SOMA는 각 MTC가 전송하는 프리앰블 간에 직교성을 유지하면 동일 프리앰블을 사용하여 데이터가 동시에 전송되어도 디코딩할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 mMTC 환경에서 한정된 프리앰블과 PUSCH 자원을 모두 고려하여 랜덤 액세스에 성공하는 MTC의 수를 효과적으로 증가시키는 Semi-Orthogonal Random Access (SORA) 기법을 제시한다. SORA 기법에서는 massive MIMO 시스템의 channel hardening과 favorable propagation 특성을 이용하여 gNB가 동일 프리앰블을 전송한 MTC의 수와 해당 MTC의 타이밍 오프셋을 추정하고, 복수의 MTC가 동일 Resource Block (RB)에 SOMA 방식으로 RRC 연결 요청을 전송할 수 있도록 스케줄링해줌으로써 MTC의 접속 성공률을 높인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 SORA 기법에 대해 자세히 기술한다. 제3장에서는 시뮬레이션을 통해 SORA 기법의 성능을 분석하며 마지막으로 제4장에서 결론을 내린다.

본 논문에서는 다음의 표기법을 따른다. 행렬과 벡터는 볼드체로 표기한다. \mathbf{X}^H 는 행렬 \mathbf{X} 의 hermitian matrix를 의미하며 \mathbf{X}^T 는 행렬 \mathbf{X} 의 transpose matrix를 의미한다. \mathbf{I}_M 과 $\mathbf{0}_M$ 은 각각 차수가 M 인 단위행렬과 영행렬이다. \mathbb{C} 는 복소수 공간이다. $CN(a, b)$ 는 평균이 a 이고 분산이 b 인 complex normal distribution 이고 $a_n \asymp b_n$ 은 $a_n - b_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$ 을 의미한다. $\lceil X \rceil$ 는 X 의 ceiling function이고 $\angle X$ 는 X 의 편각을 의미한다.

II. SORA: Semi-Orthogonal Random Access

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 단일 셀 환경에서 M 개의 안테나를 가지고 있는 gNB와 단일 안테나를 가진 K 대의

MTC가 존재하는 massive MIMO 시스템을 고려한다. 전체 시간은 동일 시간 구간인 타임 슬롯들로 구성되며 MTC가 랜덤 액세스를 주기적으로 시도할 수 있는 타임 슬롯들은 정해져 있다고 가정한다. 본 논문에서는 mMTC 환경과 같이 한 타임 슬롯에서 많은 수의 위치가 고정된 MTC가 랜덤 액세스를 동시에 시도하는 상황을 고려한다. 따라서 각 MTC와 gNB사이의 전달 지연은 일정하며, 각 MTC는 최초의 랜덤 액세스 성공 경험으로 자신의 Timing Advance (TA)를 안다고 가정한다.

MTC k 와 gNB 사이의 채널을 \mathbf{h}_k 로 정의하며 $\mathbf{h}_k \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$ 는 correlated Rayleigh fading 채널로 가정하고^[8] 다음과 같다.

$$\mathbf{h}_k = [h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{kM}]^T \in \mathbb{C}^M. \quad (1)$$

이 때 h_{ki} 는 MTC k 와 gNB의 i 번째 안테나 사이의 채널이다.

랜덤 액세스 시 프리앰블 전송에 사용되는 랜덤 액세스 블록은 Q 개의 심볼들과 N 개의 서브캐리어들로 구성되어 있다. 프리앰블은 p 개의 서로 직교하는 프리앰블 시퀀스의 집합 $\Psi = \{\psi_1, \dots, \psi_p\}$ 로 구성되고 각 프리앰블 $\psi_1, \dots, \psi_p \in \mathbb{C}^p$ 는 다음을 만족한다.

$$\psi_i^H \psi_j = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 SORA 절차

본 논문에서 제시한 SORA 기법은 그림 1에서와 같이 동작하고 각 단계별 자세한 절차에 대해 아래에서 설명한다.

