DBpia

논문 21-46-12-08 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '21-12 Vol.46 No.12
https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.12.2167

간섭제거 기반의 개선된 임의접속 병렬화 기법

김 태 훈•, 이 재 경*, 방 인 규°

Enhanced Random Access Parallelization Based on Interference Cancellation

Taehoon Kim•, Jaekyeong Lee*, Inkyu Bang°

요 약

본 논문에서는 간섭제거 기반의 개선된 임의접속 병렬화 기법을 제안한다. 임의접속 병렬화 기법은 임의접속 과정에서 각 단말이 동일한 메시지(연결 요청 또는 스케줄링 요청 메시지)를 다수 개 전송하게 하여 다이버시티 기반으로 기존의 임의접속 실패확률을 줄이는 기법이다. 제안 기법은 이러한 임의접속 병렬화 과정에서 각 단말이 전송하게 되는 다수의 동일한 메시지 중 기지국에서 성공적으로 복호되는 메시지를 간섭제거에 활용하여 다른 단말의 임의접속 실패확률을 추가적으로 낮추는 것을 핵심으로 한다. 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 임의접속 실패확률 관점에서 평가하고 제안 기법의 우수성을 검증한다.

Key Words : Random Access, Parallelization, Interference Cancellation, RA Failure Probability, Performance Improvement

ABSTRACT

In this paper, we propose an enhanced random access parallelization (RAP) technique based on interference cancellation. In the proposed scheme, the base station (BS) does not discard the collided messages (i.e., Step3 messages) during the random access (RA) and attempts to recover them via interference cancellation operations. Through simulations, we verify the superiority of our proposed scheme in terms of the RA failure probability.

Ⅰ. 서 론

이동통신망(LTE, 5G 등)을 이용하는 모든 단말은 기지국과 통신하기 위해 4단계로 구성된 임의접속(random access; RA) 절차를 수행하여 기지국과 연결(connected) 상태가 되어야 한다[1]. 각 단말은 시스템이 제공하는 프리앰블 집합 중 하나의 프리앰블을 임의로 선택하고 이를 임의접속 채널에 전송함으로써 임의접속 절차를 시작한다. 그러나 각 단말이 프리앰블을 선택하는 과정의 임의성(randomness)으로 인하여 충돌 문제(collision problem)가 발생할 수 있다[2]. 이동통신망이 지원하는 서비스 시나리오가 다양해짐에 따라, 이동통신망에 연결되는 단말의 수가 기하급수적으로 증가하고 있으며, 임의접속 과정에서의 충돌 문제는 더욱 심각해질 것으로 예상된다.

임의접속 병렬화 기법은 각 단말이 다수의 임의접속을 동시에 수행하도록 하는 임의접속 기법이다. 구체적으로 임의접속 병렬화 기법은 단말이 다수의 임의접속의 3단계 메시지(연결 요청 또는 스케줄링 요청 메시지)를 전송하도록 하여 임의접속 실패확률을 낮춘다[3]. 이 과정에서 다수의 동일한 메시지 중 성공적으로 복호되는 메시지가 하나라도 존재할 경우, 기지국은 해당 메시지를 다른 자원을 통해 수신했지만 충돌로 인하여 복호에 실패했던 신호에서 차감하여 다시 복호를 시도하고, 이는 다른 단말 임의접속의 성공으로 이어질 수 있다[4].

본 논문에서는 간섭제거 기반의 개선된 임의접속

※ 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
° Corresponding Author : (ORCID: 0000-0001-7109-1999) Hanbat National University Department of Information and Communication Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 조교수, 정회원
* (ORCID 0000-0003-0561-0185) Hanbat National University Department of Computer Engineering, 20167093@edu.hanbat.ac.kr, 학생(학사과정)
논문번호 : 202109-226-A-LU, Received September 8, 2021; Revised September 12, 2021; Accepted September 13, 2021

www.dbpia.co.kr

병렬화 기법을 제안한다. 제안 기법의 주요 특징, 절차를 상세히 서술하며, 모의실험을 통해 제안 기법의 우수성을 임의접속 실패확률 관점에서 검증한다.

