

자원 효율적 임의접속 병렬화를 위한 프리앰블 중복 제거 기법

김태훈*, 조건웅*, 방인규^o

Preamble Redundancy Elimination Technique for Resource-Efficient Random Access Parallelization

Tachoon Kim*, Gunwoong Jo*, Inkyu Bang^o

요약

본 논문에서는 임의접속 병렬화 기법의 자원 효율 향상을 위한 프리앰블 중복 제거 기법을 제안한다. 제안 기법은 프리앰블 검출 단계에서 전력 지연 프로파일이 유사한 프리앰블들을 동일한 단말이 전송한 프리앰블로 간주하여 필요 이상의 임의접속 응답이 생성되는 것을 방지하고 이를 통해 임의접속 병렬화 기법의 자원 효율을 향상시킨다. 성능 평가를 통해 제안 기법의 우수성을 검증한다.

Key Words : Random Access, Parallelization, Preamble Redundancy Elimination, RA Failure Probability, Resource Efficiency

ABSTRACT

In this paper, we propose a preamble redundancy elimination technique to improve resource efficiency of random access parallelization (RAP). Based on the power delay profile (PDP) captured during the preamble detection phase, the base station can distinguish multiple preamble signatures transmitted

from the identical terminal and thus avoid to send multiple redundant random access responses (RARs) to the corresponding terminal. Through simulations, we verify the effectiveness of our proposed technique for improving resource efficiency during the random access parallelization.

I. 서론

최근 5세대 이동통신의 상용화와 함께, 가상·증강 현실, 사물인터넷(IoT), 스마트 운송 등의 다양한 애플리케이션들이 이동통신망과 결합되어 서비스 될 것으로 예상되고 있다¹⁾. 이동통신망의 다양한 서비스를 이용하는 단말의 수는 전례 없이 증가할 것으로 예상되며²⁾, 이를 지원하기 위한 5세대 이동통신 인프라 구축 및 연구가 지속적으로 진행 중에 있다.

이동통신망을 이용하는 단말은 기지국과의 무선 통신 링크를 확보하기 위해, 4단계로 구성된 임의접속 (random access; RA) 절차를 수행한다. 각 단말은 시스템이 제공하는 프리앰블 집합 중 1개의 프리앰블을 임의로 선택하여 임의접속 채널에 전송함으로써 임의접속 절차를 시작한다. 이때, 다수의 단말이 동일한 프리앰블을 선택하게 되면 프리앰블 충돌이 발생하고 자원 충돌로 이어져 자원 낭비가 발생하게 된다. 경쟁 기반으로 운영되는 시스템의 특성으로 인하여, 임의접속을 시도하는 단말의 수가 많아질수록 충돌로 인한 자원 낭비 문제는 심각해진다.

임의접속 충돌 문제를 개선하기 위해 수년 동안 많은 연구가 수행되었으며³⁻⁵⁾, 대표적으로 임의접속 3단계 메시지(연결 요청 메시지 등)를 보내는 과정에서 파일럿 신호 선택에 자유도를 부여하여 공간 영역 (spatial domain)에서 안테나 기술 기반으로 충돌을 해결하는 시도도 있었으며³⁾, 비직교 프리앰블 구조를 도입하여 경쟁 자원을 늘려 충돌 발생 빈도를 직접적으로 낮추는 시도도 있었다⁴⁾. 또한, 단말이 임의접속 1단계에서 전송하는 프리앰블 수의 제약을 완화하여 다수의 프리앰블을 동시에 전송할 수 있게 함으로써

* 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).

• 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 Information and Communication Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원

* (ORCID 0000-0001-9119-0396) Hanbat National University Department of Computer Engineering, 20171630@edu.hanbat.ac.kr, 학생(학사과정)

논문번호 : 202108-210-A-LU, Received August 19, 2021; Revised September 8, 2021; Accepted September 14, 2021

(즉, 1개 → k 개) 임의접속 실패확률을 획기적으로 낮추는 임의접속 병렬화 기법이 제안된 바 있는데⁵⁾, 임의접속 병렬화 기법은 근본적으로 다수의 임의접속을 병렬적으로 동시에 수행하는 것이기 때문에, 추가적인 무선 자원이 필요하다는 제약사항이 존재한다.

