

5G URLLC를 위한 다중 프리앰블 기반의 임의 접속 기법에 관한 연구: 계층 교차적 접근법

김 태 훈*, 방 인 규^o

A Study on Multi-Preamble Based Random Access for 5G URLLC: Cross-Layer Approach

Taehoon Kim*, Inkyu Bang^o

요 약

본 논문에서는 5세대 이동통신망에서 고신뢰·저지연 통신을 지원하기 위해 다중 프리앰블 기반의 임의 접속 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 임의 접속을 수행할 때 서로 다른 복수개의 프리앰블을 동시에 전송하는 것을 허용함으로써, 프리앰블의 생존성을 높이는 것을 대표적인 특징으로 한다. 이 경우, 동시에 전송한 복수개의 프리앰블 중 충돌을 겪지 않은 프리앰블이 하나만 존재하더라도 임의 접속은 성공하게 된다. 다만, 각 단말의 전송 전력에 제약이 있는 상황에서 복수개의 프리앰블을 전송하는 경우에 각 프리앰블의 전송 전력이 충분하지 않을 수 있다. 이 경우, 전송한 각 프리앰블의 검출 성능이 저하될 수 있기 때문에 계층 교차적인 접근법을 이용하여 철저한 검토가 필요하다. 제안 기법을 임의 접속 성공확률 관점에서 분석을 하고, 모의실험을 통하여 제안 기법의 우수성을 증명한다. 제안 기법을 이용하는 단말은 접속 지연을 줄이며 임의 접속 성공 확률을 높일 수 있다.

키워드 : 5G, URLLC, 임의 접속, 다중 프리앰블, 성공 확률

Key Words : 5G, URLLC, Random Access, Multi-Preamble, Success Probability

ABSTRACT

In this paper, we investigate multi-preamble based random access (RA) technique for the 5th generation (5G) ultra-reliable and low-latency (URLLC) scenario. A key feature of the multi-preamble based RA technique is to enable each of terminals to simultaneously transmit a number of preambles at a given RA opportunity, which is effective to improve the survivability of each of preambles. In this case, the RA procedure can be succeed when at least an RA preamble among multiple RA preambles exists which does not experience any preamble collision. However, due to the transmit power budget, the preamble detection performance may be degraded, and, thus, we have to thoroughly analyze and evaluate the performance of the multi-preamble based RA technique from the perspective of cross-layer. We analyze our proposed technique in terms of the RA success probability and perform extensive simulations to verify the superiority of our proposed technique. We verify that our proposed technique is effective to improve the RA success probability while improving the latency performance.

* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1G1A1101176).

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1F1A1069934).

※ 이 논문의 일부는 한국통신학회 2020년도 하계종합학술발표회('20.08.12.~'20.08.14.)에서 발표되었습니다.

• First Author : Hanbat National University, Department of Computer Engineering, thkim@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

◦ Corresponding Author : Hanbat National University, Department of Information and Communication Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202008-183-A-RN, Received August 4, 2020; Revised October 22, 2020; Accepted December 1, 2020

I. 서 론

초연결·초지능으로 대표되는 4차 산업혁명을 성공으로 견인하기 위해 인공지능, 빅데이터, 클라우드, 5G 이동통신망, 사물인터넷 등의 다양한 핵심 기술들의 융합이 필수적이다. 그 중, 5세대 (5th Generation) 이동통신망은 enhanced mobile broadband (eMBB), ultra-reliable and low-latency communications (URLLC), massive machine-type communications (mMTC)의 다양한 서비스 시나리오를 지원할 수 있는 유연한(flexible) 통신 시스템이다. 위의 시나리오들은 각각 높은 전송률로 데이터를 주고받을 수 있으며, 고신뢰·저지연을 보장하는 통신을 수행할 수 있고, 단위 면적당 수백만 대 이상의 사물인터넷 단말의 통신을 지원할 수 있다는 것을 의미한다. 특히, 자율주행, 원격 진료 등과 같은 미션 크리티컬 응용 분야는 엄격한(stringent) 지연 시간을 요구하기 때문에 고신뢰·저지연 통신의 중요성이 더 강조되는 시나리오이다.

