

향상된 분산 채널 접근 기법 및 다중사용자 MIMO 기반 무선랜 환경에서 가변 길이 페이로드에 대한 수학적 모델

정 철 호*, 정 태 욱*, 강 병 철*, 김 재 석^o

Mathematical Model of Variable-Length Payloads for EDCA and Multi-User MIMO Based Wireless LAN

Chulho Chung*, Taewook Chung*,
Byungcheol Kang*, Jaeseok Kim^o

요 약

본 논문은 향상된 분산 채널 접근 기법 및 다중사용자 MIMO 환경에서 전송되는 가변 길이 페이로드에 대한 수학적 모델을 제안한다. 페이로드의 길이를 고정값 또는 평균값을 가정하여 사용하면, 한정된 기간에 전송될 수 있는 가변 길이 프레임의 총 페이로드 길이의 계산에 오차를 발생시킨다. 제안된 모델을 사용하면 가변 길이 트래픽 환경에서 총 페이로드의 길이에 대한 정확한 결과(상대오차 3% 이내)를 얻을 수 있다.

Key Words : WLAN, MAC, EDCA TXOP, MU-MIMO, mathematical model, variable-length payloads

ABSTRACT

In this letter, we propose a mathematical model of variable-length payloads transmitted in EDCA and transmitted using MU-MIMO. Assuming fixed-length or the use of mean value of payload length leads to

discordant results while calculating the total payload length of variable-length frames transmitted within a fixed duration. Using the proposed model results in accurate results (less than 3% relative errors) for total payload length under variable-length traffic.

I. 서 론

기존 대부분의 무선랜 medium access point (MAC) 분석 모델은 고정 길이의 프레임을 가정한다^[1,2]. 그러나 무선랜을 통해 전송되는 대부분의 트래픽은 가변 길이 특성을 보인다^[3]. 페이로드의 길이를 고정값 또는 평균값으로 가정하면, 한정된 기간에 전송될 수 있는 가변 길이 프레임의 총 페이로드 길이를 계산할 때 오차가 발생한다. 따라서 실제 트래픽 환경에 대한 MAC 성능 분석을 위해서는 가변 길이 페이로드에 대한 고려가 필요하다.

기존 가변 길이가 고려된 연구들의 경우, request-to-send/clear-to-send 기법이 사용될 확률이나 충돌로 인한 지연 계산을 위해서만 고려할 뿐, transmission opportunity (TXOP) limit 이내의 다중 프레임 전송이나 aggregate MAC protocol data unit (A-MPDU) boundary에 포함될 수 있는 프레임의 개수 및 총 페이로드 길이를 계산하기 위해서는 고려하지 않는다^[4]. 따라서 현실적인 트래픽 환경에서 enhanced distributed channel access (EDCA)의 다중 프레임 전송이나 다중사용자 다중입출력 (multi-user multiple-input-multiple-output, MU-MIMO)를 적용한 A-MPDU 전송과 같은 MAC 기능의 정확한 성능 분석을 위해서는 가변 길이 페이로드에 대한 수학적 모델이 요구된다.

본 논문에서는 EDCA TXOP limit이나 A-MPDU boundary 같은 한정된 기간에 전송될 수 있는 가변 길이 페이로드의 수학적 모델을 제안한다.

II. 가변 길이 페이로드의 수학적 모델

IEEE 802.11e에 정의된 EDCA에서 경쟁을 통해 EDCA TXOP를 획득한 단말은 다수의 프레임을 연속적으로 전송할 수 있다^[5]. 그러나 전송의 모든 과정

* 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2015004883)

• First Author: Department of Electrical & Electronics Engineering, Yonsei University, chulho729@yonsei.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author: Department of Electrical & Electronics Engineering, Yonsei University, jaekim@yonsei.ac.kr, 정회원

* Department of Electrical & Electronics Engineering, Yonsei University, cobain@yonsei.ac.kr, public@yonsei.ac.kr

논문번호: KICS2015-05-145, Received May 12, 2015; Revised June 9, 2015; Accepted June 9, 2015

은 TXOP limit을 초과할 수 없도록 제한된다. 따라서 TXOP 구간 동안 전송 가능한 프레임은 TXOP limit와 프레임들의 길이에 의해 제한된다.

IEEE 802.11ac를 지원하는 액세스 포인트는 MU-MIMO를 이용하여 다중사용자에게 다수의 프레임을 동시 전송할 수 있다^{6,7}. 전송할 프레임들은 각 사용자에게 향하는 A-MPDU로 합쳐지며, physical layer (PHY) convergence protocol (PLCP) service data unit (PSDU) 형태로 PHY에 전달된다. A-MPDU의 길이는 각 사용자에게 향하는 PSDU 중 가장 긴 길이인 A-MPDU boundary와 TXOP limit, 프레임들의 길이에 의해 제한된다.

