

셀룰러 IoT를 위한 다중 프리앰블 기반의 차등화된 임의접속 기법

김 유 민*, 송 민 지*, 방 인 규**, 김 태 훈*

Multi-Preamble Based Prioritized Random Access for Cellular IoT

Yumin Kim*, Minji Song*, Inkyu Bang**,
Tae-hoon Kim*

요 약

본 논문에서는 세 가지 접속 우선순위(access priority)를 지원하기 위한 다중 프리앰블 기반의 차등화된 임의접속 기법을 제안한다. 제안 기법은 접속 우선순위에 따라 동시 전송 프리앰블의 수를 차등화하는 것을 주요 특징으로 한다. 다중 프리앰블을 전송할 경우 임의접속 과정에서 다이버시티 효과를 달성할 수 있으므로, 더 많은 프리앰블을 동시에 전송할수록 우수한 임의접속 성능을 기대할 수 있다. 제안 기법을 임의접속 실패확률 관점에서 수학적으로 분석하고, MATLAB 기반의 모의실험을 통해 제안 기법의 유효성을 검증한다.

Key Words : Random Access, Multi-preamble, Access priority

ABSTRACT

In this paper, we propose a multi-preamble based prioritized random access (PRA) for supporting

three access priorities in cellular IoT networks. A key idea is to allow each IoT device to differentiate the number of simultaneously transmitted preambles according to its access priority. We analyze our proposed scheme in terms of the RA failure probability and verify its validity through simulations.

1. 서 론

사물인터넷(IoT)은 4차 산업혁명을 선도하는 중요한 기술 중 하나로 의료, 교육, 복지, 운송, 교통 등의 다양한 산업 분야에서 응용되고 있다¹⁾. 최근, IoT 단말의 대규모 연결성 및 고신뢰/저지연 통신 서비스를 지원하는 5G 시대의 도래로 인하여 IoT 산업 규모는 더욱 커질 것으로 예상된다.

이동통신망을 이용하는 IoT 단말은 생성된 데이터 패킷을 서버로 전송하기 위해 기지국과 무선 통신 링크를 확보해야 하며, 이를 위해 4단계로 구성된 임의접속(random access) 절차를 수행한다. IoT 단말은 수 년 전부터 기하급수적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 발생하는 임의접속 절차에서의 충돌(collision) 문제를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다^{2,3)}. 다양한 IoT 서비스 시나리오가 출몰함에 따라 IoT 단말의 우선순위를 반영할 수 있는 임의접속 기술의 필요성이 증가하고 있지만, 관련 기술에 대한 연구는 여전히 제한적인 상황이다.

최근 임의접속 과정에서 접속 우선순위를 지원하기 위해 전력 기반 차등화 기법⁴⁾, 다중 프리앰블 기반의 차등화 기법이 제안되었으나⁵⁾, 두 선행연구 모두 두 개의 우선순위만을 고려하였다.

본 연구에서는 세 개의 접속 우선순위를 지원할 수 있는 다중 프리앰블 기반의 차등화된 임의접속 기법을 제안한다. 제안 기법은 우선순위에 따라 IoT 단말이 동시에 전송할 수 있는 프리앰블의 수를 차등화하고, 우선순위가 높은 단말이 더 많은 프리앰블을 동시

※ 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).

※ 본 논문의 일부는 한국통신학회 2021년도 하계종합학술발표회('21.06.16.~'21.06.18.)에서 발표되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-7775-1537) Hanbat National University Department of Information and Communication Engineering, 20191831@edu.hanbat.ac.kr, 학생(학사과정), 정회원

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

* (ORCID:0000-0001-7664-4417) Hanbat National University Department of Computer Engineering, 20191777@edu.hanbat.ac.kr, 학사과정

** (ORCID:0000-0001-7109-1999) Hanbat National University Department of Information and Communication Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202108-209-A-LU, Received August 19, 2021; Revised August 29, 2021; Accepted August 29, 2021

에 전송하게 함으로써 임의접속 성능을 차등화한다. 제안 기법을 임의접속 실패확률 관점에서 수학적으로 분석하고, MATLAB 기반의 모의실험을 바탕으로 제안 기법의 유효성을 검증한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 셀 네트워크를 고려하고 있으며, IoT 단말들은 셀 영역 내에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. IoT 서버로 전송할 데이터(패킷)가 생성된 단말은 기지국과의 연결을 위해 임의접속을 시도하게 되며, n 개의 IoT 단말이 특정 임의접속 채널(PRACH)에서 임의접속을 시도하는 상황을 가정한다.

