

6G 저지연 통신을 위한 임의 파일럿 선택 기법 기반 개선된 2단계 임의 접속

김 태 훈*, 방 인 규^o

An Enhanced Two-Step Random Access with Random Pilot Selection Technique for 6G Low-Latency Communications

Taehoon Kim*, Inkyu Bang^o

요 약

본 논문에서는 임의 파일럿 선택 기법 기반의 개선된 2단계 임의 접속 절차를 제안하고, 임의 접속을 한 번에 성공할 확률인 one-shot 성공 확률 관점에서 제안 기법의 성능을 분석한다. 모의실험을 통해 수학적 분석의 타당성을 검증하고, 종래의 기법 대비 제안 기법의 우수성을 증명한다.

Key Words : Two-Step Random Access, Random Pilot Selection, One-Shot Success Probability, 6G

ABSTRACT

In this paper, we newly propose an enhanced two-step random access (RA) procedure based on a random pilot selection (RPS) technique and analyze its performance in terms of one-shot success probability. We validate our mathematical approach via extensive MATLAB simulations, and verify the superiority of our proposed scheme compared to the conventional two-step RA scheme.

I. 서 론

최근 물리 세계와 가상 세계의 연동을 추구하는 메타버스(Metaverse)에 대한 관심이 지속되고 있으며, 미래 사회를 선도할 전도유망한 후보 기술로 자리매김하고 있다. 그 중, 물리적 세계와 동일한 디지털 복제를 만들어 가상 세계에 표현하는 개념인 디지털 트윈도 주목받고 있으며, 가상 세계와 물리 세계의 실시간 동기화를 위해 이동통신망의 저지연 서비스 제공의 중요성도 강조되고 있다.

이동통신 서비스를 이용하고자 하는 모든 단말은 기지국과 연결을 맺는 과정인 임의 접속(Random access) 절차를 필수적으로 수행해야 한다. 4단계로 이루어진 경쟁 기반 임의 접속을 일반적으로 사용했었으나, 지연시간 단축에 대한 요구가 지속됨에 따라 2단계로 단축된 임의 접속 절차가 3GPP Release 16에 포함되었다¹⁾. 종래의 4단계로 이루어진 임의 접속 대비 핸드셰이킹으로 인한 시그널링 오버헤드가 줄어들기는 했지만, 여전히 경쟁 기반으로 동작하기 때문에 충돌(collision) 문제 개선이 필요하다.

본 논문에서는 임의 파일럿 선택 기법 기반의 개선된 2단계 임의 접속 절차를 제안한다. 종래의 기법에서는 프리앰블 자원만을 가지고 경쟁을 했지만, 제안 기법에서는 프리앰블 자원뿐만 아니라 상향링크 데이터 전송 시에 임베딩되는 파일럿(즉, DM-RS) 자원까지 함께 고려하여 경쟁 공간을 확장하는 것을 주요 특징으로 한다. 제안 기법을 임의 접속을 한 번에 성공하는 확률인 one-shot 성공 확률 관점에서 수학적으로 분석하며, 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 검증한다.

II. 임의 파일럿 선택 기법 기반의 2단계 임의 접속

본 장에서는 제안 기법인 임의 파일럿 선택 기법 기반의 개선된 2단계 임의 접속 절차의 주요 특징에 대해 설명한다. 그리고 제안 기법의 시그널링 절차에 대해 상세히 설명하고, 제안 기법의 one-shot 성공 확

* 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. 2022R1F1A1076126).

• First Author : (ORCID:0000-0002-9353-118X)Hanbat National University Department of Computer Engineering, thkim@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7109-1999)Hanbat National University Department of Intelligence Media Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202205-105-A-LU, Received May 20, 2022; Revised June 1, 2022; Accepted June 1, 2022

를 수학적으로 분석한다.

