

차등화된 2단계 임의 접속을 위한 상향링크 무선 자원 할당에 관한 연구

김 태 훈*, 김 용 재*, 방 인 규^o

On Uplink Radio Resource Allocation for Prioritized Two-Step Random Access

Taehoon Kim*, Yongjae Kim*, Inkyu Bang^o

요 약

본 논문에서는 차등화된 2단계 임의 접속을 위한 상향링크 무선 자원할당 방법을 제안하고, 임의 접속 충돌 확률 관점에서 제안 기법의 성능을 분석한다. 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 평가하고, 종래의 기법과 비교하며 제안 기법의 우수성을 증명한다.

Key Words : Prioritized Two-Step Random Access, Uplink Radio Resource Allocation

ABSTRACT

In this paper, we newly propose an uplink radio resource allocation strategy for implementing a prioritized two-step random access (RA) procedure in cellular networks. We mathematically analyze the proposed approach in terms of the RA collision probability. Through simulations, we evaluate the performance of our proposed approach and verify its superiority comparing with the conventional one.

1. 서 론

최근 자율이동체, 증강현실/가상현실 등 실시간 컴퓨팅 연산을 요구하는 다양한 서비스가 등장함에 따라, 저지연 요구사항을 만족하기 위해 네트워크의 각 계층에서 활발한 연구 개발이 수행되고 있다. 특히, 최근에는 고성능 연산 장비를 네트워크 말단에 배치하고 과업의 일부를 오프로딩하여 분산 처리하는 모바일 엣지 컴퓨팅(mobile edge computing)이 주목받고 있다.

각 단말은 기지국에 연결된 엣지 서버의 고성능 연산 능력을 활용하기 위해, 우선 기지국과 원활한 통신이 가능하도록 기지국과 연결(connection)을 맺어야 한다. 이때, 사용되는 절차가 임의 접속(random access)이며, 일반적으로 4단계로 구성된 임의 접속 절차를 활용하고 있다.

임의 접속 절차는 경쟁 기반의 프로토콜이기 때문에 임의 접속에 참여하는 단말의 수가 많아지게 되면 네트워크 접속까지의 지연 시간이 길어지게 된다. 네트워크에 신속하게 접속해야 할 필요가 있는 상황에도, 각 단말은 경쟁을 거칠 수밖에 없으며, 그로 인해 임의 접속을 시도하는 과정에서 우선순위(priority)를 보장받는 것은 불가능하다^[1]. 이러한 문제로 인하여 임의 접속 과정에서 우선순위 제공에 대한 필요성이 지속적으로 대두되어 왔으며, 임의 접속 과정에서 우선순위를 제공하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다^[1, 2]. [1]에서는 우선순위에 따라 동시에 전송하는 프리앰블의 수를 차등화하여 임의 접속 과정에서 성능 차등화를 달성했다. 종래의 4단계 임의 접속 과정보다 지연 시간 관점에서 우선순위를 갖는 2단계(two-step) 임의 접속의 등장도 그 일환으로 볼 수 있다^[3].

[4]에서는 2단계 임의 접속 절차와 관련된 여러 난제를 소개하고 그 중 상향링크 동기화 관련 문제를 딥러닝 기반의 접근법을 활용해 해결하고 있으며, [5]에서는 2단계 임의 접속 절차의 성공 확률을 수학적으 로 분석하고 있다. 2단계 임의 접속이라는 절차가 표

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

※ 이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20210671, 수산식품 스마트 가공 기술개발).

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

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

* (ORCID:0000-0002-5194-156X) Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), yongjaekim@kiost.ac.kr, 선임연구원
 논문번호 : 2023-036-A-LU, Received February 28, 2023; Revised March 20, 2023; Accepted March 20, 2023

준화된 지 오래되지 않아, 최근에서야 관련 논문 연구들이 진행되고 있는 상황이다. 특히, 2단계 임의 접속도 여전히 경쟁 기반으로 동작하기 때문에, 임의 접속 과정에서의 성능 차등화에 대한 필요성은 여전히 존재하지만, 관련 연구는 현재까지는 전혀 없는 상황이다. 따라서, 본 논문에서는 차등화된 2단계 임의 접속 절차의 필요성을 인지하고, 상향링크 자원할당을 통해 2단계 임의 접속 절차의 차등화를 달성하고자 한다. 제안 기법을 임의 접속 충돌 확률 관점에서 분석하고, 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 평가하고 검증한다.

