

6G 네트워크에서 메시지 번들링 기반 우선순위 인식형 2단계 임의 접속

김 태 훈*, 방 인 규°

A Priority-Aware Two-Step Random Access Based on Message Bundling Technique in 6G Networks

Taehoon Kim*, Inkyu Bang°

요 약

본 논문에서는 메시지 번들링 기반의 우선순위 인식형 2단계 임의 접속 방안을 제안한다. 제안 기법은 각 단말의 우선순위 수준에 따라 전송하는 메시지 번들 수를 동적으로 조절하는 것을 주요 특징으로 한다. MATLAB 기반의 모의실험을 진행하며, 임의 접속 성공 확률 관점에서 성능 평가를 진행한다. 이를 통해, 제안 기법을 이용해 접속 우선순위에 따라 접속 성능을 차별화할 수 있음을 검증하고자 한다.

Key Words : 6G Networks, Two-Step Random Access, Access Priority, Message Bundling, Success Probability

ABSTRACT

This paper proposes a priority-aware two-step random access (2sRA) procedure based on message bundling technique. Our proposed scheme dynamically adjusts the number of bundled messages transmitted by each user equipment (UE) according to its access priority level. We perform extensive simulations based on MATLAB to evaluate the performance of our proposed scheme in terms of 2sRA suc-

cess probability. From the results, we verify that our proposed scheme effectively differentiates the access performance according to the access priority level.

I. 서 론

자율주행, 원격제어, 산업 자동화와 같은 지연 민감형 서비스가 증가함에 따라 6G 네트워크에서는 저지연 통신의 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 네트워크 초기 접속 과정에서부터 빠르고 안정적인 연결을 보장하는 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다^[1].

이동통신망을 통해 인터넷 서비스를 활용하기 위해 모든 단말은 임의 접속(Random Access, RA) 절차를 통해 기지국과 연결을 수립해야 한다^[2]. 임의 접속 과정에서 접속 지연을 줄이는 방안으로 기존의 4단계 임의 접속 절차를 간소화한 2단계 임의 접속 (two-step RA; 2sRA) 방식이 제안되었지만^[2], 여전히 경쟁 기반으로 동작하기 때문에 다수의 단말이 동시에 접속을 시도하는 경우 충돌(collision)로 인해 추가적인 접속 지연이 발생하는 한계점이 존재한다. 또한, 이러한 경쟁 기반의 임의 접속 방식에서는 서비스의 중요도나 지연 민감도와 관계없이 모든 단말에게 동일한 접속 기회를 부여하며, 우선순위에 따른 차별화된 접속 관리가 힘들다. 2단계 임의 접속 기법에 관한 연구는 초기 단계이며 충돌 문제를 완화하기 위한 연구는 일부 진행되고 있으나^[3,4], 2단계 임의 접속 프레임워크에서 우선순위 문제를 해결하고자 하는 연구는 미비한 상태이다.

본 논문에서는 위에 언급한 두 가지의 한계를 동시에 극복하고자, 메시지 번들링 기반의 우선순위 인지형 2단계 임의 접속 기법을 제안하고자 한다. 제안 기법은 각 단말의 우선순위 수준에 따라 전송하는 메시지 번들 수를 동적으로 조절하는 것을 주요 특징으로 하여, 높은 우선순위를 갖는 단말이 평균적으로 더 빠르게 네트워크에 접속할 수 있도록 한다. 임의 접속 성공 확률을 수학적으로 표현하고, MATLAB 기반의 모의실험을 통해 제안 기법의 타당성과 우수성을 검증하고자 한다.

* 이 연구는 2025학년도 국립한밭대학교 학술문화연구재단에서 지원을 받았음

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

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

논문번호 : 202504-095-B-LU, Received April 24, 2025; Revised May 9, 2025; Accepted May 9, 2025

II. 메시지 번들링 기반 우선순위 인식형 2단계 임의 접속

본 장에서는 제안 기법과 관련된 배경지식 및 주요 특징과 제안 기법에 대한 상세한 설명을 제공한다.