2.1 주요 특징

2단계 임의 접속 절차의 가장 큰 특징은 데이터(예: 연결 요청 메시지)의 빠른 전송 시도이다. 이를 위해 기지국은 상향링크 공유 채널(PUSCH)을 사전할당(pre-allocation) 해놓고, 프리앰블 전송과 동일한 시점에 데이터 전송을 허용한다. 하나의 PUSCH 자원에는 하나 또는 다수개의 프리앰블이 대응(mapping)되어 있다²⁾. 그로 인해, 프리앰블의 독점적 선택 여부와 관계없이, 다수의 단말이 동일한 PUSCH 자원을 이용해 데이터 전송을 시도하는 경우가 발생하기도 한다. 데이터 전송 시에 채널 추정을 위해 데이터 패킷에 파일럿 신호를 반드시 포함해야 하는데, 파일럿 신호의 오염(contamination) 여부에 따라 데이터의 복호 여부가 결정된다. 종래의 기법에서는 파일럿 선택의 자유가 없어 다수의 단말이 동일한 PUSCH 자원을 이용하게 되면 데이터 복호가 어려웠다. 안테나의 수가 충분한 상황에서는 파일럿 신호가 오염되지 않고 서로 구분될 수 있다면 다중안테나 기반의 수신기(예: ZF receiver)를 활용하여 다수의 데이터를 공간(spatial)상에서 성공적으로 구분할 수 있게 된다³⁾. 이러한 상황을 만들기 위해, 본 논문에서는 각 단말이 전송하고자 하는 데이터 패킷에 직교 파일럿 집합 중 임의로 선택한 파일럿을 임베딩하는 임의 파일럿 선택 기법을 적용하고자 한다. 임의성으로 인하여 각 단말이 동일한 파일럿을 선택하는 경우도 물론 발생하기도 하지만, 상당한 성능 이득을 기대할 수 있다.

2.2 절차

그림 1은 제안 기법의 절차를 보여준다.

1) (1단계 - Msg A 전송) 각 단말은 Msg A를 전송한다. Msg A는 세부적으로 Msg1(프리앰블)과 Msg3(연결 요청 메시지)으로 구성된다. Msg 1은 임의 접속 채널(PRACH)을 통해, Msg3은 사전 할당된 상향링크 공유 채널(PUSCH)을 통해 동일한 시점에 전송된다.2) Msg3을 생성하는 과정에서 R개의 직교 파일럿 중 하나를 임의로 선택하여 임베딩한다.

2) (2단계 - Msg B 전송) 기지국은 Msg A를 구성하는 프리앰블의 검출, 사전할당된 PUSCH를 통해 수신한 데이터의 복호 상태에 따라 후속 절차를 달리

1) 안테나 간의 간섭으로 인하여 데이터 복호 성능이 열화될 수 있으나 본 논문에서는 안테나 간의 간섭을 고려하지 않는다.
2) 무선 자원의 물리적인 위치로 인하여 실제 전송 시간은 약간 상이할 수 있으나, 동일한 단계에서 전송이 수행되기 때문에 동일한 시점에 전송된다고 표현했다.

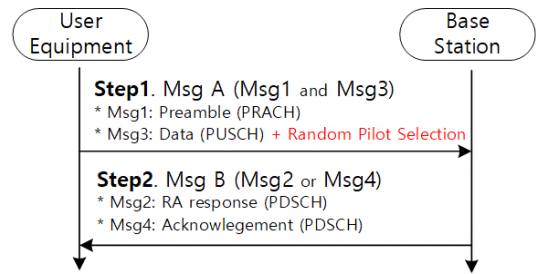


그림 1. 임의 파일럿 선택 기법 기반 2단계 임의 접속 절차
Fig. 1. Random pilot selection based two-step random access procedure

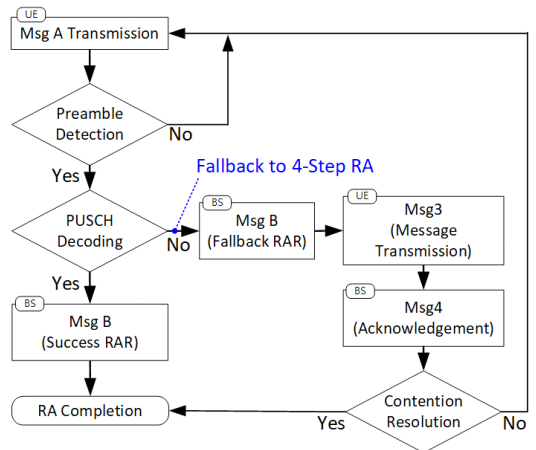


그림 2. Msg A의 검출 및 복호 상태에 따른 후속 절차
Fig. 2. Subsequent steps according to the detection and decoding status of Msg A

하며 (그림 2 참고), 다음과 같이 3가지의 경우로 구분할 수 있다²⁾.