II. 2단계(Two-Step) 임의 접속 절차 [3,5]

본 장에서는 2단계 임의 접속 절차에 대해 간략히 요약하여 설명한다^[3]. 2단계 임의 접속은 2단계의 시그널링으로 구성되어 있으며, 1단계(Step 1)는 단말이 Msg A를 기지국에 전송하는 단계이고, 2단계(Step 2)는 기지국이 Msg B를 방송하는 단계이다 ([5]의 그림 1 참고). 자세한 설명은 다음과 같다.

- 1) **1단계(Step 1):** 각 단말은 임의 접속 채널 (PRACH)을 통해 임의로 선택된 프리앰블 (preamble, Msg1)을, 사전 할당된(pre-allocated) 상향링크 공유 채널(PUSCH)을 통해 연결 요청 메시지(connection request message, Msg3)를 전송한다.
- 2) **2단계(Step 2):** 기지국은 PRACH를 통해 수신된 프리앰블을 검출하고, 사전 할당된 PUSCH를 통해 수신된 메시지를 복호 시도한 후, 상응하는 응답 메시지(Msg B)를 전송한다.

2단계 임의 접속에서는 사전 할당된 PUSCH 자원의 효율적인 활용을 위해 하나 또는 다수개의 프리앰블을 하나의 PUSCH에 사전 대응(mapping)시켜놓으며, 선택한 프리앰블에 따라 사용해야 하는 PUSCH 자원이 정해지게 된다 ([5]의 그림 2 참고). 특정 순간에 동시에 임의 접속을 시도하는 여러 단말이 서로 다른 프리앰블을 선택하더라도 이러한 다대일(many-to-one) 대응 관계로 인해 자원 충돌이 추가로 발생할 수도 있다^[5].

III. 차등화된 2단계 임의 접속 절차

본 장에서는 제안 기법의 주요 특징에 대해 설명하고, 성능 차등화의 핵심인 상향링크 무선 자원할당 방

법을 제안한다. 우선 설명한다. 그리고, 차등화된 2단계 임의 접속을 위한 상향링크 무선 자원할당 방법을 제안하고, 우선순위에 따른 임의 접속 충돌 확률을 수학적으로 분석한다.

3.1 주요 특징

일반적인 2단계 임의 접속 절차에서는 하나의 PUSCH 자원에 G 개의 프리앰블을 균등하게(=equally) 사전 대응시켜 운영하며^[3], 임의 접속 과정에서 접속 우선순위라는 개념 자체를 고려하고 있지 않다. 따라서, 2단계 임의 접속을 시도하고자 하는 단말은 시스템에서 제공하는 전체 프리앰블에서 하나의 프리앰블을 임의로 선택하고 그에 사전 대응되어 있는 PUSCH 자원을 이용하여 Msg A를 전송함으로써 임의 접속을 시작하게 된다.

하지만, 본 연구에서 제안하는 차등화된 2단계 임의 접속 절차는 접속 우선순위를 고려하는 것을 가장 큰 특징으로 하며, 구체적으로 시스템은 접속 우선순위별로 사용해야 하는 프리앰블 집합을 배타적으로(exclusively) 구분해 운영하는 방식과 더불어 각 프리앰블 집합에 사전 대응되어 있는 PUSCH 자원의 양을 다르게 함으로써 접속 우선순위별 성능 차등화를 달성한다.

그림 1은 두 개의 접속 우선순위를 고려한 상황에서 접속 우선순위별 프리앰블 및 사전할당 PUSCH 자원의 대응 관계를 상세히 보여주고 있다. M 개의 프

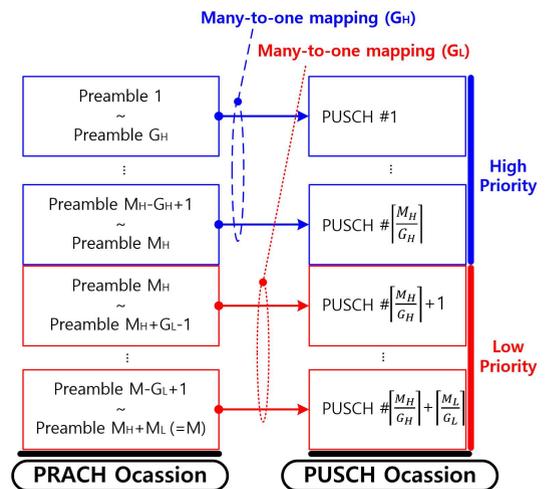


그림 1. 접속 우선순위별 프리앰블 및 사전할당 PUSCH 자원의 다대일 대응 관계
 Fig. 1. Many-to-one mapping relation between several preambles and pre-allocated PUSCH resource based on access priority