각 단말은 세 가지의 접속 우선순위 중 하나를 선택하여 임의접속을 수행하게 되며, n_h, n_m, n_l 은 각각 높은, 중간, 낮은 우선순위를 갖는 단말의 수이다 (단, $n = n_h + n_m + n_l$). 각 단말은 시스템이 제공하는 M 개의 프리앰블 중 서로 다른 $k \in \{k_h, k_m, k_l\}$ 개의 프리앰블을 선택하여 임의접속을 수행한다. 여기서, k_h, k_m, k_l 는 각각 높은, 중간, 낮은 우선순위를 갖는 단말이 동시에 전송하는 프리앰블의 수를 나타내며, $k_h \geq k_m \geq k_l$ 의 조건을 만족한다. 본 연구에서는 프리앰블 검출과정에서의 미탐지, 오탐지를 고려하지 않는다.

III. 다중프리앰블 기반 차등화된 임의접속 기법

본 장에서는 제안 기법에 대해 설명하고, 제안 기법의 임의접속 실패확률을 수학적으로 분석한다.

3.1 특징 및 절차

제안 기법은 임의접속 병렬화를 통해 달성할 수 있는 임의접속 과정에서의 다이버시티 효과를 이용하고 있으며, 각 단말은 k 개의 프리앰블을 동시에 전송함으로써 임의접속에 참여한다^[3]. 동시에 더 많은 프리앰블을 전송할수록 우수한 임의접속 성능을 보장받을 수 있으므로, 접속 우선순위에 따라 동시 전송 프리앰블의 수를 차등화하여 차등화된 임의접속 성능을 달성할 수 있다. 제안 기법은 4단계로 이루어져 있으며, 각 단계에 대한 설명은 다음과 같다.

- **(1단계) 우선순위 기반 다중 프리앰블 전송:** 각 단말은 접속 우선순위에 따라 M 개의 프리앰블 중 서로 다른 $k \in \{k_h, k_m, k_l\}$ 개의 프리앰블을 선택하여 임의접속 채널에 동시에 전송한다.

- **(2단계) 임의접속 응답:** 기지국은 임의접속 채널을 통해 수신한 신호를 이용하여 어떤 프리앰블이 활성화되었는지 감지한다. 프리앰블 검출 후, 기지국은 임의접속 응답(random access response; RAR)을 생성하여 방송(broadcast)하게 되며, 각 RAR은 프리앰블 인덱스, 시간 정렬 값, 상향링크 허가 정보 등을 가지고 있다. 각 단말은 1단계에서 사용한 k 개의 프리앰블 인덱스와 동일한 인덱스를 가지고 있는 모든 RAR을 수신한다.

- **(3단계) 다중 메시지 전송:** 각 단말은 수신한 RAR 메시지에 포함된 상향링크 허가 정보를 이용하여 3단계 메시지(연결 요청 또는 스케줄링 요청)를 전송한다. 각 단말은 동일한 메시지를 k 개의 자원을 통해 전송하게 된다.

- **(4단계) 승인:** 기지국은 수신된 3단계 메시지를 복호(decoding)하고, 복호에 성공한 패킷에 대하여 승인(acknowledgement) 메시지를 전송한다. 승인 메시지를 수신하지 못한 단말은 백오프 수행 후 임의접속을 재시도한다.

3.2 성능 분석

본 절에서는 제안 기법의 성능을 임의접속 실패 확률(RA failure probability) 관점에서 분석한다. 각 단말이 접속 우선순위에 따라 전송한 $k \in \{k_h, k_m, k_l\}$ 개의 모든 프리앰블이 충돌(collision)을 겪을 때에만 임의접속 실패가 발생한다. 단말 d_o 관점에서 성능 분석을 진행하며, d_o 는 상황에 따라 n_h, n_m, n_l 개의 단말 중 하나이다. 예를 들어, d_o 가 높은 우선순위를 갖는 임의접속을 시도할 경우, $n_h - 1, n_m, n_l$ 개의 단말(총 $n - 1$ 개)과 경쟁을 하게 된다.