- ① 프리앰블이 검출되지 않는 경우
- ② 프리앰블은 검출되었으나, PUSCH 자원에서 데이터 복호가 실패하는 경우³⁾
- ③ 프리앰블도 검출되었고, PUSCH 자원에서 데이터 복호가 성공하는 경우

제안 기법을 활용할 경우, 다수의 단말이 동일한 PUSCH 자원을 활용하여 데이터를 전송하는 상황에서도, 모든 단말이 서로 다른 파일럿을 사용하게 되어 기지국이 각 단말과 기지국 사이의 채널 상황을 획득할 수 있는 경우가 생길 수 있다. 이 때, 다중안테나

3) 다수의 단말이 동일한 프리앰블을 선택하는 경우에도 발생하며, 다수의 단말이 서로 다른 프리앰블을 선택했다라도 프리앰블과 사전할당 자원 사이의 다대일 대응 관계로 인해 발생할 수 있다. 이 경우에는 종래의 4단계 임의 접속으로 전환(fallback)한다.

기술을 활용하여 동일한 PUSCH를 통해 수신한 데이터들의 성공적인 복호를 기대할 수 있다 (즉, ② → ③).

2.3 성능 분석

2단계 임의 접속을 한 번에 성공하는 확률을 one-shot 성공 확률(success probability)로 정의한다. n 개의 단말이 특정 임의 접속 채널에서 동시에 임의 접속을 시도하는 일반적인 상황을 고려하며, 단말 u_o 관점에서 분석을 진행한다. M, R 은 각각 사용 가능한 프리앰블의 수, 사용 가능한 파일럿의 수를 나타낸다. 또한, G 는 사전 할당된 하나의 PUSCH에 대응되는 프리앰블의 수를 나타내며, J 는 기지국의 수신안테나의 수이며 이론적으로 동시에 복호될 수 있는 스트림(stream)의 수이다.

u_o 와 동일한 PUSCH를 사용하는 단말이 존재하더라도, u_o 를 포함한 모든 단말이 서로 다른 파일럿을 사용한 경우에는 성공적으로 데이터를 복호할 수 있다. 따라서, one-shot 성공 확률 p_s 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_s = \sum_{i=0}^{\min(n,J)-1} f(n-1,i; \frac{G}{M}) \times g(i; R). \quad (1)$$

여기서, 동시 복호 가능한 데이터 스트림의 수는 수신안테나의 수로 인해 제약되기 때문에 해당 부분이 수식 (1)의 시그마 부분에 반영되어 있다. 또한, $f(\cdot)$ 는 u_o 와 동일한 PUSCH 자원을 사용하는 단말 수의 분포를 나타내며, 다음과 같다.

$$f(n-1,i; \frac{G}{M}) = \binom{n-1}{i} \left(\frac{G}{M}\right)^i \left(1 - \frac{G}{M}\right)^{n-1-i}. \quad (2)$$

또한, $g(\cdot)$ 는 u_o 를 제외한 i 개의 단말이 u_o 가 사용한 파일럿과 모두 다른 파일럿을 선택하는 확률이며, 다음과 같다.

$$g(i; R) = \prod_{j=1}^i \left(\frac{R-j}{R}\right). \quad (3)$$

$J=1$ 로 설정할 경우, 수식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$p_s = f(n-1,0; \frac{G}{M}) \times g(0; R). \quad (4)$$

수식 (4)는 $p_s = f(n-1,0; \frac{G}{M}) = \left(1 - \frac{G}{M}\right)^{n-1}$ 로 간소화될 수 있으며, 이는 임의 파일럿 선택 기법이 적용되지 않은 종래의 2단계 임의 접속 절차의 one-shot 성공 확률이다²⁾.