Ⅱ. 시스템 모델

본 논문에서는 시스템 모델로 단일 셀 환경을 가정한다. 전체 단말 중 일부가 기지국과 통신을 하기 위해 임의접속 절차를 시작한다고 가정한다. 특정 임의접속 채널에서 임의접속을 시도하고 있는 단말의 수를 N으로 가정한다. 각 단말은 시스템이 제공하는 M개의 프리앰블 중 서로 다른 k개의 프리앰블을 임의로 선택하고 이를 동시에 전송함으로써 임의접속 병렬화를 시도한다. 기지국은 임의접속 과정에서 수신한 3단계 메시지(연결 요청 또는 스케줄링 요청 메시지)를 복호하는 과정에서, 복호에 성공한 메시지를 활용하여 간섭제거(interference cancellation)를 시도할 수 있다고 가정한다[4]. 마지막으로, 본 논문에서는 매체접근 제어(medium access control; MAC) 계층 관점에서의 성능 개선 여부가 주요 논의사항이기 때문에, 프리앰블 검출 오류(미탐지, 오탐지), 간섭제거 오류 전파 등의 물리 계층 현상은 이상적이라고 가정한다.

Ⅲ. 제안 기법

본 장에서는 제안 기법의 주요 특징을 서술하고, 간섭제거 기반으로 개선된 임의접속 병렬화 기법에 대해 설명한다.

각 단말은 임의접속 1단계에서 k개의 프리앰블을 동시에 전송함으로써 병렬화를 시도하며, 결과적으로 각 단말은 임의접속 3단계에서 k개의 상향링크 자원을 이용하여 동일한 메시지(연결 요청 메시지)를 전송한다. 기지국은 k개의 자원 중 충돌을 겪지 않은 k_s개의 자원으로부터 성공적으로 메시지를 복호한다. 그러나, 다른 단말이 전송한 메시지와 충돌을 겪은 k_c개의 자원에서는 메시지 복호를 실패하게 된다. 이때, 기지국은 k_s개의 자원으로부터 성공적으로 복호된 메시지 성분을 k_c개의 자원에서 제거한 후 잔여 신호(residual signal)를 이용하여 다시 한번 복호를 시도한다. 이때, 일부 자원에서 메시지가 성공적으로 복호될 수 있다.

예를 들어, 임의접속 3단계에서 단말 1은 2개의 3단계 메시지를 자원 A와 자원 B를 이용하여 전송하고, 단말 2는 1개의 3단계 메시지를 자원 B를 통해 전송한 상황을 가정해보면, 각 자원에서의 수신 신호 $\mathbf{y}_i(i\in\{A,B\})$는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_A = \mathrm{h}_1\mathbf{x}_1 + \mathbf{w} \tag{1}$$

$$\mathbf{y}_B = h_1\mathbf{x}_1 + h_2\mathbf{x}_2 + \tilde{\mathbf{w}} \tag{2}$$

여기서, $\mathbf{x}_n(n\in\{1,2\})$는 각 단말이 전송한 메시지, $h_n(n\in\{1,2\})$는 각 단말의 채널 계수, $\mathbf{w}$, $\tilde{\mathbf{w}}$는 백색 가우시안 잡음을 나타낸다.

종래의 충돌 모델을 이용한다면 단말 2의 메시지는 수식 (2)와 같이 충돌을 겪기 때문에 일반적으로는 복호될 수 없다. 하지만, 자원 A에서 복호된 메시지를 자원 B의 수신 신호에서 차감해준 후 복호를 재시도할 경우에는 단말 2의 메시지가 복구될 수 있으며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_B - \mathbf{y}_A = h_2\mathbf{x}_2 + \overline{\mathbf{w}} \tag{3}$$

여기서, $\overline{\mathbf{w}}=\tilde{\mathbf{w}}-\mathbf{w}$이며, $\overline{\mathbf{w}}$도 $\mathbf{w}$, $\tilde{\mathbf{w}}$와 동일한 분포를 갖는 백색 가우시안 잡음이다.

