

피드백 기반 랜덤 액세스 망에서의 순차적 간섭제거 기법

이시현*, 정방철*, 전상운^o

Successive Interference Cancellation for Feedback-Based Random Access Networks

Si-Hyeon Lee*, Bang Chul Jung*, Sang-Woon Jeon^o

요약

본 논문은 K 노드로 구성된 랜덤 액세스 망에서 피드백 정보를 활용한 효율적인 순차적 간섭제거 기법을 연구했다. 기존 Slotted ALOHA의 경우 최대 전송 효율이 $e^{-1} \approx 0.37$ 로 주어진다. 제안기법은 피드백 정보를 활용하여 충돌 패킷의 간섭을 순차적으로 제거하며 이를 통해 전송 효율을 획기적으로 향상시켰다.

Key Words : Random access, successive interference cancellation, throughput efficiency

ABSTRACT

An efficient successive interference cancellation method for random access networks consisting of K nodes is studied. For the conventional slotted ALOHA system, the maximum throughput efficiency is given by $e^{-1} \approx 0.37$. The proposed scheme successively cancels interference of collided packets based on feedback information, which is shown to significantly improve a throughput efficiency.

I. 서론

분산 환경 다중 접속 기술의 대표적인 예로 Slotted ALOHA가 있다. Slotted ALOHA의 경우 프로토콜이 단순하다는 장점이 있는 반면, 최대 전송 효율이 $e^{-1} \approx 0.37$ 로 제약된다는 단점이 있다^{1,2}. 이러한 단점을 개선하기 위해 충돌 패킷들 간의 순차적 간섭제거를 통해 전송 효율을 개선하고자 하는 연구들이 진행되었다³⁻⁵. 관련 연구들은 순차적 간섭제거를 위해 액세스 포인트에서 충돌 패킷에 대한 정보를 피드백하여 이를 통해 충돌 패킷의 일부를 재전송하여 효율을 개선하였다.

참고문헌 [3-5]에서는 피드백 기반 순차적 간섭제거 기법들을 제안하였고 노드수가 증가할수록 전송 효율 1이 점근적으로 달성 가능함을 보였다. 본 논문은 노드수가 임의로 주어진 환경을 고려하였으며, 제안 순차적 간섭제거 기법을 통해 임의의 노드수에 대해 전송 효율 1이 달성 가능함을 증명하였다.

II. 시스템 모델

K 개의 노드들이 액세스 포인트에게 패킷을 전송하고자 하는 랜덤 액세스 망을 고려하였다. 매 슬롯에서 각 노드는 확률 $\alpha \in [0, 1]$ 로 패킷을 발생하며, 이 때 액세스 포인트의 수신신호 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^K h_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n} \tag{1}$$

여기서 h_i 는 노드 i 로부터 액세스 포인트로의 채널, \mathbf{x}_i 는 노드 i 의 전송신호 벡터, \mathbf{n} 은 부가 수신잡음 벡터이다. 보낼 패킷이 없는 경우 전송신호 벡터는 영벡터로 생성한다.

랜덤 액세스의 경우, 두 노드 이상이 동시에 패킷을 전송하면 ‘충돌’이 발생하여 전송 효율이 저하된다. 본 논문은 액세스 포인트가 충돌에 관련된 노드 집합을 N 비트 정보로 모든 노드들에게 피드백함을 가정

※ 본 논문은 충남대학교 CNU학술연구비의 지원을 받아 작성되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-4362-5970)Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), sihyeon@postech.ac.kr, 종신회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0199-2254)Department of Military Information Engineering, Hanyang University, sangwoonjeon@hanyang.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0002-4485-9592)Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr 종신회원
 논문번호 : KICS2018-01-024, Received January 19, 2018; Revised March 2, 2018; Accepted April 12, 2018

하였다. 제안기법은 N 비트 피드백 정보를 통해 2^N 개의 노드들 중 특정 노드는 재전송에 참여하지 않도록 유도한다(3장 참고).

T_i (패킷/슬롯)를 노드 i 의 전송 효율로 표기하였으며, 임의의 작은 $\epsilon > 0$ 에 대하여 $T_i \geq \alpha - \epsilon$ 관계를 모든 $i \in [1:K]$ 에 대해 만족하는 경우 α 가 달성 가능하다고 표기하였다.

III. 달성 가능한 최대 전송 효율

본 장에서는 제안기법으로 달성 가능한 전송 효율을 소개하고 제안기법을 설명한다.