본 논문에서는 임의접속 병렬화 기법의 자원 효율 향상을 위해 프리엠블 중복 제거 기법을 새롭게 제안한다. 제안 기법은 전력 지연 프로파일이 유사한 프리엠블들을 동일한 단말이 전송한 것으로 간주하여 필요 이상의 임의접속 응답을 생성하는 것을 방지하고, 이로 인한 추가적인 무선 자원 소모를 줄이는 것을 핵심으로 한다. 본 논문에서는 제안 기법의 주요 특징, 절차를 설명하고, MATLAB 기반의 성능 평가를 통해 제안 기법의 우수성을 검증한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 IoT 단말이 균일하게 분포한 단일 셀 네트워크를 가정한다. 전체 IoT 단말 중 상향링크로 전송할 데이터(패킷)가 있는 단말을 활성화(Active)된 단말이라고 일컬으며, N 개의 활성화된 IoT 단말이 특정 임의접속 채널(physical random access channel; PRACH)에서 임의접속을 시도하는 상황을 고려한다. 각 단말은 임의접속 병렬화를 수행할 수 있으며, 시스템이 제공하는 M 개의 프리엠블 중 서로 다른 k 개의 프리엠블을 임의로 선택하여 임의접속을 수행한다⁵⁾. 본 논문에서는 프리엠블 검출 과정에서의 미탐지, 오탐지를 고려하지 않는다.¹⁾

III. 제안 기법

각 단말은 k 개의 프리엠블을 동시에 전송함으로써 임의접속을 시작한다 (k 개의 임의접속을 병렬적으로 수행). k 개의 프리엠블은 임의접속 채널을 통해 기지국에 도달하기까지 동일한 무선채널을 경험하게 된다. 기지국은 프리엠블을 검출하기 위해 임의접속 채널을 통해 수신한 신호의 전력 지연 프로파일(power delay profile; PDP)을 계산하며, 수신한 모든 프리엠블이 경험한 무선 채널 상황을 PDP를 통해 파악할 수 있다⁶⁾. 특정 단말이 동시에 전송한 k 개의 프리엠블이 동일한 무선 채널을 겪고 기지국에 도달하기 때문에, 프

리엠블 충돌이 발생하지 않는 이상적인 상황에서는 동일 단말에서 전송된 프리엠블의 전력 지연 프로파일은 매우 유사한 형태를 보일 것이다. 따라서 전력 지연 프로파일이 유사하다는 것으로부터, 해당 프리엠블은 동일한 단말이 전송했다는 것과 다른 단말이 전송한 프리엠블과 충돌을 겪지 않았다는 것을 합리적으로 유추할 수 있다. 이러한 사실에 기반하여, 기지국은 임의접속 응답(random access response; RAR) 메시지를 선별적으로 전송하여 추가적인 무선 자원 소모를 피할 수 있다. 그림 1은 4단계로 구성된 제안 기법의 절차로, 단말 1과 단말 2가 임의로 선택된 3개의 프리엠블을 동시에 전송함으로써 임의접속을 수행하고 있는 것을 예시로 나타내고 있다. 각 단계에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

· **(1단계) 다중 프리엠블 전송** : 각 단말은 M 개의 프리엠블 중에서 서로 다른 k 개의 프리엠블을 임의로 선택하여 임의접속 채널을 통해 기지국으로 동시에 전송한다. 단말 n 이 전송한 k 개의 프리엠블의 집합 \mathbf{X}_n 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{X}_n = \{\mathbf{x}_{n,1}, \dots, \mathbf{x}_{n,k}\} \tag{1}$$

· **(2단계) 프리엠블 중복제거 기반의 임의접속 응답** : 기지국은 임의접속 채널을 통해 수신된 신호를 이용하여 어떤 프리엠블이 수신되었는지 검증한다. 기지국이 수신한 신호 \mathbf{y} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \sum_{n \in \Omega} h_n \sqrt{P_{n,k}} \sum_{k=1}^k \mathbf{x}_{n,k} + \mathbf{w} \tag{2}$$