이동통신망에서는 기지국이 기지국 내의 모든 통신을 관할한다. 그로 인해, 사용자 단말뿐만 아니라 사물인터넷용 사물 단말은 기지국과 상향링크·하향링크 통신을 수행하기 위해, 기지국과 연결을 맺고 타이밍을 동기화할 필요가 있다. 이를 위해 각 단말은 반드시 임의 접속(random access; RA) 절차를 수행해야 한다^[1]. 5세대 이동통신망의 임의 접속 절차는 다양한 Numerology를 제공하는 것을 제외하면 대부분 4세대 이동통신망의 임의 접속 절차와 유사하다^[2]. Multi-channel slotted ALOHA 프로토콜의 변형된 형태의 4단계의 절차로 구성되어 있으며, 1단계에서 전송하는 프리앰블을 이용한 경쟁 후 자원을 선점하는 프로토콜이다.

각 단말은 주어진 프리앰블 집합에서 1개의 프리앰블 신호를 임의로 선택하여 임의접속 채널에 전송하는 것으로써 임의 접속 절차를 시작하게 된다. 두 개 이상의 단말이 동일한 프리앰블을 선택하여 전송할 때 충돌(collision) 문제가 발생하며, 해당 단말들은 임의 접속을 실패하게 된다. 충돌을 겪은 단말들은 임의 접속을 성공할 때 까지 재시도(retrial)하게 되며, 이 과정에서 접속 지연(latency)이 발생하게 된다.

이러한 경쟁(contention) 기반의 임의 접속 기법의 근본적인 문제점을 해결하기 위해 수년간 다양한 연구가 진행되어 왔다. [3]에서는 프리앰블 자원의 재사용을 통하여 자원의 양을 논리적으로 증대시켜 충돌 확률을 줄였으며, [4, 5]에서는 상향링크 참조 신호(reference signal)를 활용하여 경쟁 공간(contending

space)을 확대시켜 충돌 확률을 감소시켰다. [6]에서는 연속 간섭 제거(successive interference cancellation; SIC) 기반의 프리앰블 검출기를 활용하여 비직교(non-orthogonal) 프리앰블 구조를 도입하였고, 그 결과 무선 자원의 양을 물리적으로 증가시켜 충돌 확률을 획기적으로 줄일 수 있었다.

또한, 두 개의 프리앰블(dual preamble)을 이용하여 임의 접속을 시도하는 연구가 진행된 바 있으며^[7], 두 개 이상의 프리앰블 전송을 허용하는 다중 프리앰블(multi-preamble) 기반의 일반적인 프레임워크가 제안된 바 있다^[8]. 다만, 위의 연구들은 철저히 매체 접근 제어(media access control; MAC) 관점에서 성능 분석 및 평가가 진행되었다.

동시에 전송할 수 있는 프리앰블 수의 제약이 완화됨에 따라, 복수개의 프리앰블을 전송할 수 있게 된다. 각 단말이 이용할 수 있는 순간 전송 전력이 주어진 상황에서, 복수개의 프리앰블을 동시에 전송하게 될 경우 각 프리앰블에 실리는 전송 전력은 줄어들 수밖에 없고 각 프리앰블의 검출 성능이 열화될 수밖에 없다. 다중 프리앰블 기반의 프레임워크를 성공적으로 활용하기 위해서는, 계층 교차적인 관점에서 철저한 성능 평가가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 다중 프리앰블 기반의 임의 접속 기법을 계층 교차적 관점에서 분석을 하고, Matlab 기반의 모의실험을 통하여 제안 기법의 우수성을 증명한다.

본 논문은 총 6장으로 구성되어 있으며, 세부적인 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 고려하고 있는 시스템 모델에 대하여 설명하고, III장에서는 제안하는 임의 접속 기법의 특징 및 절차에 대하여 상세하게 설명한다. IV장에서는 제안 기법을 수학적으로 분석하며, V장에서는 모의실험 결과를 도시하며 결과를 해석한다. 마지막으로, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하고 있는 시스템 모델은 그림 1과 같다. 직교 주파수 분할 다중 접속 방식(OFDMA) 기반의 단일 셀 네트워크(예: 5G, LTE/LTE-A)를 고려한다. 셀 반경 내에는 다수개의 단말(사용자 단말 혹은 사물 단말)이 존재하며, 상향링크로 전송할 패킷을 가진 단말들을 활성화된(active) 단말이라 명명한다. 임의 접속 채널은 상향 링크의 무선 자원 중 일부이며 (i.e., 6개의 자원 블록쌍으로 구성), 주어진 시스템 파라미터에 따라 주기적으로 할당되어 있다 (예:

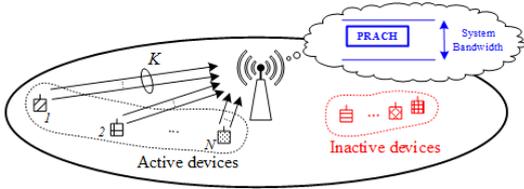


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System Model

$T_p=10\text{ms}$). 각 단말은 패킷이 발생한 후, 다음 이용 가능한(the next-available) 임의의 접속 채널을 이용하여 임의의 접속을 시도하게 된다. 본 연구에서는, 특정 임의의 접속 채널에서 발생하는 현상만을 관찰하며, 동일한 임의의 접속 채널을 이용하여 임의의 접속을 시도하고 있는 활성화된 단말의 수를 N 으로 표기한다. 즉, 주어진 프리앰블 자원을 이용하여 N 개의 단말이 서로 경쟁을 하고 있는 상황이다. N 개의 단말 중 일부는 이전의 임의의 접속 실패로 인하여 재시도를 하고 있는 단말일 수 있다.

현재 표준에 정의된 바에 의하면, 각 단말은 임의의 접속 1단계에서 M 개의 가능한 프리앰블 집합 중에서 1개의 프리앰블을 임의로 선택하여 1개의 단일 프리앰블을 전송하게 되어 있다 (e.g., LTE/LTE-A, 5G에서는 $M=64$). 본 연구에서는 동시에 전송할 수 있는 프리앰블의 수에 대한 제약을 완화시켜, 각 단말은 복수개의 프리앰블을 동시에 전송할 수 있다. 즉, 각 단말은 M 개의 가능한 프리앰블 집합 중에서 서로 다른 K 개의 프리앰블을 임의로 선택하여 동시에 전송함으로써 임의의 접속을 시작하게 된다.

각 단말은 방송용 신호의 수신 신호 세기를 이용하여 개방루프 전력 제어(Open-loop power control)를 한다고 가정한다. 각 단말은 송신할 때 전송 전력 P 를 이용한다고 가정하며, 그로 인해 K 개의 프리앰블을 동시에 전송하는 경우 각 프리앰블에 실리는 전송 전력은 P/K 가 된다. 각 단말이 송신한 신호는 Rayleigh Fading 채널을 겪는다고 가정하며, 채널 계수 h 는 $CN(0, \sigma_h^2)$ 를 따른다.

III. 다중 프리앰블 기반의 임의의 접속 기법

본 장에서는 다중 프리앰블 기반의 임의의 접속 기법의 주요 특징에 대해 서술하고, 해당 기법의 절차에 대해 상세히 설명한다. 또한, 임의의 접속 성공 확률에 대하여 수학적으로 분석한다.

3.1 주요 특징

종래의 임의의 접속에서는 1단계에서 1개의 단일 프리앰블만을 전송하게 되어있다^[1]. 그로 인해, 두 개 이상의 단말이 동일한 프리앰블을 선택하여 임의의 접속을 진행할 경우, 기지국은 해당 사실을 인지하지 못한 채 임의의 접속 응답(random access response; RAR)을 전송하게 된다. 각 단말들은 기지국이 전송한 임의의 접속 응답이 본인에게 전송한 메시지로 인지를 하게 되고, 응답 안의 상황링크 허가 정보(uplink grant; UG)에 따라 3단계 메시지를 전송하게 된다. 결과적으로 프리앰블 충돌을 겪은 단말들은 동일한 상황링크 자원을 이용해 3단계 메시지를 전송하기 때문에 여기서도 메시지 충돌이 발생하게 된다.

다중 프리앰블 기반의 임의의 접속에서는 1단계에서 동시에 전송할 수 있는 프리앰블 수의 제약을 완화하여 서로 다른 K 개의 프리앰블을 동시에 전송하는 것을 허용한다. K 개의 프리앰블을 동시에 전송하는 것은 K 개의 독립적인 임의의 접속을 동시에 수행하는 것과 같은 효과를 낸다. 다만, K 개의 프리앰블을 P 라는 동일한 전송 전력을 이용하여 전송해야하기 때문에 검출 성능의 열화가 있을 수 있다. 이러한 프리앰블 다이버시티(diversity) 효과 덕분에, K 개의 프리앰블이 모두 충돌을 겪을 때에만 임의의 접속 시도가 실패하게 되며, 그 이외의 경우에는 프리앰블이 성공적으로 검출되었다는 가정 하에 임의의 접속에 성공하게 된다.