Theorem 1: 2장에 소개한 N 비트 피드백을 활용한 랜덤 액세스 망을 고려하자. $N = \log J$ 인 경우, 다음을 만족하는 (T_1, T_2, \dots, T_K) 가 달성 가능하다.

$$T_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^J F_j \prod_{k=1}^{j-1} (1 - F_k) \quad (2)$$

여기서 $J \in [2:K]$ 이며 $G = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^J F_j \in [0,1)$ 는 재전송 패킷을 포함한 각 노드의 패킷 전송율이다. ■

Corollary 1: Theorem 1에서, $F_j = \frac{1}{J-j+1}$

인 경우 $T_i = \frac{1}{K}$ 가 되며 $\alpha = \frac{1}{K}$ 를 달성할 수 있다. ■

3.1 제안 전송 기법

본 절에서는 각 노드의 전송 기법을 소개한다. 먼저 $r \in [0:K-1]$ 과 $j \in [1:J]$ 에 대해 다음을 정의한다.

$$\phi_r(j) = 1 + (r+j-1) \setminus K \quad (3)$$

여기서 $a \setminus b$ 는 a 를 b 로 나눈 나머지를 의미한다. 또한 $r \in [0:K-1]$ 에 대해 $S_r \subseteq [1:K]$ 을 노드 인덱스가 $\phi_r(1)$ 에서 $\phi_r(J)$ 에 속하는 J 개의 노드 집합이라고 정의한다. 위 정의를 기반으로 슬롯 t 에서 $(t-1) \setminus K = r$ 에 해당하는 S_r 에 속하는 노드들만의 전송에 참여한다. 즉, 매 슬롯마다 J 개의 노드들만이 전송에 참여한다.

$C_t \subseteq [1:K]$ 를 슬롯 t 에서 충돌을 일으킨 패킷들의 노드 집합이라고 하며, 다음을 정의한다.

$$F_t = 0 \text{ if } C_t = \emptyset \\ F_t = \min(i: \phi_r(i) \in C_t) \text{ otherwise} \quad (4)$$

여기서 \emptyset 는 공집합을 의미한다. 액세스 포인트는 매 슬롯마다 F_t 를 노드들에게 피드백한다. 액세스 포인트로부터 F_t 를 수신한 후 노드 i 는 다음 전송 기법을 통해 전송한다.

- 슬롯 t 에서 충돌한 패킷에 대한 랜덤 백오프
 $i \in C_t$ 이고 $i \neq \phi_r(F_t)$ 인 경우, 노드 i 는 충돌 패킷에 대한 랜덤 백오프 수행.
- 슬롯 $t+1$ 에서의 패킷 전송
 - * 새로운 패킷이 발생한 경우, 노드 i 는 새로운 패킷을 전송하고 랜덤 백오프가 종료된 재전송 패킷들에 대해서는 새로운 랜덤 백오프 수행.
 - * 새로운 패킷이 발생하지 않은 경우, 노드 i 는 랜덤 백오프가 종료된 재전송 패킷들 중 하나를 재전송하고 나머지 패킷들에 대해서는 새로운 랜덤 백오프 수행.
 - * 새로운 패킷이 발생하지 않았거나 랜덤 백오프가 종료된 패킷이 없는 경우, 노드 i 는 전송하지 않음.

3.2 제안 순차적 간섭 제거 기법

본 절에서는 액세스 포인트에서 수행하는 순차적 간섭 제거에 대해 소개한다. 액세스 포인트는 동일 재전송 패킷들 중 가장 마지막에 전송된 슬롯의 수신 신호 벡터에 기반하여 해당 패킷의 디코딩을 수행한다. 제안 전송 기법의 경우, S_r 에 속한 노드들중 노드 $\phi_r(F_t)$ 이 단독으로 전송하였을 때만이 재전송을 하지 않는다. 여기서 $(t-1) \setminus K = r$ 관계를 갖는다. 따라서 노드 $\phi_r(F_t)$ 이 전송한 패킷들은 디코딩이 가능하다. 이후 수신 신호 벡터들에서 노드 $\phi_r(F_t)$ 가 전송하는 패킷들로부터 발생하는 간섭을 제거한다. 동일한 방식으로 동일 재전송 패킷들 중 가장 마지막에 전송된 슬롯들 중에서 단일 패킷이 전송된 슬롯의 해당 패킷을 디코딩한다. 이 후 해당 패킷으로 인해 발생한 간섭을 모든 슬롯들에서 제거한다. 이러한 순차적 간섭 제거를 통하여 패킷을 디코딩한다.