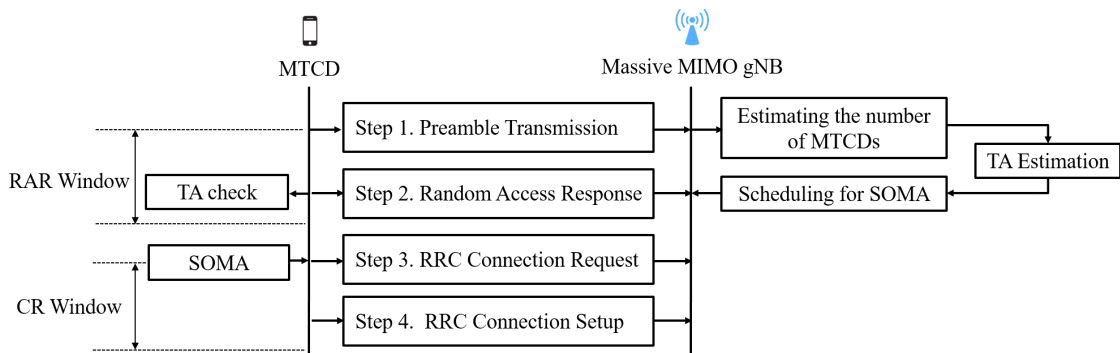


그림 1. SORA 절차
Fig. 1. SORA procedure

2.2.1 프리앰블 전송

각 MTCD는 프리앰블 시퀀스 집합 Ψ 에서 하나의 프리앰블 시퀀스를 임의로 선택하여 gNB로 전송한다. gNB에서 프리앰블을 수신할 때 발생하는 타이밍 오프셋은 gNB와 MTCD사이의 거리에 영향을 받으며, 타이밍 오프셋은 수신 신호의 Discrete Fourier Transform (DFT) 신호에서 phase shift에 대응된다. 이 때 n 번째 서브캐리어를 통해 gNB의 m 번째 안테나에서 수신한 신호를 DFT한 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_m(n) = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} h_{km} e^{-j \frac{2\pi}{N_{FFT}}(n-1)\theta_k} \boldsymbol{\psi}_{u_k} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_m(n). \quad (3)$$

여기에서 $\boldsymbol{\omega}_m(n) \sim CN(\mathbf{0}_p, \sigma^2 \mathbf{I}_p)$ 은 수신단에서의 잡음, $p_k > 0$ 는 MTCD k 의 프리앰블 전송 파워, N_{FFT} 는 Fast Fourier Transform (FFT) 사이즈, θ_k 는 MTCD k 의 타이밍 오프셋, $u_k \in \{1, 2, \dots, p\}$ 는 MTCD k 가 전송한 프리앰블의 인덱스를 의미한다.

① MTCD의 수 추정

여기에서는 하나의 프리앰블 $\boldsymbol{\psi}_i$ 를 기준으로 검출 과정을 설명한다. 프리앰블 상호간에 직교한 성질을 이용하기 위해 다음과 같이 $\boldsymbol{\xi}_{im}(n)$ 을 정의한다.

$$\boldsymbol{\xi}_{im}(n) = \boldsymbol{\psi}_i^H \mathbf{z}_m(n). \quad (4)$$

(2)에 의해 (4)는 다음과 같이 정리된다.

$$\boldsymbol{\xi}_{im}(n) = \sum_{i_i \in \mathbf{K}} \sqrt{p_{i_i}} h_{i_i m} e^{-j \frac{2\pi}{N_{FFT}}(n-1)\theta_{i_i}} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{im}(n). \quad (5)$$

위 식에서 $\mathbf{K}_i \subseteq \{1, \dots, K\}$ 는 프리앰블 $\boldsymbol{\psi}_i$ 를 선택한 MTCD의 집합이고, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{im}(n) = \boldsymbol{\psi}_i^H \boldsymbol{\omega}_m(n)$ 이다. (5)를 모든 서브캐리어에 대해 확장한 신호를 $\boldsymbol{\xi}_{im} \in \mathbb{C}^N$ 이라 정의하고 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\xi}_{im} = \sum_{i_i \in \mathbf{K}} \sqrt{p_{i_i}} h_{i_i m} \mathbf{a}(\theta_{i_i}) + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{im}. \quad (6)$$