3.2 임의접속 절차

그림 2는 다중 프리앰블 기반의 임의의 접속 기법의 순서도를 보여준다. 4개의 단계로 이루어져 있으며, 각 단계에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

- (1단계) **다중 프리앰블 전송 (Multi-preamble transmissions)** : 각 단말은 M 개의 프리앰블 집합에서 서로 다른 K 개의 프리앰블을 임의로 선택하여 임의의 접속 채널을 통해 기지국으로 전송한다. K 개의 프리앰블을 전송하기 위해 P 의 전송 전력을 이용할 수 있으며, 각 프리앰블은 P/K 의 전송 전력을 이용하여 전송하게 된다.
- (2단계) **임의의 접속 응답 (Random access response)** : 기지국은 임의의 접속 채널을 통해 수신한 신호를 이용하여 어떤 프리앰블이 수신되었는지 검출한다. 기지국은 프리앰블 검출 결과를 바탕으로 하여, 검출된 각 프리앰블에 대해 1개의 RAR을 전송하게 된다. 각 RAR에는 프리앰블 인덱스(preamble index), 시간 정렬(timing alignment; TA) 정보, 상황링크 허가 정보가 포함되어 있다.

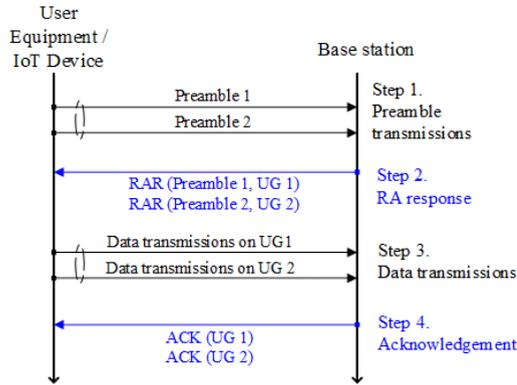


그림 2. 제안 기법의 임의 접속 절차
Fig. 2. Procedure of our proposed random access scheme

각 단말은 1단계에서 이용한 프리앰블 인덱스와 RAR에 들어있는 프리앰블 인덱스를 비교하며 자신의 RAR을 찾게 된다.

- **(3단계) 데이터 전송 (Data transmissions):** 각 단말은 수신한 RAR이 가리키고 있는 상향링크 자원을 이용하여 데이터 패킷을 전송한다. 여기서 데이터 패킷은 RRC Connection Request 메시지 혹은 Scheduling Request 메시지이다.
- **(4단계) 승인 (Acknowledgement):** 기지국은 수신한 데이터 패킷을 디코딩한다. 성공적으로 디코딩된 패킷에 대하여 승인 메시지를 전송한다. 승인 메시지를 수신한 단말은 임의 접속 절차를 성공적으로 종료하며, 그렇지 못한 단말은 백오프(backoff) 시행 후 다음의 임의 접속 채널에서 임의 접속 절차를 재시도 한다.

IV. 성능 분석

본 장에서는 다중 프리앰블 기반의 임의 접속 기법의 성능을 계층 교차적 관점에서 분석한다. 보다 자세히, PHY 계층 관점에서의 미검출(Mis-detection Probability), MAC계층 관점에서의 임의 접속 실패 확률(RA Failure Probability), 계층 교차적 관점에서의 임의 접속 성공 확률(RA Success Probability)를 수학적으로 구한다¹⁾. 시스템 모델에서 설명한 것과

1) 임의 접속 채널은 주기적으로 배치되어 있기 때문에, 임의 접속을 성공하는데 까지 걸리는 시도 횟수를 구하게 되면 소요되는 지연 시간을 도출해 낼 수 있다. 임의 접속에 성공하기 까지 필요한 임의 접속 시도 횟수는 임의 접속 성공 확률을 파라미터로 하는 기하분포를 따른다. 임의 접속 성공 확률과 접속 지연 시간은 반비례하는 관계를 갖는 것을 유추할 수 있다.

마찬가지로 M 개의 단말이 임의 접속을 시도하는 상황을 고려하였으며, 각 단말은 M 개의 프리앰블 중 서로 다른 K 개의 프리앰블을 선택하여 임의 접속을 시도하는 시나리오를 고려하였다. 특정 단말 d_o 관점에서 각 성능 지표를 도출하였다.