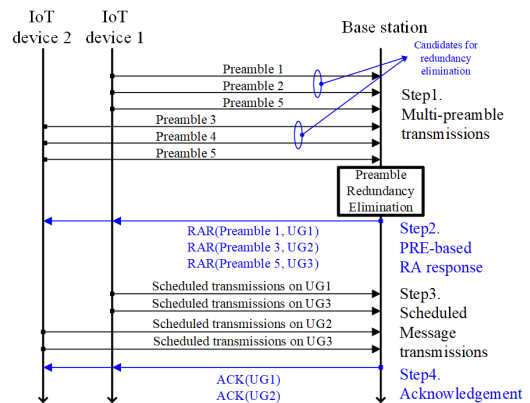


그림 1. 프리엠블 중복 제거 기법이 적용된 임의접속 병렬화 절차
Fig. 1. Procedure of random access parallelization with preamble redundancy elimination

1) k 개의 프리엠블을 전송할 때, 각 프리엠블에 실리는 전송 전력은 $1/k$ 배가 된다. 이는 프리엠블의 미검출 확률에 영향을 미칠 수 있으므로 k 값 선택 시 유의해야 한다.

여기서, Ω 는 임의접속을 시도하는 단말의 집합이며, h_n 은 단말 n 과 기지국 사이의 채널 계수, $P_{n,k}$ 는 단말 n 의 k 번째 프리앰블 전송 전력, \mathbf{w} 는 백색잡음을 나타낸다. 기지국은 자도프추수열 기반의 기준 신호 \mathbf{r}_{zc} 를 이용하여 수신 신호의 PDP를 수식 (3)과 같이 구하게 되며, PDP를 M 개의 프리앰블 검출 영역 (preamble detection zone; PDZ)으로 나누어 각 프리앰블의 수신 여부를 판단한다.

$$PDP = |\mathbf{c}_{\mathbf{y},\mathbf{r}_{zc}}|^2, \quad (3)$$

$$= \bigsqcup_{m \in M} PDZ_m \quad (\text{단, } PDZ_m \cap PDZ_n = \emptyset, \forall m, n)$$

여기서, $\mathbf{c}_{\mathbf{y},\mathbf{r}_{zc}}$ 는 \mathbf{y} 와 \mathbf{r}_{zc} 사이의 상관(correlation)을 나타낸다. PDZ_{*m*}(즉, *m*번째 PDZ)에서 일정 수준의 수신 신호 세기가 관측되면, 단말(들)이 *m*번째 프리앰블을 전송한 것으로 판단한다. 제안 기법에서는 각 PDZ에서 검출된 프리앰블 신호 사이의 유사성을 계산하여, 동일한 단말이 전송했다고 판단되는 여러 개의 프리앰블에 대해서는 하나의 대표 RAR을 전송함으로써 2단계 ~ 4단계에서 추가적인 자원 소모를 피할 수 있게 된다. 프리앰블 검출 결과 사이의 유사성을 판단하기 위하여 평균 제곱 오차를 도입하였고, 그 값이 결정 경계(decision boundary) γ 보다 작을 경우 유사하다고 판단한다. 알고리즘 1은 프리앰블 중복 제거 기법의 의사코드(pseudo code)를 보여준다.

각 RAR은 프리앰블 인덱스, 시간정렬 값, 상향링크 허가 정보 등으로 구성된다. 단, 임의접속 병렬화로 인해 각 단말은 1단계에서 이용한 *k*개의 프리앰블 인덱스와 동일한 인덱스를 가지고 있는 최대 *k*개의 RAR을 수신하여 다음 절차를 진행하게 된다. 프리앰블 중복 제거가 하나도 수행되지 않은 경우에는 *k*개의 RAR을 수신하게 되지만, 최상의 경우에는 1개의 RAR을 수신하는 형태가 되는 것을 주목할 필요가 있다.

- (3단계) 메시지 전송: 각 단말은 수신한 RAR이 가지고 있는 상향링크 자원을 이용하여 메시지(연결 요청 또는 스케줄링 요청)를 전송한다. 이 때, 수신한 RAR의 개수에 따라 최대 *k*개의 자원을 이용하여 동일한 메시지를 여러 번 전송하게 된다.
- (4단계) 승인: 기지국은 수신한 메시지를 디코딩하고, 성공적으로 디코딩된 패킷에 대하여 승인 메시지를 전송한다. 승인 메시지를 수신하지 못한 단말

은 백오프 후 임의접속 절차를 재시도 한다.