2.1 배경지식 및 주요 특징

2단계 임의 접속 절차는 프리앰블(Preamble; PA)과 페이로드(payload)를 동시에 전송하는 무허가(grant-free) 기반의 프로토콜이다. 이를 위해, 상향링크 공유 채널 중 일부는 사전 할당 방식으로 운영해야하며, 사전 할당된 상향링크 공유 채널을 구성하는 단위 자원(unit resource; UR)을 통해 페이로드(예: 연결 요청 메시지)가 전송된다(그림 1 참조).

메시지 번들링 기법은 같은 메시지가 여러 개의 단위 자원을 활용하여 동시에 전송되게 함으로써 임의 접속 성공 확률을 개선하는 기법이며^[5], 접속을 시도하는 단말의 수가 적을 때에는 효과가 상당하지만 많은 수의 단말이 접속을 시도할 때에는 오히려 단말 간 경쟁을 심화시켜 성능 열화를 야기하기도 한다.

본 논문에서는 높은 우선순위를 갖는 단말에게 더 많은 수의 메시지 번들을 전송하게 하고 낮은 우선순위를 갖는 단말에게는 더 적은 수의 메시지 번들을 전송하게 하여, 접속 우선순위별 차등화된 접속 성능을 제공할 뿐만 아니라 전체적인 충돌 문제를 완화하여 네트워크의 안정적인 동작을 도모하고자 한다. 그림 1은 프리앰블과 단위 자원 사이의 다대일 대응 관계를 보여주는 동시에, 우선순위별 차등화된 메시지 번들 수가 적용된 것을 보여주고 있다. 4개의 프리앰블 그룹이 1개의 단위 자원에 대응되는 점, 높은 우선순위 단말은 2개의 메시지를 동시 전송하지만 (i.e., PA 1 → UR A, PA 5 → UR B), 낮은 우선순위 단말은 1개의 메시지를 전송하는 점 (i.e., PA 9 → UR C)을 주목할 필요가 있다.

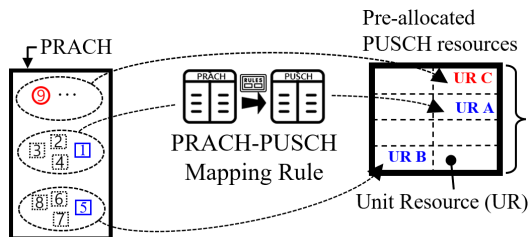


그림 1. 우선순위를 고려한 메시지 번들링 기법이 적용된 다대일 대응 관계 예시
Fig. 1. An example of many-to-one mapping rule tailored with priority-aware message bundling

2.2 절차

그림 2는 제안 기법의 절차를 보여준다.

1) (1단계 - Priority-Aware Msg A 전송) 각 단말은 우선순위 별로 서로 다른 개수의 Msg A를 전송한다. 즉, 높은 우선순위를 갖는 단말은 k_h 개의 Msg A를, 낮은 우선순위를 갖는 단말은 k_l 개의 Msg A를 전송한다($k_h > k_l$). 각 단말은 다수개의 프리앰블을 임의로 선택하는 과정에서, 동일한 단위 자원에 대응되는 선택은 고려하지 않는다.

2) (2단계 - Msg B 전송) 기지국은 임의 접속 채널로 수신한 신호로부터 프리앰블을 검출하며, 사전 할당된 상향링크 공유 채널을 통해 수신한 신호를 이용해 데이터 복호(decoding)를 수행한다. 특정 단위 자원에서 데이터 복호에 성공한 경우, 기지국은 데이터에 포함된 사용자 정보를 기반으로 응답 메시지(Msg B: Acknowledgement)를 전송한다. 반대로, 특정 단위 자원에서 데이터 복호에 실패한 경우, 기지국은 해당 단위 자원에 대응되는 검출된 프리앰블 정보를 활용하여 응답 메시지(Msg B: RA response)를 전송하며, 이 과정에서 2단계 임의 접속 절차는 자연스럽게 종래의 4단계 임의 접속 절차로 전환(fallback)된다.