리앰블 중 높은 우선순위로 M_H 개의 프리앰블이 할당되고, 낮은 우선순위로 M_L 개의 프리앰블이 할당되었다. 또한, 높은 우선순위로 사용되는 PUSCH 자원 1개에는 G_H 개의 프리앰블로 구성된 집합이 사전 대응되고 있으며, 낮은 우선순위로 사용되는 PUSCH 자원 1개에는 G_L 개의 프리앰블로 구성된 집합이 사전 대응되고 있는 것을 보여주고 있다. M_H 와 M_L 의 분배에 따라 접속 우선순위별 성능 차등화를 일부 달성할 수도 있지만, 본 연구에서는 G_H 와 G_L 의 분배를 추가로 제어함으로써 우선순위별 세밀한 성능 차등화를 달성할 수 있다.

3.2 상향링크 무선 자원할당

2단계 임의 접속 과정에서 접속 우선순위별 성능 차등화를 위해 우선순위별 프리앰블 집합을 결정해야 하며 (예: M_H , M_L), 프리앰블 집합과 PUSCH 자원 사이의 다대일 대응 관계를 결정해야 한다 (예: G_H , G_L). 우선순위 c 에 할당된 프리앰블 집합을 \mathcal{M}_c , 우선순위 c 에 사전 할당된 PUSCH 자원의 집합을 \mathcal{R}_c 일 때, 이때의 대응 관계를 $f_c: \mathcal{M}_c \rightarrow \mathcal{R}_c$ 로 표현할 수 있다. \mathcal{C} 는 고려하는 모든 우선순위의 집합이며, 적절한 $\{f_c \forall c \in \mathcal{C}\}$ 을 찾는 것이 자원할당의 목표가 된다. 즉, 우선순위별 차등화된 프리앰블 집합의 구성하고 각 집합에 PUSCH 자원을 대응시키기 위해, c 의 우선순위가 c' 의 우선순위보다 높은 경우 $G_c > G_{c'}$ 을 만족하도록 다음의 집합을 찾아야 한다.1)

$$\mathcal{G} = \left\{ G_c \forall c \in \mathcal{C} \mid G_c = \frac{|\mathcal{M}_c|}{|\mathcal{R}_c|}, G_c > 0 \right\} \quad (1)$$

문제가 복잡하지 않아 완전 탐색을 통해 쉽게 $\mathcal{M}_c \forall c \in \mathcal{C}$, $\mathcal{R}_c \forall c \in \mathcal{C}$, $G_c \forall c \in \mathcal{C}$ 를 구할 수 있다.

3.3 차등화된 2단계 임의 접속

단계별 자세한 설명은 다음과 같다.

1) 1단계(Step 1) - 우선순위별 Msg A 전송

- 1) 전체 사용 가능한 프리앰블의 집합을 \mathcal{M} , 전체 사용 가능한 PUSCH 자원의 집합을 \mathcal{R} 로 정의할 경우, $\bigsqcup_{c \in \mathcal{C}} \mathcal{M}_c = \mathcal{M}$ 이고 $\bigsqcup_{c \in \mathcal{C}} \mathcal{R}_c = \mathcal{R}$ 이다. 우선순위별로 자원을 독립적으로 사용하기 때문에, 우선순위별 예상 단말 수를 예측하여 목표하는 평균 성능을 달성할 수 있도록 조건부(conditional) 자원 분배를 수행할 수도 있다.

각 단말은 접속 우선순위에 대응되는 프리앰블 집합에서 임의로 선택한 프리앰블을 PRACH로 전송하고, 선택한 프리앰블에 사전 대응되어있는 PUSCH를 통해 연결 요청 메시지를 전송한다.

2) 2단계(Step 2) - Msg B 전송

기지국은 PRACH를 통해 수신된 신호로부터 프리앰블을 검출하고 PUSCH를 통해 수신한 신호로부터 메시지 복호를 시도한다. 프리앰블 검출 및 메시지 복호 현황에 따라 적절한 Msg B(예: Success random access response (RAR), Fallback RAR, No RAR)를 전송한다.