제안 기법은 4단계의 핸드셰이킹 절차로 구성되며 각 단계의 구체적인 설명은 다음과 같다.

- **(1단계) 다중 프리앰블 전송** : 각 단말은 M개의 프리앰블 중에서 임의로 선택한 서로 다른 k개 프리앰블을 임의접속 채널을 통해 기지국으로 동시에 전송한다.
- **(2단계) 임의접속 응답** : 기지국은 임의접속 채널을 통해 수신된 신호로부터 프리앰블을 검출하고, 검출된 프리앰블로부터 임의접속 응답(RA response; RAR)을 생성한다. 각 RAR은 프리앰블 인덱스, 상향링크 허가 정보(uplink grant; UG) 등을 포함하고 있는데, 프리앰블 인덱스는 각 단말이 RAR의 목적지를 식별하는데 활용되고, UG는 RAR을 수신한 단말에 한하여 3단계 메시지를 전송하기 위해 사용된다. 각 단말은 기지국이 방송(broadcast)하는 모든 RAR 중 1단계에서 사용한 프리앰블 인덱스를 포함하고 있는 k개의 RAR을 수신하여 추후 절차를 진행한다.
- **(3단계) 다중 메시지 전송**: 각 단말은 전송하고자 하는 메시지(연결 요청 메시지)의 복제본(replica)을 k개 생성하고, 2단계에서 수신한 k개의 RAR에 포함된 UG가 가리키고 있는 k개의 무선 자원을 이용하여 생성한 메시지를 전송한다. 결과적으로, 동일한 메시지가 k개의 자원을 통해 전송된다.

www.dbpia.co.kr

알고리즘 1. 간섭제거 기반 복호화

<변수>
U: 기지국이 할당한 상향링크 자원을 통해 수신한 모든 메시지 집합
S: 성공적으로 복호된 메시지 집합 ($SSUBSETU$)
O: 간섭제거 후 성공적으로 복호된 메시지 집합 ($S \subset O \subset U$)
D_j: 성공적으로 복호된 메시지 j ($D_j \in S$)
UG_i: 상향링크 자원 i를 통해 수신한 메시지
DEC(·): 복호화 함수

$O = S$ // O 초기화
for i = 1 : 1 : $|U \setminus S|$
  for j = 1 : 1 : $|S|$
    // 두 개의 메시지가 UG_i에서 충돌 난 경우
    if DEC(UG_i - D_j) → D_i **then**
      $O = O \cup \{D_i\}$
    else // 세 개의 메시지가 UG_i에서 충돌 난 경우
      for k = 1 : 1 : $|S|$
        if DEC(UG_i - D_j - D_k) → D_i **then**
          $O = O \cup \{D_i\}$
        end if
      end for
    end if
  end for
end for
Broadcast O as acknowledgement messages

· **(4단계) 간섭제거 기반 복호화 및 승인**: 기지국은 수신한 메시지를 복호한다. 알고리즘 1과 같이 복호에 성공한 메시지를 이용하여 간섭제거를 반복적으로 시도한다. 네트워크가 혼잡 상황일지라도 임의접속 과정에서 4개 이상의 단말이 충돌로 인하여 동일한 자원을 이용하게 되는 경우는 극히 드물게 발생하기 때문에, 알고리즘의 경량화를 위해 알고리즘 1에서는 2개 또는 3개의 단말이 동일한 자원을 이용한 경우에 대해서만 간섭제거를 시도한다. 성공적으로 복호된 메시지에 대하여 승인 메시지를 전송한다. 승인 메시지를 수신하지 못한 단말은 백오프 후 임의접속 절차를 재시도한다.