높은 우선순위를 갖는 단말의 임의접속 실패확률(p_h)은 k_h 개의 프리앰블 중 q 개의 프리앰블이 충돌을 겪지 않는 사건을 H_q 로 정의하고, 표본 공간 U_h 와 H_0 를 이용하여 구할 수 있다. p_h 는 다음 페이지 상단에 표시된 수식 (1)과 같고^[3], $|U_h|$ 와 $\left| \bigcap_{q=1}^{k_h} H_q \right|$ 는 다음과 같다.

$$|U_h| = \binom{M}{k_h}^{n_h-1} \binom{M}{k_m}^{n_m} \binom{M}{k_l}^{n_l}, \quad (2)$$

$$\left| \bigcup_{q=1}^{k_h} H_q \right| = \sum_{q=1}^{k_h} \binom{M-q}{k_h}^{n_h-1} \binom{M-q}{k_m}^{n_m} \binom{M-q}{k_l}^{n_l} \binom{k_h}{q} (-1)^{q-1}. \quad (3)$$

비슷한 방식으로 p_m 과 p_l 은 각각 중간, 낮은 우선순위를 갖는 단말의 임의접속 실패확률을 나타내며, 다음 페이지 상단에 표시된 각각의 수식 (4), (5)와 같다.

IV. 성능 평가

본 장에서는 MATLAB 기반의 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 검증한다. 시스템에서 제공하는 전체 프리앰블의 수(M)는 64개, 각 접속 우선순위에 할당된 동시 전송 프리앰블 수는 $k_h = 4$, $k_m = 2$, $k_l = 1$ 로 가정하였다. 그림 1에서는 중간 우선순위를 갖는 단말의 수(n_m)는 2로, 낮은 우선순위를 갖는 단말의 수(n_l)를 8로 가정하고 높은 우선순위를 갖는 단말의 수(n_h)를 1~8로 변화시키며 성능을 살펴보았다. 그림 2에서는 $n_h = 1$, $n_l = 8$ 을 가정하고 n_m 을 1~8로 변화시키며 성능을 살펴보았다. 마지막으로, 그림 3은 대부분의 단말의 우선순위가 낮고 일부 단말의 우선순위가 높은, 많은 상황에서 마주하게 될 것으로 예상되는 시나리오를 고려하여 변수를 설정하였다. 즉, $n_h = 1$, $n_m = 2$ 를 가정하고, n_l 을 1~8로 변화시키며 성능을 살펴보았다. 모든 결과 그래프에서 종래의 임의접속 기법을 비교 기법으로 사용하였다.

그림 1은 n_h 에 따른 임의접속 실패확률(p_h, p_m, p_l)을, 그림 2는 n_m 에 따른 임의접속 실패확률을, 그림 3은 n_l 에 따른 임의접속 실패확률을 보여준다. 모든

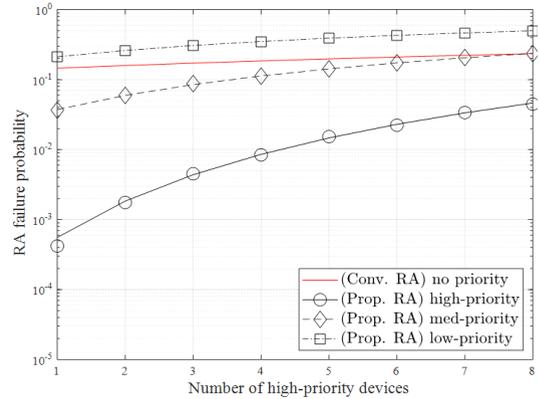


그림 1. 높은 우선순위를 갖는 단말 수의 변화에 따른 임의접속 실패확률
Fig. 1. RA failure probability for varying n_h

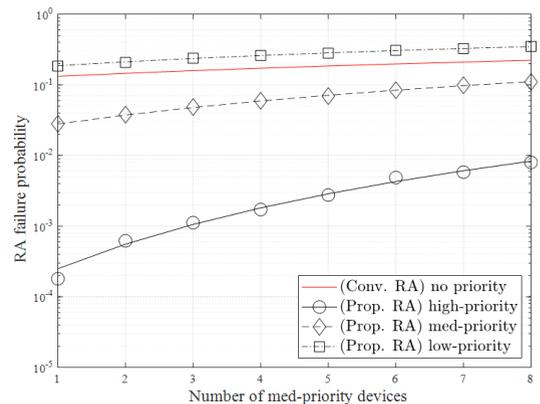


그림 2. 중간 우선순위를 갖는 단말 수의 변화에 따른 임의접속 실패확률
Fig. 2. RA failure probability for varying n_m