III. 성능 평가 및 논의

본 장에서는 제안 기법의 성능을 평가하기 위해 MATLAB을 사용하여 모의실험을 진행한다. 시스템에서 제공하는 전체 프리앰블의 수가 64인 상황에서 ($M=64$), 2개 또는 4개의 프리앰블이 동일한 PUSCH 자원에 사전할당 되어있는 경우만을 대표적으로 고려한다 ($G=2, 4$). 사용할 수 있는 파일럿의 수는 4개 또는 8개를 가정하였고 ($R=4, 8$), $J=8$ 을 가정하였다. 공정한 비교를 위해 종래의 2단계 임의 접속 절차를 비교 기법으로 선정하였다²⁾. 모든 결과 그래프에서 선(line)은 분석 결과를 내고 마커(marker)는 모의실험 결과를 나타낸다.

그림 3은 임의 접속을 시도하는 단말의 수에 따른 one-shot 성공 확률을 보여주고 있다. 단말의 수가 증가함에 따라 어떤 기법이든 한 번에 임의 접속을 성공하는 확률이 감소하는 경향을 보이지만, 제안 기법을 이용하면 종래의 기법보다 우수한 성능을 달성할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. G 의 값을 증가시킬 경우 더 많은 수의 프리앰블이 하나의 PUSCH 자원에 대응되어 경쟁이 심해지기 때문에 one-shot 성공 확률이 감소한다. 마지막으로, 제안 기법에서는 R 값이 커짐에 따라 경쟁 공간이 확대되어 one-shot 성공확률이

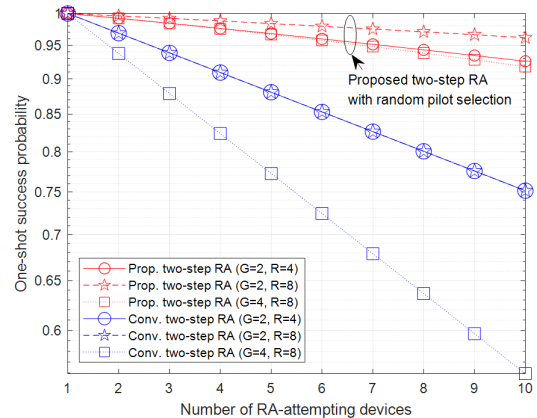


그림 3. 임의 접속을 시도하는 단말의 수에 따른 one-shot 성공 확률
Fig. 3. One-shot success probability for varying the number of RA-attempting devices per RA occasion

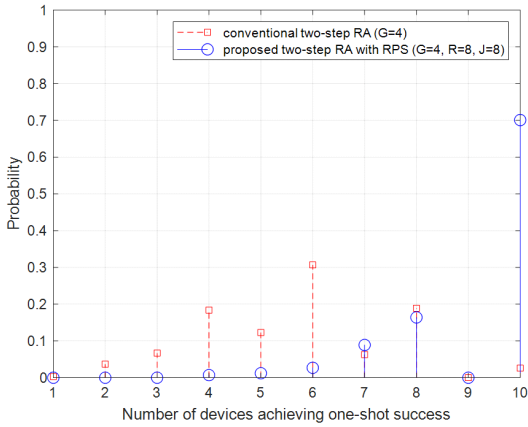


그림 4. 10개의 단말이 2단계 임의의 접속을 시도하는 상황에서 임의의 접속을 한 번에 성공하는 단말 수의 분포
 Fig. 4. Distribution of the number of devices achieving one-shot success when 10 devices attempt two-step RAs

향상된다.

그림 4는 $n = 10$ 인 경우에 임의의 접속을 한 번에 성공하는 단말 수의 분포를 보여주고 있다. 종래의 기법을 이용할 경우 약 3%의 단말만이 임의의 접속에 한 번에 성공하지만, 제안 기법을 이용하는 경우에는 약 70%의 단말이 임의의 접속에 한 번에 성공하는 것을 확인할 수 있었다. 더 많은 파일럿을 활용할 수 있는 환경에서 더 큰 성능 개선이 예상된다.

References

- [1] 3GPP RP-190711, “3GPP Work Item Description, 2-step RACH for NR,” Sep. 2019.
- [2] T. Kim and I. Bang, “Performance analysis of two-step random access for 6G low-latency communications,” *J. KICS*, vol. 47, no. 7, pp. 930-933, Jul. 2022. (<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.7.930>)
- [3] 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. (<https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2950993>)