이 때 $\mathbf{a}(\theta_{i_i}) = [1, \dots, e^{-j \frac{2\pi}{N_{FFT}}(n-1)\theta_{i_i}}]^T \in \mathbb{C}^N$ 이다.

gNB는 Minimum Description Length (MDL) 기법⁹⁾을 사용하여 프리앰블 $\boldsymbol{\psi}_i$ 를 전송한 MTCD의 수를 추정하며 앞서 구한 $\boldsymbol{\xi}_{im}$ 을 통해 다음과 같은 샘플 상관행렬 $\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\xi}_i} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 를 이용한다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\xi}_i} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \boldsymbol{\xi}_{im} \boldsymbol{\xi}_{im}^H. \quad (7)$$

$\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\xi}_i}$ 에 대하여 고유값 분해를 해주면 N 개의 고유값을 얻을 수 있으며 각 고유값에 대하여 $\hat{\lambda}_{i,1} \geq \hat{\lambda}_{i,2} \geq \dots \geq \hat{\lambda}_{i,N}$ 라고 가정한다. 프리앰블 $\boldsymbol{\psi}_i$ 를 선택한 MTCD의 수의 추정값을 \hat{k}_i 이라고 정의하며 MDL 기법 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다⁹⁾.

$$\hat{k}_i = \arg \min_{\alpha} \left(\frac{1}{2} \alpha (2N - \alpha) \log M \right). \quad (8)$$

위 식에서 ϵ 은 $\frac{\left(\prod_{n=\alpha+1}^N \hat{\lambda}_n^{\frac{1}{N-\alpha}} \right)}{\frac{1}{N-\alpha} \sum_{n=\alpha+1}^N \hat{\lambda}_n}$ 이다.

② 타이밍 오프셋 추정

gNB는 MDL 기법을 통해 추정된 \hat{k}_i 대의 MTCD에 대하여 Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) 기법¹⁰⁾으로 타이밍 오프셋 $\{\theta_{i_l} : l = 1, \dots, \hat{k}_i\}$ 을 추정한다. 이 때 $\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\xi}_i}$ 의 고유값 중에서 크기 내림차순으로 \hat{k}_i 개의 고유값에 대응되는 고유벡터를 열벡터로 하는 행렬 $\mathbf{L}_i = [\mathbf{l}_{i,1}, \dots, \mathbf{l}_{i,\hat{k}_i}] \in \mathbb{C}^{N \times \hat{k}_i}$ 를 정의한다. 또한 \mathbf{L}_{i_1} 은 \mathbf{L}_i 의 첫 번째 행부터 $N-1$ 번째 행을 모은 서브행렬이고, \mathbf{L}_{i_2} 는 \mathbf{L}_i 의 두 번째 행부터 N 번째 행을 모은 서브행렬이라 할 때 $\boldsymbol{\gamma}_i$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$\boldsymbol{\gamma}_i = \left(\mathbf{L}_{i_1}^H \mathbf{L}_{i_2} \right)^{(-1)} \mathbf{L}_{i_1}^H \mathbf{L}_{i_2}. \quad (9)$$

이 때 $\boldsymbol{\gamma}_i$ 의 고유값을 $\{\hat{\phi}_{i,1}, \dots, \hat{\phi}_{i,\hat{k}_i}\}$ 이라 한다. gNB는 ESPRIT 기법을 통해 다음과 같이 타이밍 오프셋 $\{\hat{\theta}_{i_l} : l = 1, \dots, \hat{k}_i\}$ 을 추정한다¹⁰⁾.

$$\hat{\theta}_{i,l} = \frac{N_{FFT}}{2\pi} \angle \Phi_{i,l} \quad l = 1, \dots, \hat{k}_i. \quad (10)$$

2.2.2 RAR 메시지 전송

gNB는 ψ_i 를 전송한 MTCD를 구분할 수 없으므로 해당 MTCD에 대해 모두 동일한 Random Access Response (RAR) 메시지를 전송한다. gNB는 프리앰블 ψ_i 를 전송한 MTCD의 타이밍 오프셋 $\{\theta_i : l = 1, \dots, \hat{k}_i\}$ 이 각각 다른 값을 가질 확률이 높다는 점을 이용해 ESPRIT 기법을 통해 구한 타이밍 오프셋과 스케줄링 정보를 매칭시켜 MTCD가 RAR 메시지에 담긴 자신의 정보를 구분하도록 한다.