3.4 성능 분석

본 논문에서는 두 개 이상의 단말이 동일한 사전할당 PUSCH 자원을 사용하는 경우를 충돌로 정의하고2), 이때의 임의 접속 충돌 확률을 수학적으로 분석한다3). 접속 우선순위 c 를 갖고 임의 접속을 시도하는 전체 단말의 수를 n_c 로 표기할 때, 특정 임의 접속 채널에서는 $\sum_{c \in \mathcal{C}} n_c$ 개의 단말이 임의 접속을 시도하는 상황이 된다. 접속 우선순위 c 를 갖는 특정 단말 u_c 가 겪는 임의 접속 충돌 확률은 다음의 수식 (2)와 같이 구할 수 있다5).

$$p_c = 1 - \left(1 - \frac{G_c}{M_c} \right)^{n_c - 1} \quad \forall c \in \mathcal{C}. \quad (2)$$

$M_c (= |\mathcal{M}_c|)$ 와 $R_c (= |\mathcal{R}_c|)$ 는 접속 우선순위 c 에 할당된 전체 프리앰블 수와 사용 가능한 사전할당 PUSCH 자원의 양을 나타내며, $G_c = \frac{M_c}{R_c}$ 이다. 기본적으로 프리앰블과 사전할당 PUSCH 자원을 우선순위에 따라 배타적으로(exclusively) 분리하여 사용하고 있으므로, u_c 의 충돌 확률은 전적으로 우선순위 c 와 관련된 변수들(n_c , M_c , R_c , G_c)에 의해서만 결정된다. 상향링크 자원할당 결과인 $\mathcal{M}_c \forall c \in \mathcal{C}$, $\mathcal{R}_c \forall c \in \mathcal{C}$, $G_c \forall c \in \mathcal{C}$ 에 따라 우선순위별로 서로 차등화된 임의 접속 충돌 확률을 겪게 된다.

- 2) 각 단말은 4단계 임의 접속으로 전환(Fallback)하게 된다.
- 3) 본 연구에서는 높은 우선순위를 갖는 단말의 신속한 네트워크 접속을 지원하는 것을 주요 목표로 하고 있으므로, 4단계 임의 접속으로 전환하여 최종 성공 여부를 관찰하는 것보다 2단계 임의 접속의 최초 성공 여부를 관심 있게 살펴보았다.

IV. 성능평가 및 논의

제안 기법의 성능을 평가하기 위해 MATLAB 모의실험을 수행했다. 두 개의 우선순위 $C = \{High, Low\}$ 를 고려하였으며, $|M| = 64$, $|R| = 32$ 인 상황을 고려했다. 본 연구는 소수의 높은 우선순위를 갖는 단말의 임의의 접속 성능을 보장하는 것을 목표로 하고 있으므로, $n_H = 2$ 인 상황을 선택적으로 고려했고⁴⁾, 주로 낮은 우선순위를 갖는 일반 단말의 수인 n_L 의 값을 변화시키며 우선순위별 임의의 접속 충돌 확률을 확인하였다. 즉, 이러한 성능평가 시나리오를 통해 경쟁에 참여하고 있는 전체 단말의 수가 많아지더라도 높은 우선순위를 갖는 단말이 네트워크에 신속하게 접속할 수 있는지를 확인하고자 하였다. 2단계 임의의 접속 절차에서 우선순위를 고려한 다른 기법이 존재하지 않기 때문에, 본 연구에서는 종래의 4단계 임의의 접속에서 서비스별로 성능 차등화를 할 때 주로 사용되었던 자원 분할 기법(resource separation method)을 적용한 2단계 임의의 접속 기법을 비교군으로 활용하고자 한다.⁵⁾ 모든 그래프에서 CRS-H(CRS-L)은 Conventional two-step RA with Resource Separation for high-priority (low-priority)를 의미하고, Prop.-H(Prop.-L)는 Proposed RA for high-priority (low-priority)를 의미한다. 결과 그래프에서 선(line)은 수학적 분석 결과를, 마커(marker)는 모의실험 결과를 나타낸다.

그림 2에서는 임의의 접속을 시도하는 낮은 우선순위의 단말의 수(n_L)에 따른 u_H 와 u_L 의 충돌 확률을 보여주고 있다. n_L 이 증가함에 따라 u_L 의 충돌 확률이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, u_H 는 n_L 개의 단말과는 무관하게 동일 우선순위를 갖는 다른 1개의 단말과 경쟁을 하는 상황이기에, 그래프의 전 영역에서 상수의 값을 갖게 된다. 비교 기법에서는 전체 프리엠블 64개가 32개의 자원에 대응되는 상황이기에, 모든 경우에 대해 우선순위와 관계없이 두 개의 프리엠블이 하나의 PUSCH 자원에 대응된다 (즉, $G=2$). 비교 기법에서는 결과적으로 우선순위별 임의의 접속 성능은 프리엠블 자원의 단순 분배 비율에 따라 결정된다. 제

- 4) 우선순위별로 자원이 배타적으로 구분되어있기 때문에, n_H 의 값이 달라지면 u_L 의 성능은 영향을 받지 않고 오직 u_H 의 성능만 달라진다. 또한, $n_H = 1$ 인 상황에서는 u_H 는 절대 충돌을 겪지 않기 때문에 본 성능평가 시나리오에서는 고려하지 않았다.
- 5) 2단계 임의의 접속만으로는 우선순위별 차등화된 성능을 얻지 못한다.