3.3 전송 효율 분석

먼저 G_i 를 노드 i 의 재전송 패킷을 포함한 패킷 전송율로 정의한다. 정의에 의해 노드 i 의 전송 효율 T_i 와 G_i 는 $T_i \leq G_i$ 관계를 갖는다. 또한 $A_t(i)$ 를 슬롯

t 에서 노드 i 가 패킷을 전송하는 이벤트라고 정의한다. 또한 $j \in [1 : J]$ 에 대하여 $F_j = \Pr(A_t(i)|\phi_r(j) = i)$ 를 $\phi_r(j) = i$ 를 만족하는 노드 i 의 패킷 전송 확률이라고 정의한다. 이를 바탕으로 T_i 는 수식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 T_i &= \sum_{j=1}^J \Pr(\phi_r(j) = i, A_t(i), F_t = 0) \\
 &+ \sum_{j=1}^J \Pr(\phi_r(j) = i, A_t(i), \phi_r(F_t) = i) \\
 &= \sum_{j=1}^J \Pr(\phi_r(j) = i) \Pr(A_t(i)|\phi_r(j) = i) \quad (5) \\
 &\quad \Pr(F_t = 0|\phi_r(j) = i, A_t(i)) \\
 &+ \Pr(\phi_r(F_t) = i|\phi_r(j) = i, A_t(i)) \\
 &= \frac{1}{K} \sum_{j=1}^J F_j \prod_{k=1}^{j-1} (1 - F_k)
 \end{aligned}$$

따라서 Theorem 1이 성립한다.

IV. 모의 실험

본 장에서는 모의 실험을 통하여 제안 기법의 성능을 검증하고 이론적인 성능값과 비교하였다. $K=10$, $\alpha=0.1$ 인 환경을 고려하였으며, 제안 기법의 최대 랜덤 백오프 시간은 1000 슬롯으로 설정하였다.

그림 1은 제안 기법의 재전송을 포함한 패킷 전송률 G 와 평균 전송 효율 $\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K T_i$ 를 도시하였다. 비교를 위해 이론적인 값도 함께 도시하였다 (Theorem 1, Corollary 1 참고). 그림에서 확인할 수 있듯이, 제안 기법을 통해 $\alpha = \frac{1}{K}$ 을 달성할 수 있으며 모의 실험 성능값과 이론적인 성능값이 일치한다.

그림 2는 G 에 따른 제안기법과 기존 Slotted ALOHA와의 전송 효율을 비교하였다. G 가 증가할수록 제안기법의 전송 효율이 기존기법에 비해 현저

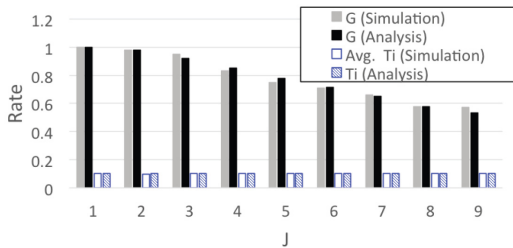


그림 1. 제안기법의 달성 가능한 전송 효율
Fig. 1. Throughput efficiency of the proposed scheme

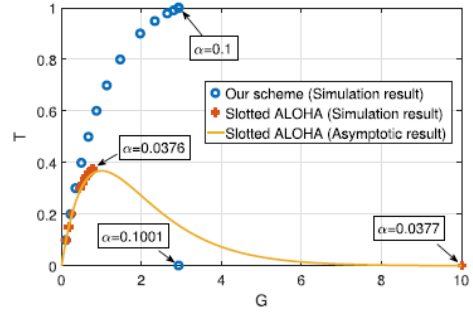


그림 2. 기존 Slotted ALOHA와의 전송 효율 비교
Fig. 2. Comparison with the conventional slotted ALOHA

히 개선된다.

V. 결론

본 논문은 랜덤 액세스 망에서의 효율적인 간섭제거에 대해 연구하였다. 제안기법을 통해 노드수가 임의로 주어진 환경에서도 전송 효율 1을 달성할 수 있다.

References

- [1] N. Abramson, "The ALOHA system-another alternative for computer communications," in *Proc. 1970 Fall Joint Comput. Conf.*, vol. 37, AFIPS Press, 1970.
- [2] W.-Y. Shin and S.-W. Jeon, "Dynamic opportunistic interference alignment for random-access small-cell networks," *J. KICS*, vol. 11, pp. 675-681, Nov. 2014.
- [3] G. Liva, "Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, pp. 477-487, Feb. 2011.
- [4] K. R. Narayanan and H. D. Pfister, "Iterative collision resolution for slotted ALOHA: An optimal uncoordinated transmission policy," in *Proc. Int. Symp. Turbo Codes and Iterative Inf. Process.*, Aug. 2012.
- [5] E. Paolini, G. Liva, and M. Chiani, "High throughput random access via codes on graphs: Coded slotted ALOHA," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Jun. 2011.