그림 2는 프리앰블 검출 단계에서 기지국이 계산한 전력 지연 프로파일을 보여주고 있으며, 단말 1이 1번, 2번, 5번 프리앰블을 동시에 전송했고, 단말 2가 3번, 4번, 5번 프리앰블을 동시에 전송한 상황이다 (그림1과 동일한 시나리오). 결과적으로, 프리앰블 1번 ~ 4번은 충돌을 겪지 않았기 때문에, 동일한 단말이 전송한 프리앰블 사이에서는 매우 유사한 결과를 보이는 것을 보여주고 있으며, 두 단말이 동시에 이용한 프리앰블 5번에서는 완전히 다른 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 기지국이 프리앰블 1번, 2번이 동일한 단말이 전송했다고 판단할 경우, 하나의 임의접속 응답을 생성하게 된다. 본 예제에서는, 제안 기법을 이용할 경우 3개의 임의접속 응답이 생성되는 것을 예상할 수 있고, 종래의 기법 또는 임의접속 병렬화 기법을 이용할 경우에는 5개의 임의접속 응답이 생성되는 것을 예상할 수 있다.

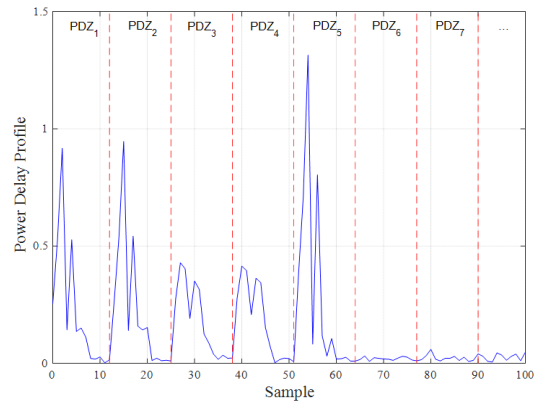


그림 2. 프리앰블 검출 단계에서의 전력 지연 프로파일
Fig. 2. Power delay profile during preamble detection

알고리즘 1. 프리앰블 중복 제거 기법

```

for i = 1 : M
  for j = i : M
    if PDZi is ACTIVE
      if MSE(PDZi, PDZj) < γ
        /* MSE: Mean Squared Error */
        PDZj → CLEAR
      end if
    end if
  end for
end for
    
```

IV. 성능 평가

본 장에서는 제안 기법의 성능을 검증하기 위해 MATLAB 기반의 모의실험을 진행한다. 시스템에서 제공하는 전체 프리앰블 수(M)는 64로 가정하였고, 동시에 전송하는 프리앰블 수(k)는 1~3을 고려하였다. 임의접속을 시도하고 있는 단말의 수(N)를 1~10으로 변화시키며 임의접속 실패 확률과 자원 효율 관점에서 성능을 평가하였다. 제안 기법의 비교 기법으로 종래의 임의접속 기법(Baseline)과 임의접속 병렬화 기법(RA parallelization; RAP)을 사용하였다⁵⁾. 제안 기법은 Enhanced RAP with preamble redundancy elimination (ERAP-PRE)로 표기하였다.

그림 3은 N 에 따른 임의접속 실패확률을 보여주고 있으며, 한 단말이 전송한 k 개의 모든 프리앰블이 프리앰블을 충돌을 겪는 사건을 임의접속 실패로 정의하였다⁵⁾. 제안 기법은 자원 효율 개선을 목표로 했기 때문에 다양한 k 값에 대해 RAP와 동일한 임의접속 실패확률을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 단말의 수가 많아지는 상황에서 k 값을 키우는 것은 임의접속 채널에 혼잡을 발생시킬 수 있으며, 그로 인해 N 이 커짐에 따라 k 가 커질수록 성능 이득이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 제안 기법을 효과적으로 활용하기 위해서는 임의접속을 시도하는 단말의 수를 모니터링하며 k 값을 유의하여 설정할 필요가 있다. 제안 기법은 $k=1$ 일 경우에 Baseline과 동일한 성능을 낸다⁵⁾.