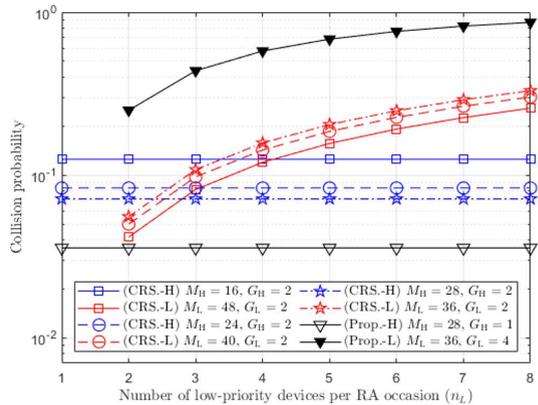


그림 2. 제안 기법과 비교 기법의 우선순위별 임의의 접속 충돌 확률 비교
Fig. 2. Comparison of RA collision probability of each priority between the proposed scheme and the baseline

표 1. $|M| = 64$, $|R| = 32$ 인 상황에서 비교군(자원 분할 기법을 적용한 2단계 임의의 접속 기법)과 제안기법의 자원할당 결과 비교
Table 1. Performance comparison of our proposed technique with the baseline (i.e., two-step RA with resource separation technique) when $|M| = 64$ and $|R| = 32$

구분	M_H	M_L	R_H	R_L	G_H	G_L
비교 군*	16	48	8	24	$2 \left(= \frac{64}{32} \right)$	
	24	40	12	20		
	28	36	14	18		
	30	34	15	17		
제안 기법	16	48	16	16	1	3
	24	40	24	8		5
	28	36	28	4		9
	30	34	30	2		17

* 비교군* : 자원 분할 기법을 적용한 2단계 임의의 접속

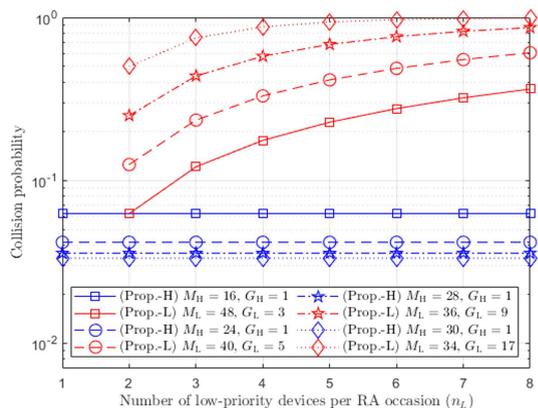


그림 3. 제안 기법의 우선순위별 임의의 접속 충돌 확률
Fig. 3. RA collision probability of each priority of the proposed scheme

안 기법의 경우 우선순위별 다른 사전 대응 값 ($G_H \neq G_L$) 설정이 가능하기에 우선순위별 성능 차등화 효과가 뚜렷한 것을 확인할 수 있다. 표 1에는 가능한 모든 자원할당 조합을 정리하여 보여주고 있다.

그림 3은 표 1에 나열된 제안 기법의 자원할당 결과에 기반해 $n_H = 2$ 인 상황에서 n_L 값을 변화시키며 우선순위별 임의 접속 충돌 확률을 보여주고 있다. 제안 기법에서는 G_H , G_L 값을 추가적으로 자유롭게 설정할 수 있으므로 비교 기법 대비 우선순위별 세밀한 성능 차등화가 가능해지는 것을 확인할 수 있었다.

References

- [1] T. Kim, H. S. Jang, I. Bang, and K. S. Ko, "Access priority provisioning based on random access parallelization for prioritized cellular IoT," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 111814-111822, 2021.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3103123>)
- [2] *RAN Improvements for Machine-type Communications*, 3GPP TR 37.868 V11.1.0, Oct. 2011.
- [3] 3GPP RP-190711, "3GPP Work Item Description, 2-step RACH for NR," Sep. 2019.
- [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," in *IEEE Network*, vol. 35, no. 1, pp. 273-279, Jan./Feb. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000317>)
- [5] 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.2022.47.7.1>)