단말 d_o 가 전송한 K 개의 모든 프리앰블이 다른 단말에 의하여 사용되었을 때, 즉, 모든 프리앰블이 개별 프리앰블 충돌(individual preamble collision)을 겪을 때, 단말 d_o 는 해당 임의 접속에 실패하게 된다. 반대로, 전송한 K 개의 프리앰블 중 단말 d_o 가 홀로 사용한 프리앰블이 1개라도 존재할 경우에, 해당 프리앰블이 성공적으로 검출되었다는 전제하에 임의 접속에 성공할 수 있다.

계층 교차적 관점에서의 임의 접속 성공 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_s = (1 - p_f)(1 - p_{md}). \quad (1)$$

여기서, p_f 는 MAC계층 관점에서의 임의 접속 실패 확률을 나타내며, 동시에 전송한 K 개의 프리앰블이 모두 충돌을 겪을 때 임의 접속 시도에 실패하게 된다. 동시에 전송한 K 개의 프리앰블 중 k 개의 프리앰블이 충돌을 겪지 않는 경우의 수를 A_k 로 정의할 때, 전체 경우의 수 U 와 A_0 를 구해준다면 임의접속 실패 확률을 구할 수 있다.

또한, A_0 는 전체 경우의 수 $U = \binom{M}{K}^{N-1}$ 에서

$$\sum_{k=1}^K A_k = \sum_{k=1}^K \binom{M-k}{K}^{N-1} \binom{K}{k} (-1)^{k-1}$$

을 제외해주는

방식으로 구할 수 있으며, $\sum_{k=1}^K A_k$ 는 포함배제의 원리

(inclusion-exclusion principle)를 이용하면 구할 수 있다. 결론적으로, p_f 는 다음과 같이 전개된다⁸⁾.

$$p_f = 1 - \sum_{k=1}^K \left(\frac{(M-K)!(M-k)!}{(M-k-K)!M!} \right)^{N-1} \binom{K}{k} (-1)^{k-1}. \quad (2)$$

또한, 기지국은 각 수신한 프리앰블의 신호의 세기가 미리 정해진 검출 문턱값(Detection threshold)을 넘게되면, 해당 프리앰블이 검출되었다고 판단한다. 하지만, 각 단말이 전송한 프리앰블이 Fading을 겪게 되면, 수신 신호의 세기가 충분하지 않아서 기지국에

서 검출되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 확률을 미검출 확률(Mis-detection probability)이라고 부른다. 미검출 확률을 수학적으로 유도해내기 위해서는, 특정 단말이 x 라는 프리앰블 신호를 P/K 의 전송 전력으로 전송했을 경우를 고려하면 된다. 기지국에서 수신 신호의 임의 접속 채널을 통해 기지국이 수신한 신호 y 는 $y = \sqrt{\frac{P}{K}}hx + w$ 와 같이 표현될 수 있으며, 여기서 $h \sim CN(0, \sigma_h^2)$ 는 Rayleigh coefficient, $w \sim CN(0, \sigma_w^2)$ 는 가산 백색 가우스 잡음을 의미한다. 수신 신호로부터 프리앰블의 존재 여부를 파악하기 위해 기지국은 Known Signal인 x 를 이용하여 Correlation을 구하고, Power delay profile을 구하게 된다²⁾. 보다 자세히, $|x^Hy|$ 를 구하면 되는데, $x^Hy = \sqrt{\frac{P}{K}}h + \frac{1}{\sqrt{N_{ZC}}}w$ 로 표현될 수 있으며³⁾, 여기서 N_{ZC} 는 프리앰블을 만들어낼 때 이용되는 Zadoff-Chu 수열의 길이를 나타낸다.

이 때, 수신 신호의 x 와의 Correlation 결과는 $x^Hy \sim CN(0, \frac{P}{K}\sigma_h^2 + \frac{1}{N_{ZC}}\sigma_w^2)$ 로 모델링 될 수 있으며, $|x^Hy|$ 는 $\sigma = \sqrt{\frac{P}{K}\sigma_h^2 + \frac{1}{N_{ZC}}\sigma_w^2}$ 를 파라미터로 하는 Rayleigh Distribution을 다르게 된다. 미검출 확률 p_{md} 는 $p_{md} = \Pr\{|x^Hy| < \gamma\}$ 로 구할 수 있게 되며, $|x^Hy|$ 의 Cumulative Distribution Function을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{md} = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

V. 모의실험

본 장에서는 다중 프리앰블 기반의 임의 접속 기법의 성능을 검증하기 위해 Matlab 기반의 컴퓨터 모의 실험을 진행한다. 모의실험에 사용된 변수들은 표 1에 정리되어 있다.