Ⅳ. 성능 평가

본 장에서는 MATLAB 기반의 모의실험을 통해 제안 기법의 성능을 검증한다. 그림 1은 $M = 32$, $k = 1, 2, 4$인 상황에서, N을 1~20으로 변화시키며 임의접속 실패확률을 보여주고 있다. 여기서, 특정 단말

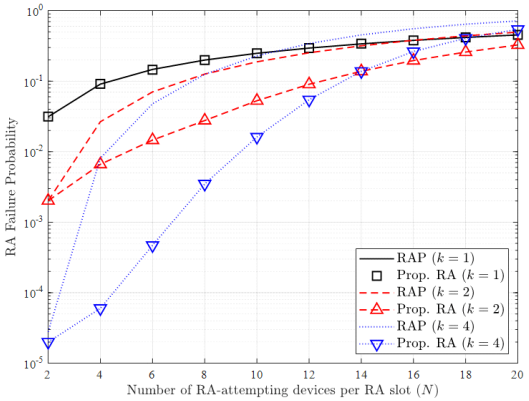

그림 1. 임의접속 시도 단말 수의 변화에 따른 임의접속 실패 확률
Fig. 1. RA failure probability for varying the number of RA-attempting devices per RA slot

이 전송하게 되는 k개의 임의접속 3단계 메시지가 모두 충돌을 겪어 1개의 메시지도 복호가 되지 않는 사건을 임의접속 실패로 정의하였다[3].

$k = 1$인 경우에는, 각 단말이 다수의 메시지를 전송하는 것이 아니기 때문에 기지국에서는 간섭제거의 기회를 활용할 수 없게 된다. 그로 인해, 제안 기법은 임의접속 병렬화 기법(random access parallelization; RAP) 대비 성능 이득을 기대할 수 없으며, RAP와 동일한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. $k \neq 1$인 경우에는, 기지국이 메시지를 복호하는 과정에서 간섭제거를 통해 추가적인 메시지를 복호할 수 있으므로 성공적으로 복호되는 메시지가 증가하게 된다. 결과적으로, 제안 기법은 기존의 RAP보다 낮은 임의접속 실패확률을 달성할 수 있다.

제안 기법은 임의접속 병렬화 기법 기반으로 동작하기 때문에 k값의 설정에 따라 성능이 좌우된다. N값이 작을 때에는 k값을 증가시킴으로써 임의접속 실패확률을 획기적으로 낮출 수 있지만, N값이 클 때에는 k값을 증가시키는 것이 임의접속 채널의 혼잡을 오히려 가중시켜 임의접속 실패확률이 더 커질 수 있다.

간섭제거를 통한 성능 이득은 1) 간섭제거를 실행할 수 있는 기 복호된 메시지가 충분히 있고, 2) 간섭제거를 통해 다시 한 번 복호를 시도할 메시지가 충분히 있을 때 극대화 될 수 있다[4]. 그림 1에서도 N값이 너무 작거나 너무 클 때에는 RAP 대비 성능 이득이 크지 않은 것을 관찰할 수 있었고, N값이 적당할 때 성능 이득이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

두 가지 관찰을 종합하여 정리하면, 설정된 k값에

www.dbpia.co.kr

따라 간섭제거를 통한 성능 이득이 상이하므로, 네트워크 운용 시에 M, N 등을 종합적으로 고려하여 최적의 k값을 적용할 필요가 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 간섭제거 기반의 개선된 임의접속 병렬화 기법을 제안하였다. 기존의 임의접속 병렬화 기법 대비 우수한 성능을 보이는 것을 모의실험을 통하여 검증하였다.

각 단말이 가용할 수 있는 전송 전력의 제약이 있는 상황을 고려할 경우, 프리앰블 검출 성능, 메시지 디코딩 성능 등에 영향을 미치기 때문에, 물리계층, 매체접근제어 계층 등을 종합적으로 고려하여 교차 계층 최적화를 진행할 필요가 있다.

References

[1] S.-S. Yoo, et al., "Performance evaluation of LTE-A random access procedure for IoT service," *J. KICS*, vol. 41, no. 8, pp. 965-973, Aug. 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] T. Kim and B. C. Jung, "An enhanced random access with inter-frame successive interference cancellation for stationary cellular IoT networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 606-610, May 2020.

www.dbpia.co.kr