RAR 메시지에 보낼 수 있는 MTCD의 수를 R 이라 하고 SOMA 기법을 적용할 때 하나의 RB 내에 최대 중첩할 수 있는 MTCD의 수를 β 라 정의하자. \hat{k}_i 가 β 보다 크면 $\{\theta_i : l = 1, \dots, \hat{k}_i\}$ 중 β 대의 MTCD의 정보를 임의로 선택하여 RAR 메시지에 포함시킨 후 RAR 메시지를 MTCD에게 전송한다. 만약 \hat{k}_i 가 β 보다 작거나 같은 경우에는 추정된 \hat{k}_i 대의 MTCD의 할당된 자원 정보를 RAR 메시지에 포함시켜 전송한다. 따라서 RAR 메시지에 보낼 수 있는 MTCD의 수인 R 은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$R = \begin{cases} \beta, & \text{if } \hat{k}_i > \beta, \\ \hat{k}_i, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

제시한 RAR 메시지 포맷은 그림 2와 같고 RAR 메시지에 포함되는 정보는 다음과 같다.

- Backoff Indicator (BI): MTCD가 랜덤 액세스에 실패할 때 백오프 지시자이다.
- Random Access Preamble Identifier (RAPID): 프리앰블 식별자이다.
- Timing Advance (TA): 추정된 타이밍 오프셋 $\{\hat{\theta}_i : l = 1, \dots, \hat{k}_i\}$ 을 아래와 같이 상향링크 신호

	BI	RAPID	Modulation Coding Scheme	
MTCD 1		TA	T-CRNTI	Resource Allocation
MTCD 2		TA	T-CRNTI	Resource Allocation
	
MTCD R		TA	T-CRNTI	Resource Allocation

그림 2. SORA의 RAR 메시지 형식
Fig. 2. SORA's RAR message format

호 전송 타이밍에 해당하는 TA index인 $\tau_{i,l}$ 로 변환하여 MTCD에게 전송한다^[11].

$$\tau_{i,l} = \left\lceil \frac{d}{\Delta_{TA}} \right\rceil. \quad (12)$$

이 때 d 는 $\frac{cT_s\hat{\theta}_{i,l}}{2}$ 이며 c 는 빛의 속도, Δ_{TA} 는 TA index 구간의 거리, T_s 는 샘플링 주기이다.

- Temporary Cell Radio Network Temporary Identifier (T-CRNTI): MTCD의 임시 식별자이다.
- Modulation Coding Scheme: 변조 차수와 코드 레이트를 지시한다.
- Resource Allocation: MTCD가 RRC 연결 요청을 할 때 사용하는 PUSCH 자원 정보를 나타낸다.

2.2.3 RRC 연결 요청 전송

① TA check

RAR 메시지를 수신한 MTCD가 자신의 RAPID와 TA가 RAR 메시지에 포함되어 있는지 확인하는 과정이다. 자신의 RAPID와 TA가 RAR 메시지에 포함됐으면 TA check를 통과했다고 하며 포함되지 않으면 TA check를 실패했다고 한다. TA check에 실패한 MTCD는 랜덤 액세스를 실패했다고 판단하여 랜덤 백오프한 후 다시 프리앰블 전송부터 시작한다.

② SOMA 전송

TA check를 통과한 MTCD는 할당받은 PUSCH의 자원 정보를 확인 후 프리앰블 시퀀스와 데이터를 gNB로 전송한다. 이 때 각 MTCD는 프리앰블 전송에서 사용한 프리앰블 ψ_i 와 동일한 시퀀스를 사용하여 gNB의 RRC 연결 요청 메시지 디코딩 계산량을 줄인다. 각 MTCD는 프리앰블 ψ_i 와 T-CRNTI 16 bits^[12]를 시간-주파수 자원을 공유하여 데이터를 동시에 전송하는 기법인 SOMA 방식으로 전송한다.