임의 접속 채널은 짧은 주기로 반복되기 때문에 특정 임의 접속 채널에 접속하는 단말의 수는 많지 않으며³⁾, 현재 이동통신망에서도 64개의 프리앰블을 운용하고 특정 서비스 시나리오를 위해 일부의 프리앰블

표 1. 모의실험 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameters	Values
N	1 ~ 10 [4]
M	32, 64 [1]
K	1, 2, 3 [8]
SNR	-30dB ~ 20dB [9]
N_{ZC}	839 [1]

자원을 전용하는 것은 일반적인 가정이다 (e.g., $M=32$)^{1),2)}. 동시에 전송하는 프리앰블의 수(K)는 임의로 설정할 수 있지만, 실제 이동통신망의 동작 시나리오를 고려하여 $K = 1, 2, 3$ 로 설정하였다⁸⁾. 모든 그래프에서 수학적 분석의 결과를 선(line)으로 표시하였고, 모의실험의 결과를 마커(marker)로 표시하였다.

그림 3은 신호 대 잡음비 (Signal-to-noise ratio; SNR) 값의 변화에 따른 프리앰블의 미검출 확률을 보여주고 있다. SNR의 값이 커짐에 따라 프리앰블 신호가 더 잘 검출되는 것은 자명한 사실이며, 미검출 확률이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 수학적 분석 결과와 모의실험 결과가 일치하는 것을 확인함으로써, 분석의 타당성을 검증할 수 있었다. 오검출 확률(erroneous detection probability)의 목표치인 p_{fa}^* 가 작은 값으로 설정이 되었다는 것은 검출 문턱값(γ)이 높은 값으로 설정이 되었다는 것을 의미하기 때문에, 상대적으로 높은 미검출 확률이 관찰된다⁴⁾. 또한, 2개의 프리앰블을 이용할 경우에 각 프리앰블에 실리는 전송 전력이 반(half)으로 줄기 때문에, 1개의 프리앰블을 이용하는 경우에 비해 미검출 확률이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과, $K=1$, $p_{fa}^* = 10^{-3}$ 인 경우와 $K=2$, $p_{fa}^* = 10^{-1}$ 인 경우에 유사한 성능을 관찰 할 수 있다. $K=3$ 인 경우, 각 프리앰블에 실리는 전송 전력은 더 작아지기 때문에, 상대적으로 더 높은 미검출 확률을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 활성화된 단말의 수(M)에 따른 MAC 계층 관점에서의 임의 접속 실패 확률을 보여준다. 가용

4) 오검출 확률은 노이즈 성분이 검출될 확률을 의미하며, $p_{fa} = 1 - \Pr\{|x^Hw| < \gamma\}^{N_{FDZ}}$ 로 구할 수 있다. 여기서, N_{FDZ} 는 프리앰블 검출 영역의 크기가 되며, 해당 영역에서 노이즈 성분의 세기가 하나라도 검출 문턱값을 넘는 샘플이 있을 경우에는 오검출로 판단한다. $|x^Hw|$ 는 Rayleigh Distribution을 따르기 때문에, $p_{fa} = 1 - \left\{1 - \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\sigma_w^2}\right)\right\}^{N_{FDZ}}$ 가 된다[9].

2) Power delay profile (PDP)는 Correlation 결과의 크기로 표현된다.

3) $M=64$, $N=4$ 인 경우에 약 4%의 충돌 확률을 보인다 [3].