결과 그래프에서 각 실선은 수식 (1), (4), (5)를 이용하여 도식한 이론적인 결과이며, 마커는 모의실험 결과이다. 모의실험을 통해 수학적 접근법이 타당하다는

$$p_h = \frac{|H_0|}{|U_h|} = \frac{\left| U_h - \bigcup_{q=1}^{k_h} H_q \right|}{|U_h|} \quad (8)$$

$$= \sum_{q=0}^{k_h} (-1)^q \left(\frac{(M-k_h)!(M-q)!}{(M-q-k_h)!M!} \right)^{n_h-1} \left(\frac{(M-k_m)!(M-q)!}{(M-q-k_m)!M!} \right)^{n_m} \left(\frac{(M-k_l)!(M-q)!}{(M-q-k_l)!M!} \right)^{n_l} \binom{k_h}{q}. \quad (9)$$

$$p_m = \sum_{q=0}^{k_m} (-1)^q \left(\frac{(M-k_h)!(M-q)!}{(M-q-k_h)!M!} \right)^{n_h} \left(\frac{(M-k_m)!(M-q)!}{(M-q-k_m)!M!} \right)^{n_m-1} \left(\frac{(M-k_l)!(M-q)!}{(M-q-k_l)!M!} \right)^{n_l} \binom{k_m}{q}. \quad (4)$$

$$p_l = \sum_{q=0}^{k_l} (-1)^q \left(\frac{(M-k_h)!(M-q)!}{(M-q-k_h)!M!} \right)^{n_h} \left(\frac{(M-k_m)!(M-q)!}{(M-q-k_m)!M!} \right)^{n_m} \left(\frac{(M-k_l)!(M-q)!}{(M-q-k_l)!M!} \right)^{n_l-1} \binom{k_l}{q}. \quad (5)$$

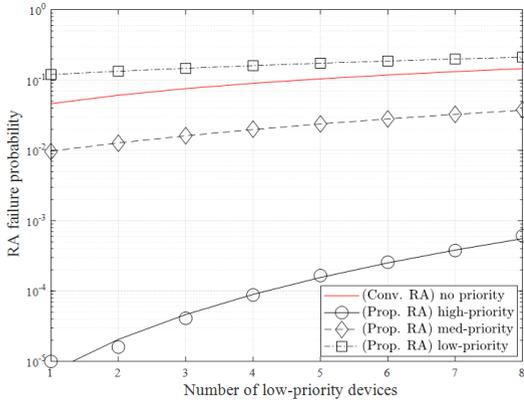


그림 3. 낮은 우선순위를 갖는 단말 수의 변화에 따른 임의접속 실패확률
 Fig. 3. RA failure probability for varying n_l

것을 확인할 수 있었다. 종래의 기법은 우선순위를 제공하는 기능이 없으므로 모든 단말이 우선순위와 관계없이 동일한 성능을 내는 것을 확인할 수 있었다. 우선순위에 따라 동시 전송 프리앰블의 수를 차등화한 결과, 예상대로 임의접속 성능도 차등화되어 임의접속 단계에서도 우선순위를 지원하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 임의접속 성능 차등화 기능은, 낮은 우선순위를 갖는 단말의 임의접속 성능 희생을 통해 제공되는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 셀룰러 IoT 네트워크에서 세 개의 접속 우선순위를 지원하기 위하여, 우선순위에 따라 동시 전송 프리앰블을 차등화하는 차등화된 임의접속 기법을 제안하였다. 제안 기법을 임의접속 실패확률 관점에서 수학적으로 분석하고, MATLAB을 이용한 모의실험을 통해 타당성을 검증하였다.

References

- [1] W. Ejaz, et al., "Internet of things (IoT) in 5G wireless communications," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 10310-10314, 2016.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] J. Choi, "Random access with layered preambles based on NOMA for two different types of devices in MTC," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 871881, Feb. 2021.
- [5] T. Kim and I. Bang, "Prioritized random access for 5G IoT networks," in *Proc. KICS*, pp. 1259-1259, 2021.