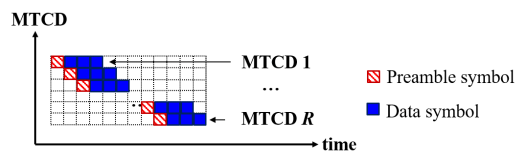


그림 3. SOMA
Fig. 3. SOMA

SOMA는 그림 3에서와 같이 임의의 심볼에 대하여 각 MTCD가 전송하는 프리앰블 간의 직교성을 유지하면서 데이터는 비직교적으로 중첩하여 전송하는 방법으로 gNB는 massive MIMO 시스템의 특성인 channel hardening과 favorable propagation을 이용해 전송된 RRC 연결 요청 메시지를 심볼 단위로 SIC를 수행하며 표 1에 세부절차를 제시한다⁷⁾.

gNB가 i 번째 심볼에 대해 수신한 신호를 \mathbf{y}_i 라 하고 $\mathbf{x}_{d_{j,i}}$ 는 j 번째 MTCD가 i 번째 심볼에 보내는 데이터 심볼이라 하자. 이 때 MTCD 1대가 전송하는 프리앰블의 심볼 수는 1개이며¹³⁾, 데이터 심볼 수를 D 라 하자. gNB와 MTCD j 사이의 채널은 $M \times 1$ 벡터인 \mathbf{g}_j 로 정의되며 correlated Rayleigh fading 채널이므로 channel hardening과 favorable propagation을 만족한다¹⁴⁾. 그림 3에서와 같이 1번째 MTCD의 프리앰블이 전송되며 gNB는 Minimum Mean Square Error (MMSE) 방식으로 1번째 MTCD의 채널을 추정한다.

표 1. SOMA 디코딩 알고리즘
Table 1. SOMA decoding algorithm

```

1: for  $i = 1, \dots, R+D$  do
2:   if  $i = 1$  then
3:     Estimate  $\hat{\mathbf{g}}_1$  from  $\mathbf{y}_1$  using the MMSE
4:   else if  $2 \leq i \leq R$  then
5:     if  $i = 2, \dots, R$  then
6:       for  $j = 1, \dots, i-1$  do
7:          $\mathbf{x}_{d_{j,i}} \leftarrow \frac{\hat{\mathbf{g}}_j \mathbf{y}_i}{M}$ 
8:          $\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{g}}_j \mathbf{x}_{d_{j,i}}^H$ 
9:          $\mathbf{y}_i = \hat{\mathbf{y}}_i$ 
10:      end for
11:      Estimate  $\hat{\mathbf{g}}_i$  from  $\mathbf{y}_i$  using the MMSE
12:    end if
13:   else
14:     if  $i = R+1, \dots, R+D$  then
15:       for  $j = 1, \dots, R$  do
16:          $\mathbf{x}_{d_{j,i}} \leftarrow \frac{\hat{\mathbf{g}}_j \mathbf{y}_i}{M}$ 
17:          $\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{g}}_j \mathbf{x}_{d_{j,i}}^H$ 
18:          $\mathbf{y}_i = \hat{\mathbf{y}}_i$ 
19:       end for
20:     end if
21:   end if
22: end for
    
```

R 번째 심볼까지는 각 MTCD의 프리앰블이 전송되므로 $2 \leq i \leq R$ 인 임의의 i 번째 심볼에서는 i 번째 MTCD의 프리앰블과 이전 MTCD들의 데이터가 전송된다. 표 1의 7번째 줄과 같이 \mathbf{y}_i 에 대해 $\hat{\mathbf{g}}_j$ 의 correlation을 취한 후 channel hardening과 favorable propagation을 이용해 $\mathbf{x}_{d_{j,i}}$ 를 검출한다. 그리고 표 1의 8번째 줄과 같이 \mathbf{y}_i 에서 $\hat{\mathbf{g}}_j \mathbf{x}_{d_{j,i}}^H$ 를 빼준 후 이 신호를 이용하여 다시 앞서 추정된 다른 MTCD의 채널로 데이터 검출하며 \mathbf{y}_i 에서 빼주는 SIC 과정을 반복한다. $i-1$ 번째 MTCD까지 데이터 검출을 끝마친 후 표 1의 11번째 줄과 같이 \mathbf{y}_i 에서 $\hat{\mathbf{g}}_i$ 을 MMSE 방식으로 추정한다. $R+1 \leq i \leq R+D$ 인 i 번째 심볼에서는 표 1의 16번째 줄과 같이 \mathbf{y}_i 에 대해 앞서 구한 각 MTCD들의 $\hat{\mathbf{g}}_j$ 의 correlation을 취하여 $\mathbf{x}_{d_{j,i}}$ 를 검출하고 \mathbf{y}_i 에서 검출된 정보를 빼주는 SIC과정을 $R+D$ 번째 심볼까지 반복한다.