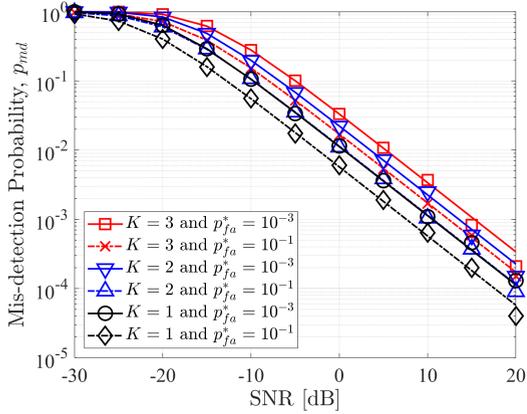


그림 3. SNR에 따른 미검출 확률
Fig. 3. Mis-detection probability for varying SNR value

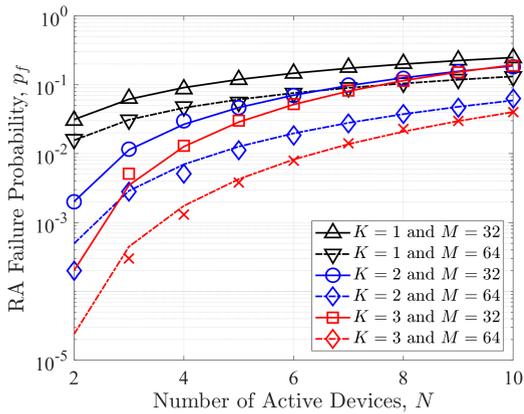


그림 4. 활성화된 단말에 따른 MAC계층 관점에서의 임의 접속 실패 확률
Fig. 4. RA failure probability for varying the number of active devices from the perspective of MAC layer

한 프리앰블 자원의 양은 한정되어 있기 때문에, 경쟁에 참여하는 단말의 수가 증가함에 따라 임의 접속 실패 확률이 증가하는 것은 당연하다. $K=1$ 인 경우는 종래의 임의 접속 기법과 동일한 성능을 내기 때문에, 이때의 임의 접속 실패 확률은 잘 알려진 임의 접속 충돌 확률(RA collision probability)과 동일하다^[8]. $K=2$ 인 경우, 단말 d_o 가 임의로 선택한 두 개의 프리앰블 모두가 프리앰블 충돌을 겪을 때에만 임의 접속에 실패하게 되며, 그 외의 모든 경우에는 임의 접속에 성공하게 된다. 경쟁에 참여하는 단말의 수가 적을 때에는 K 값이 커짐에 따라 성능 이득이 커지지만, 단말의 수가 많아질 때에는 각 단말이 전송하는 다수 개의 서로 다른 프리앰블들이 오히려 임의 접속 채널에 혼잡(congestion)을 야기하여 성능 이득 폭이 감소하

는 것을 확인할 수 있었다. 네트워크의 상황에 따라 적응적으로 K 값을 변경할 필요가 있다.

그림 5는 $N=3, M=32, p_{fa}^*=10^{-3}$ 인 경우에, SNR에 따른 계층 교차적 관점에서의 임의 접속 성공 확률을 보여주고 있다. 계층 교차적 접근법을 이용하게 될 경우, 임의 접속 성공 확률은 프리앰블의 미검출 확률에도 영향을 받기 때문에 SNR값이 낮은 영역에서는 성능이 현저히 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 $M=32, SNR=-10$ dB인 경우에, 활성화된 단말의 수(N)에 따른 계층 교차적 관점에서의 임의 접속 성공 확률을 보여주고 있다. 공정한 비교를 위하여 MAC 계층 관점에서의 임의 접속 성공 확률을 함께 도시하였다. 동시에 전송하는 프리앰블의 수(K)는 각

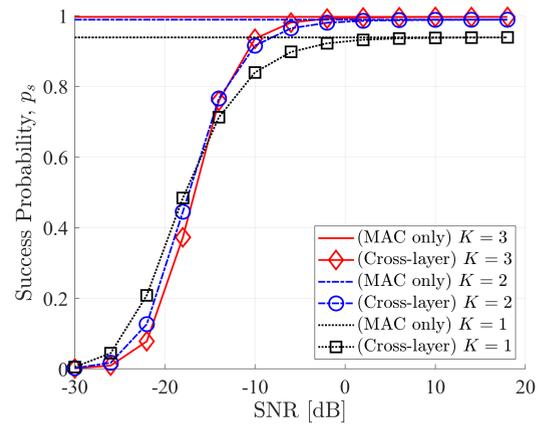


그림 5. SNR에 따른 계층교차적 관점에서의 임의 접속 성공 확률
Fig. 5. RA success probability for varying SNR value from the perspective of cross-layer

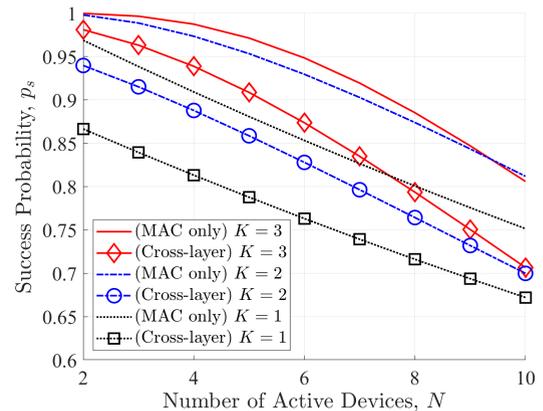


그림 6. 활성화된 단말의 수에 따른 계층교차적 관점에서의 임의 접속 성공 확률
Fig. 6. RA success probability for varying the number of active devices from the perspective of cross-layer