본 논문에서는 1) EDCA에서의 다중 프레임 전송과 2) MU-MIMO 환경에서의 A-MPDU 전송의 두 가지 경우에 대해 고려한다. 제안된 가변 길이 페이로드의 수학적 모델은 크기가 K 인 유한 버퍼로 구성된 단일 대기 모델로 생각될 수 있다. 두 경우를 단일 모델로 표현하기 위해 버퍼, 도착 프레임, 오버헤드 등의 용어는 각각 다른 의미로 사용된다.

1) EDCA에서의 다중 프레임 전송

- 버퍼는 획득한 EDCA TXOP를 의미하며, 크기 K 는 TXOP limit로부터 계산된 획득한 TXOP 내에 전송 가능한 최대 길이를 나타낸다. 버퍼에 쌓인 프레임들은 획득한 TXOP 내에 모두 전송된다.
- 도착 프레임은 랜덤 분포를 갖는 페이로드와 오버헤드 (프리앰블, MAC 헤더, 프레임 검사열, 수신 응답 과정)를 합친 결과를 의미한다. 수신 응답 과정은 표준에 정의된 TXTIME 함수의 역함수를 이용하여 길이 (byte)의 형태로 표현된다⁵.

2) MU-MIMO 환경에서의 A-MPDU 전송

- 버퍼는 A-MPDU boundary를 의미하며, 크기 K 는 PSDU의 최대 길이를 나타낸다. 버퍼에 쌓인 프레임들은 A-MPDU에 포함되어 동시에 전송된다.
- 도착 프레임은 랜덤 분포를 갖는 페이로드와 오버헤드 (MPDU 구분자, MAC 헤더, 프레임 검사열, A-MPDU 서브프레임 패드)를 합친 결과를 의미한다.

도착 프레임의 개수를 나타내는 도착 과정은 $[1, K]$ 구간의 균등 분포로 생각할 수 있다. 본 논문에서는 항상 충분히 많은 수의 프레임이 도착할 수 있다고 가정한다. 도착 프레임의 개수에 대한 확률 질량 함수는 다음과 같다.

$$a_n = \Pr[\text{도착 프레임의 개수} = n] = \frac{1}{K} \quad (1)$$

페이로드의 길이는 랜덤 분포를 통해 생성할 수 있으며, 프로토콜 오버헤드를 포함하는 도착 프레임의 길이에 대한 확률 질량 함수는 다음과 같다.

$$l_m = \Pr[\text{도착 프레임의 길이} = m \text{ bytes}] \quad (2)$$

$i+1$ 번째 도착 프레임까지의 총 길이의 합이 j 일 확률 l_j^{i+1} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l_j^{i+1} = \sum_{k=0}^i l_k^i l_{j-k} \quad (3)$$

단, $l_0^0 = 1, l_n^0 = 0 (n > 0)$ 이다.

버퍼에 쌓인 길이가 j 일 확률은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 마지막 도착 프레임이 크기가 i 인 버퍼의 오버플로를 발생시킬 확률을 고려하는 경우 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_j = \sum_{k=0}^K a_k l_j^k \quad (4)$$

$$f_j^i = f_j + \sum_{k=1}^K a_k \sum_{n=1}^{k-1} l_j^n \sum_{m=i-j+1}^K l_m \quad (5)$$

버퍼에 쌓인 프레임 총 길이의 합의 평균 L 은 식 (6)을 통해 얻을 수 있으며, 프레임의 총 개수 N 는 L 이 버퍼에 쌓이게 되는 확률이 최대가 되게 하는 프레임의 개수를 구해서 얻을 수 있다.

$$L = \sum_{j=0}^K j f_j^k \quad (6)$$

$$N = \operatorname{argmax}_i l_L^i \quad (7)$$

최종적으로 총 페이로드 길이 (L_{pl})는 다음 수식과 같이 오버헤드의 길이를 제외하여 얻을 수 있다.

$$L_{pl} = L - (N \times OV) \quad (8)$$

여기서 OV 는 앞서 설명한 오버헤드를 의미한다.