2.2.4 RRC 연결 셋업 전송

gNB가 RRC 연결 요청 메시지의 디코딩에 성공하면 RRC 연결 셋업 메시지를 해당 MTCD에게 전송한다. 이 때 gNB로부터 RRC 연결 요청 셋업 메시지 전송을 기다리는 시간인 Contention Resolution (CR) 윈도우 내에서 RRC 연결 셋업 메시지를 수신하지 못한 MTCD는 랜덤 액세스 시도에 실패한 것으로 간주하여 랜덤 백오프한 후 프리앰블 전송 단계부터 랜덤 액세스를 다시 한다.

III. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경

셀의 inter site distance는 500m 이고, MTCD는 셀 내에 임의의 고정된 위치에 균일하게 분포되어 있는 상황을 가정하였다. 또한 urban micro 시나리오로 각 MTCD는 gNB와의 최소거리가 20m 이고 랜덤 액세스를 하는 한 타임 슬롯에 동시에 랜덤 액세스를 시도하는 MTCD의 수가 많아 경쟁이 높은 mMTC 환경이며 TA index 구간의 거리는 Δ_{TA} 로 2.9m 이다. 프리앰블은 Walsh-Hadamard 코드북을 사용하며¹⁵⁾ 프리앰블 수수는 12개다¹⁶⁾. 채널은 손실 계수가 3.8인 uncorrelated Rayleigh fading 채널을 고려한다. 이 때 gNB가 RRC 연결 요청 메시지를 디코딩 에러가 발생했는지 판단하기 위한 기준으로 Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) threshold인 η

가 주어진다고 하자. MTCD의 각 심볼별 SINR 중 최솟값이 η 이상이면 gNB는 RRC 연결 요청 메시지가 디코딩에 성공하고 η 미만이면 디코딩 에러가 발생한다고 판단하며 η 는 -8dB ^[17]이다. 그 외의 시뮬레이션 파라미터는 표 2에 나타내었으며 1000번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 랜덤 액세스 성공 확률 P_s 를 확인한다.

SORA에 대한 비교 기법으로 SUCRe 기법^[3], 5G NR에서의 랜덤 액세스^[18] 그리고 RRC 연결 요청을 각 MTCD의 프리앰블과 데이터를 동시에 비직교적으로 중첩하여 전송하는 Non Orthogonal Random Access (NORA)와 각 MTCD가 RB를 겹치지 않게 할당받는 Orthogonal Random Access (ORA)를 고려한다. 이 때 NORA는 같은 심볼에 여러 MTCD의 프리앰블이 중첩되어 전송되므로 2대 이상의 MTCD가 동일 프리앰블을 전송하면 gNB에서 각 MTCD의 신호를 구별하지 못한다. 따라서 NORA에서는 TA

check를 통과한 각 MTCD가 Ψ 에서 프리앰블을 다시 선택한다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 4에서는 랜덤 액세스를 시도하는 MTCD의 수 K 가 50대일 때 gNB의 안테나 수 M 에 따른 랜덤 액세스 성공확률 P_s 를 나타낸다. gNB의 안테나 수 M 이 증가할수록 MDL 기법과 ESPRIT 기법의 정확도가 높아지고 오차는 줄어들게 되어 P_s 가 향상되는 것을 확인할 수 있다. NORA는 RRC 연결 요청에서 동일 프리앰블을 전송한 MTCD의 수가 많을 가능성이 크기 때문에 SORA의 P_s 에 비해 낮다. ORA와 SUCRe 기법은 RRC 연결 요청에서 1대의 MTCD만 프리앰블을 전송하므로 위의 기법들보다 P_s 가 낮은 것을 볼 수 있다. 또한 프리앰블의 수보다 MTCD의 수가 많은 mMTC 환경이므로 프리앰블 전송에서 프리앰블을 오직 1대의 MTCD만 선택해야 하는 NR에서는 대부분의 MTCD가 충돌을 겪게 되어 P_s 가 거의 0에 가깝다.