프리앰블에 실리는 전송 전력(i.e., P/K)에 영향을 미치게 되기 때문에, SNR에 따른 성능 열화를 관찰할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 다중 프리앰블 기반의 임의 접속 기법을 제안하고, 임의 접속 기법의 성공 확률을 계층 교차적 관점에서 분석하고 검증하였다. 제안 기법은 두 개 이상의 프리앰블을 동시에 전송하는 것을 허용하여 임의 접속 성공 확률을 증가시킬 수 있는 가능성을 보여주었다. 다만, 동시에 전송하는 프리앰블의 수에 따라 프리앰블의 검출 성능이 달라지기 때문에 본 논문에서는 계층 교차적 관점에서 임의 접속 성공 확률을 수학적으로 분석하였다. 또한, Matlab을 이용한 모의실험을 통하여 제안 기법의 타당성을 검증하였다. 네트워크의 트래픽 양에 따라 동시에 전송하는 프리앰블 수를 효율적으로 관리할 필요가 있으며, 각 단말은 해당 기법을 이용할 경우에 보다 적은 지연 시간을 사용하여 네트워크에 접속할 수 있다.

제안 기법은 성능 이득을 위해 추가적인 상향링크, 하향링크 무선 자원을 추가 비용으로 지불해야한다. 이러한 자원 사용의 비효율성을 개선하는 것을 추후 연구 주제로 삼을 예정이다.

References

- [1] 3GPP TS 38.321, “5G NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification (V15.3.0),” Sep. 2018.
- [2] E. Dahlman, et al., *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 1st Ed., Academic Press, Aug. 2018.
- [3] T. Kim, H. S. Jang, and D. K. Sung, “An enhanced random access scheme with spatial group based reusable preamble allocation in cellular M2M networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 10, pp. 1714-1717, Oct. 2015.
- [4] T. Kim, B. C. Jung, and D. K. Sung, “An enhanced random access with distributed pilot orthogonalization for cellular IoT networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 1152-1156, Jan. 2020.
- [5] T. Kim and S. H. Chae, “A random access

based on pilot-assisted opportunistic transmission for cellular IoT networks,” *J. KIICE*, vol. 23, no. 10, pp. 1254-1260, Oct. 2019.

- [6] T. Kim and S. H. Chae, “A novel random access framework for uplink cellular IoT: Non-orthogonal preambles and multi-antennas,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 748-752, Apr. 2020.
- [7] S. B. Seo, W. S. Jeon, and D. G. Jeong, “A dual preamble random access protocol for reducing access congestion in disaster situations,” in *Proc. 19th ICACT*, pp. 121-127, 2017.
- [8] T. Kim and I. Bang, “Random access parallelization based on preamble diversity for cellular IoT networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 188-192, Jan. 2020.
- [9] T. Kim, K. S. Ko, and D. K. Sung, “Transmit power optimization for prioritized random access in OFDMA based systems,” in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, 2016.

김 태 훈 (Taehoon Kim)



2011년 2월 : 한양대학교 정보통신공학부 (공학사)

2013년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)

2017년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학부 (공학박사)

2017년 9월~2020년 2월 : 국방과학연구소 국방첨단기술연구원 선임연구원

2020년 3월~현재 : 한밭대학교 컴퓨터공학과 조교수 <관심분야> Wireless Communications, 5G/IoT,

Multiple Access Systems, Physical-Layer Security, Machine Learning, Reinforcement Learning

[ORCID:0000-0002-9353-118X]

방 인 규 (Inkyu Bang)



2010년 2월 : 연세대학교 전기전
자공학부 (공학사)

2012년 1월 : 한국과학기술원 전
기및전자공학과 (공학석사)

2017년 8월 : 한국과학기술원 전
기및전자공학부 (공학박사)

2017년 9월~2019년 2월 : 싱가포르 국립대학 컴퓨터과학과 박사후연구원

2019년 3월~2019년 7월 : 국방과학연구소 지상기술연
구원 선임연구원

2019년 8월~현재 : 한밭대학교 정보통신공학과 조교수
<관심분야> Wireless Network Security, Physical-
Layer Security, 5G/IoT, SWIPT, UAV, Machine
Learning, Deep Learning

[ORCID:0000-0001-7109-1999]