III. 검증 및 결과

그림 1은 고정된 시간에 전송되는 페이로드 길이의 가변 여부에 따른 차이에 대한 예시를 보여준다. 전송률 등의 PHY 설정 값에 영향을 받지 않기 위해 PSDU의 최대 길이는 4,420 byte로 고정된 값을 사용하였으며, 가변 길이 페이로드의 평균 길이와 고정 길이 페이로드의 길이를 변화시키며 실험하였다. A-MPDU boundary에 포함 가능한 페이로드의 총 길이는 가변 길이인 경우와 고정 길이인 경우 사이에 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 A-MPDU boundary를 초과하여 프레임이 포함시킬 수 없는 제한 때문에 발생하며, 가변 길이 트래픽 환경의 수학적 성능 분석에서 오차를 발생시키는 요인이 된다.

그림 2는 가변 길이 트래픽 환경에서 A-MPDU에 포함된 총 페이로드의 길이에 대해 제안된 수학 모델과 시뮬레이션 모델의 비교 결과를 보여준다. 가변 길이 프레임은 베타 분포를 이용하여 생성하였으며

($\alpha = 0.1, \beta = 0.2$)^[3], 제안된 모델과 시뮬레이션 모델의 결과가 거의 일치함 (95%이상의 신뢰 구간에서 3%이내의 상대 오차)을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 EDCA에서의 다중 프레임 전송과 MU-MIMO 환경에서의 A-MPDU 전송을 위한 가변 길이 페이로드의 수학적 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 사용하면 현실적인 가변 길이 트래픽 환경에서 TXOP limit과 A-MPDU boundary 같은 고정된 시간에 포함될 수 있는 총 페이로드 길이에 대한 정확한 결과를 얻을 수 있다. 제안된 모델은 무선랜 MAC의 수학적 분석 모델에 적용될 수 있으며, 현실적인 트래픽 환경에서의 정확한 성능 분석이 가능하게 해 줄 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. Xiao, "Performance analysis of priority schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless LANs," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 4, no. 4, pp. 1506-1515, Jul. 2009.
- [2] M. Yazid, A. Ksentini, L. B. Medjkoune, and D. Aissani, "Performance analysis of the TXOP sharing mechanism in the VHT IEEE 802.11ac WLANs," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 9, pp. 1599-1602, Sept. 2014.
- [3] E. R. S. Castro, M. S. Alencar, and I. E. Fonseca, "Probability density functions of the packet length for computer networks with bimodal traffic," *Int. J. Comput. Netw. & Commun.*, vol. 5, no. 3, pp. 17-31, 2013.
- [4] P. Raptis, V. Vitsas, A. Banchs, and K. Paparrizos, "Delay distribution analysis of IEEE 802.11 with variable packet length," in *Proc. VTC2007-Spring*, pp. 830-834, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [5] IEEE, *IEEE Std. 802.11-2012*, 2012.
- [6] IEEE, *IEEE Std. 802.11ac-2013*, 2013.
- [7] J. Koo, Y. Kim, and J. Kim, "An extendable fixed-complexity sphere decoder for downlink multi-user MIMO communication system," *J. KICS*, vol. 39A, no. 4, pp. 180-187, Apr. 2014.

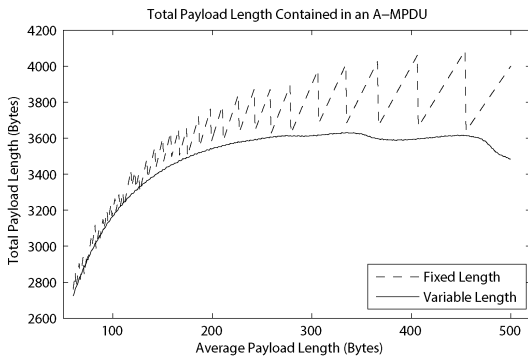


그림 1. A-MPDU에 포함된 페이로드의 길이 비교
Fig. 1. Comparison of payload length contained in an A-MPDU

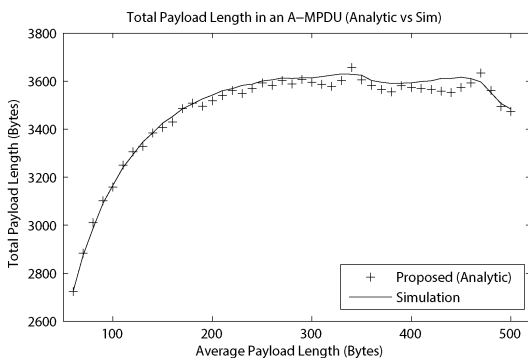


그림 2. 제안 모델과 시뮬레이션의 총 페이로드 길이 비교
Fig. 2. Comparison of total payload length between analytical model and simulation