그림 4는 N 에 따른 자원 효율을 보여주고 있으며, 자원 효율은 임의접속 응답으로 인해 할당된 자원의 양에 대한 임의접속에 성공한 단말의 수로 정의하였

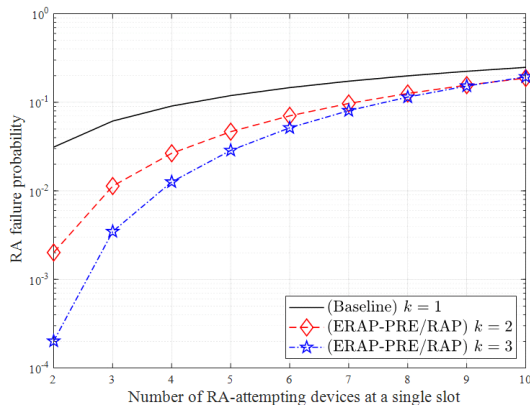


그림 3. 단말의 수에 따른 임의접속 실패확률
Fig. 3. RA failure probability for varying N

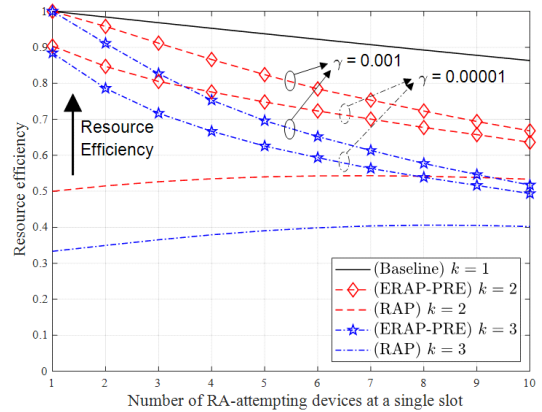


그림 4. 단말의 수에 따른 자원 효율
Fig. 4. Resource efficiency for varying N

다³⁾. 종래의 임의접속 기법은 임의접속 실패확률이 상대적으로 높지만 (그림 3 참고), 다른 기법에 비해 상대적으로 우수한 자원 효율을 보인다. 임의접속 병렬화 기법의 경우는 약 k 배의 자원을 필요로 하므로 낮은 자원 효율을 보인다. 제안 기법은 프리앰블 중복 제거 기법을 통해 임의접속 응답(RAR) 수를 줄일 수 있으므로 임의접속 병렬화 기법 대비 우수한 자원 효율을 보인다. 프리앰블 검출 결과의 유사도를 결정하는 γ 의 값에 따라 성능이 달라지며, γ 가 작을 경우에는 동일한 단말이 전송한 프리앰블일지라도 중복으로 인식되지 않는 경우가 발생할 수 있다. 각 단말의 프리앰블 전송전력, 잡음 상황 등에 따라 γ 값은 주의하여 설정되어야 한다.

V. 결론

본 논문에서는 임의접속 병렬화의 자원 효율을 개선하기 위해 프리앰블 제거 기법을 제안하였다. 프리앰블 검출 단계에서 유사도가 높은 프리앰블을 동일한 단말이 전송한 것으로 간주하여, 필요 이상의 임의접속 응답 생성을 피하는 것을 핵심으로 한다. 제안 기법은 기존의 임의접속 병렬화 기법과 동일한 임의접속 실패확률을 달성하지만, 임의접속 병렬화 기법 대비 보다 자원 효율적으로 동작할 수 있음을 모의실험을 통해 검증하였다.

References

[1] J. G. Andrews, et al., "What will 5G be?," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32,

no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.

- [2] J. Höller, et al., "From machine-to-machine to the internet of things - introduction to a new age of intelligence," *Elsevier*, 2014.
- [3] T. Kim, et al., "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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] T. Kim and I. Bang, "An enhanced random access with preamble-assisted short-packet transmissions for cellular IoT communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 6, pp. 1081-1084, Jun. 2019.