그림 5에서는 gNB의 안테나 수 M 이 200개일 때 랜덤 액세스를 시도하는 MTCD의 수 K 에 따른 랜덤 액세스 성공 확률 P_s 를 나타낸다. K 가 증가하면 동일한 프리앰블을 선택하는 MTCD의 수가 증가하게 되므로 모든 기법들의 P_s 가 전체적으로 감소한다. NORA는 K 가 증가할수록 한 RB 내에 중첩될 수 있는 MTCD의 수가 SORA보다 많아지게 된다. 이로 인해 gNB에서 수신 신호를 디코딩 할 때 간섭의 크기가 증가하게 되어 SORA보다 P_s 가 낮다. RRC 연결 요청에서 복수의 MTCD가 전송되는 위 기법들과 달리

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Component	Value
Scenario	Urban micro
Network layout	Hexagonal single cell
Inter Site Distance	500m
FFT size N_{FFT}	4096
TA section distance Δ_{TA}	2.9m
Number of symbols Q	14
Number of subcarriers N	12
Minimum distance between each MTCD and gNB	20m
Number of preambles	12
Preamble codebook	Walsh-Hadamard
Preamble transmission power	20dBm
Fading model	uncorrelated Rayleigh fading
Path loss factor	3.8
Speed of light	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
SINR threshold η	-8dB

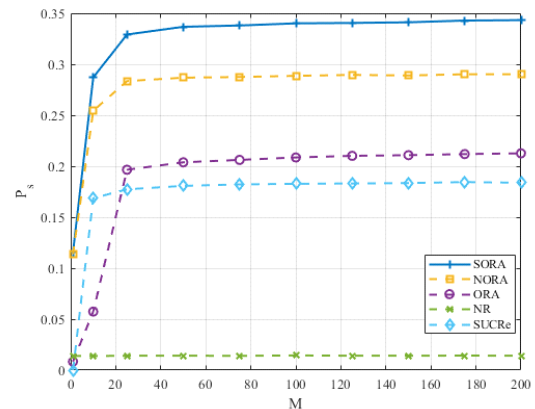


그림 4. gNB의 안테나 수 변화에 따른 랜덤 액세스 성공확률
Fig. 4. Random access success probability according to the number of gNB antennas

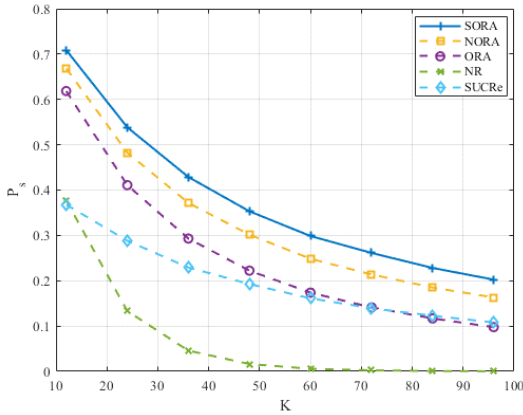


그림 5. MTCD의 수 변화에 따른 랜덤 액세스 성공 확률
Fig. 5. Random access success probability according to the number of MTCDs

ORA와 SUCRe 기법은 1대의 MTCD만 전송하므로 P_s 가 위의 기법들보다 낮다. NR은 프리앰블 전송에서부터 프리앰블을 오직 1대의 MTCD만 선택해야하므로 다른 기법들에 비해 K 가 증가함에 따라 P_s 가 빠르게 감소하는 모습을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 mMTC 환경에서 한정적인 프리앰블과 PUSCH 자원을 고려하면서 랜덤 액세스의 성공 확률을 향상시켜주는 SORA 기법을 제시하였다. SORA 기법에서는 massive MIMO 특성을 이용해 동일 프리앰블을 전송한 MTCD를 SOMA 방식으로 RRC 연결 요청을 할 수 있게 해줄 수 있도록 스케줄링하여 MTCD의 랜덤 액세스 성공 확률을 향상시켰다. 시뮬레이션을 통해 SORA 기법이 다른 기법들보다 랜덤 액세스 성공 확률이 높은 것을 보였으며 MTCD의 수가 많은 mMTC 환경에서 적합한 기법임을 확인할 수 있었다.