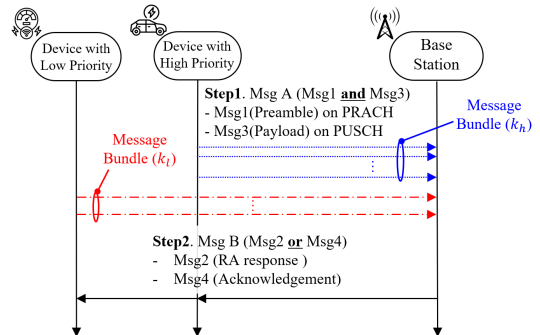


그림 2. 메시지 번들링 기반 우선순위 인식형 2단계 임의 접속 절차
Fig. 2. Message bundling based priority-aware two-step random access procedure

2.3 성능 분석

특정 임의 접속 기회(RA Occasion)에서 n_h 개의 높은 우선순위를 갖는 단말과 n_l 개의 낮은 우선순위를 갖는 단말이 2단계 임의 접속을 시도하는 상황을 고려한다. M 은 전체 프리앰블의 수를, G 는 단위 자원 공유 계수(sharing coefficient)를 나타낸다. G 는 $\frac{M}{R}$ 로 정의되며, R 은 사전 할당된 상향링크 공유 채널을 구성하는 단위 자원의 개수이다. 각 단말은 $k_h(k_l)$ 개의 Msg A가

모두 충돌을 겪는 상황만 회피하면, 4단계의 임의 접속 절차로의 전환 없이 2단계 임의 접속을 성공적으로 완료할 수 있다. 높은 우선순위를 갖는 단말의 임의 접속 성공 확률을 p_h 로, 낮은 우선순위를 갖는 단말의 임의 접속 성공 확률을 p_l 로 표기할 때, p_h 와 p_l 은 수식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Proof: See *Proposition 1* and *Proposition 2* in [6]).

III. 성능 평가 및 논의

제안 기법의 성능 평가를 위해 MATLAB 기반의 모의실험을 진행한다. $M=64$, $G=2$, $n_h \ll n_l$ 인 일반적인 상황을 고려하며^[6], 다양한 k_h , k_l 의 조합에서 n_l 값을 변경하며 p_h 와 p_l 을 관찰하고자 한다. k_h 와 k_l 을 1로 설정하여, 우선순위가 고려되지 않았던 종래의 2단계 임의 접속 절차를 기준 성능으로 활용하였다. 모든 그래프에서 선(line)은 수식 (1)과 수식 (2)를 활용한 분석(analysis) 결과를 나타내고 마커(marker)는 모의실험 결과를 나타낸다.

그림 3은 $n_h=1$ 인 상황에서 n_l 에 따른 p_h 와 p_l 을 보여준다. 우선순위에 따라 메시지 번들 수에는 차이가 있지만 여전히 n_l+n_h 개의 단말이 경쟁하는 상황이기 때문에 우선순위와 관계없이 n_l 이 증가함에 따라 성공 확률은 감소하는 경향을 보인다. 종래의 기법은 우선순위를 고려하지 않기 때문에 모든 단말이 동일한 접속 성능을 가질 수밖에 없다. 반면, 제안 기법은 우선순위에 따라 차등화된 성능 제공이 가능하며, 특히 높은 우선순위 단말은 종래의 기법 대비 우수한 접속 성능을 달성할 수 있다. 메시지 번들 수의 설정에 따라 낮은 우선순위 단말 역시 종래의 기법보다 향상된 접속 성능을 달성할 수도 있다 (e.g., $k_h=3$, $k_l=2$).

그림 4는 $n_h=2$ 인 상황에서 n_l 에 따른 p_h 와 p_l 을 보여준다. 그림 3의 시나리오와 비교할 때, 높은 우선순위를 갖는 단말이 1개 증가함에 따라 전체적인 접속 성능은 다소 열화되었으나, 제안한 기법은 높은 우선순위 단말이 종래의 방식에 비해 더 우수한 접속 성능을

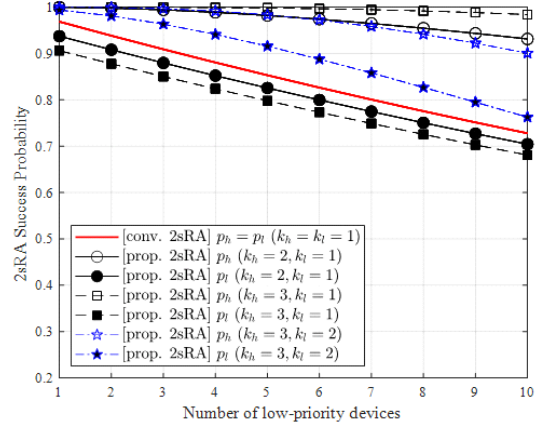


그림 3. 낮은 우선순위 단말의 수에 따른 2단계 임의 접속 성공 확률 ($n_h=1$ 인 경우)

Fig. 3. 2sRA success probability for varying n_l when $n_h=1$

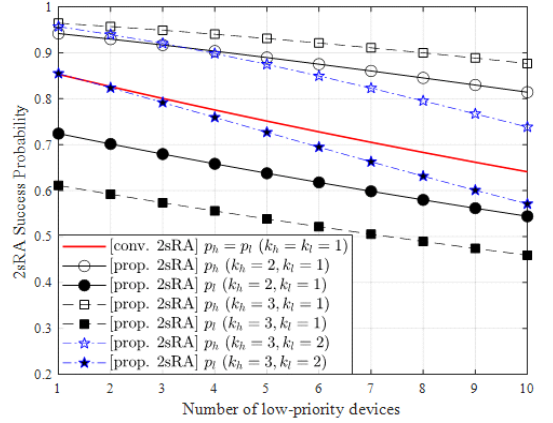


그림 4. 낮은 우선순위 단말의 수에 따른 2단계 임의 접속 성공 확률 ($n_h=2$ 인 경우)

Fig. 4. 2sRA success probability for varying n_l when $n_h=2$

달성하도록 하며, 결과적으로 우선순위 기반의 접속 성능 차등화를 효과적으로 구현함을 확인할 수 있었다.

$$p_h = 1 - \sum_{m=0}^{k_h} (-1)^m \left(\frac{(R-k_h)!(R-m)!}{(R-m-k_h)!R!} \right)^{n_h-1} \times \left(\frac{(R-k_l)!(R-m)!}{(R-m-k_l)!R!} \right)^{n_l} \binom{k_h}{m}. \quad (1)$$

$$p_l = 1 - \sum_{m=0}^{k_l} (-1)^m \left(\frac{(R-k_h)!(R-m)!}{(R-m-k_h)!R!} \right)^{n_h} \times \left(\frac{(R-k_l)!(R-m)!}{(R-m-k_l)!R!} \right)^{n_l-1} \binom{k_l}{m}. \quad (2)$$

References

- [1] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A Vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May/Jun. 2020.
- [2] 3GPP RP-190711, "3GPP work item description, 2-step RACH for NR," Sep. 2019.
- [3] T. Kim, S. H. Chae, and I. Bang, "Two-step random access with message replication for low-earth orbit satellite networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 1134-1138, Apr. 2025.
- [4] J. Kim, G. Lee, S. Kim, T. Taleb, S. Choi, and S. Bahk, "Two-step random access for 5G system: Latest trends and challenges," *IEEE Network*, vol. 35, no. 1, pp. 273-279, Jan./Feb. 2021.
- [5] T. Kim, S. H. Chae, and I. Bang, "A two-step random access with message bundling for LEO satellite networks," *J. KICS*, vol. 50, no. 8, pp. 1242-1245, 2025.
- [6] T. Kim, H. S. Jang, I. Bang, and K. S. Ko, "Access priority provisioning based on random access parallelization for prioritized cellular IoT," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 111814-111822, Aug. 2021.