References

[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, Sep. 2019.
 [2] S. Moon and J. W. Lee, "Integrated grant-free scheme for URLLC and mMTC," in *Proc. 5GWF*, pp. 98-102, Sep. 2020.

[3] E. Björnson, E. de Carvalho, J. H. Sørensen, E. G. Larsson, and P. Popovski, "A random access protocol for pilot allocation in crowded massive MIMO systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 4, pp. 2220-2234, Mar. 2017.
 [4] S.-S. Yoo, S.-H. Lee, J. Shin, S.-M. Oh, and J.-H. Kim, "Performance evaluation of LTE-A random access procedure for IoT service," *J. KICS*, vol. 41, no. 8, pp. 965-973, Aug. 2016.
 [5] Y. Liang, X. Li, J. Zhang, and Z. Ding, "Non-orthogonal random access for 5G networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4817-4831, May 2017.
 [6] S. Moon, H. Lee, and J. Lee, "SARA: Sparse code multiple access-applied random access for IoT devices," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 4, pp. 3160-3174, May 2018.
 [7] A. Kabiri, M. J. Emadi and M. N. Khormuji, "On the performance of the SOMA-massive MIMO system with multi-user detection," in *Proc. CAMAD*, pp. 1-5, Jun. 2017.
 [8] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency," *Found. Trends Signal Process.*, vol. 11, no. 3-4, pp. 154-655, Nov. 2017.
 [9] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 33, no. 2, pp. 387-392, Apr. 1985.
 [10] R. Roy, A. Paulraj, and T. Kailath, "Direction-of-arrival estimation by subspace rotation methods - ESPRIT," in *Proc. ICASSP*, vol. 11, pp. 2495-2498, Apr. 1986.
 [11] L. Sanguinetti, A. A. D'Amico, M. Morelli, and M. Debbah, "Random access in massive MIMO by exploiting timing offsets and excess antennas," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 6081-6095, Jul. 2018.
 [12] 3GPP, *NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification*, TS 38.321 V16.0.0, Mar. 2020.
 [13] J. Campos, "Understanding 5G NR physical layer," *Keysight Technologies release*, 2017.

- [14] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Aspects of favorable propagation in Massive MIMO," in *Proc. EUSIPCO*, pp. 76-80, Sep. 2014.
- [15] A. A. D'Amico, M. Morelli, and L. Sanguinetti, "DOA estimation in the uplink of multicarrier CDMA systems," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2008, no. 2, pp. 1-9, Jan. 2008.
- [16] G. Suchitra and M. L. Valarmathi, "BER performance of walsh hadamard like codes based on complementary sequence sets in a CDMA and cognitive underlay system," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 71, no. 2, pp. 1311-1329, Jul. 2013.
- [17] 3GPP, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*, TS 36.104 V16.7.0, Sep. 2020.
- [18] J. S. Erik Dahlman and Stefan Parkvall, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, USA: Academic press, Aug. 2018.

김 도 우 (Dowu Kim)



2019년 2월 : 경희대학교 사회
기반시스템공학과, 전자공학
과 학사
2021년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 석사
<관심분야> 전자공학, 통신공
학, 이동통신표준

[ORCID:0000-0002-6780-5263]

문 석 재 (Seokjae Moon)



2012년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학부 학사
2016년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 석사
2016년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학부 박사과정

<관심분야> 통신망 자원 할당, 통신망 최적화
[ORCID:0000-0001-7111-3801]

이 장 원 (Jang-Won Lee)



1994년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 학사
1996년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과 석사
2004년 8월 : Dept. of ECE
Purdue University 박사
2004년 9월~2005년 8월: Dept.

of EE Princeton University 박사 후 연구원
2005년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 조교
수/부교수/교수
<관심분야> 통신망 자원 할당, 통신망 최적화, 통신
망 성능 분석
[ORCID:0000-0002-5627-5914]