

무선랜에서 에너지 효율적인 전송 대역폭 결정 기법

Energy-Efficient Transmission Bandwidth Adaptation in IEEE 802.11 WLANs

황 환 응*, 윤 지 훈*

Hwanwoong Hwang*, Ji-Hoon Yun*

Abstract

IEEE 802.11 wireless LANs support 20, 40, 80 and 160MHz bandwidth transmission. In general, the data rate increases as the transmission bandwidth increases. However, the transmission power spectral density decreases, which may lead to increasing packet errors and retransmissions. In this paper, we derive a mathematical model of energy consumption with consideration of various factors such as transmission bandwidth, packet error rate and data size. Based on the model, we design a scheme to adapt a transmission bandwidth for each frame transmission. The scheme estimates packet error rates for different bandwidth cases, updates the table of energy consumption and selects the best bandwidth for the next transmission. The simulation study with VoIP traffic shows the energy consumption of the scheme under various environments.

요 약

IEEE 802.11 무선랜은 20MHz부터 160MHz의 전송 대역폭을 지원한다. 일반적으로 전송 시 대역폭이 증가함에 따라 전송 속도가 증가하지만, 동시에 단위 주파수당 전송파워가 낮아져 오류율이 증가하고 재전송을 유발할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 현상이 전송 에너지 소비에 미치는 영향을 분석하기 위한 수학적 모델링을 수행한다. 그리고, 이를 바탕으로 전송 대역폭을 결정하는 기법을 제시한다. 제시된 기법은 기존 전송 결과를 기반으로 대역폭별 오류율을 추정하고 이를 바탕으로 대역폭별 에너지 소비 테이블을 업데이트 후 이들 간의 비교를 통해 최적 대역폭을 결정한다. VoIP 트래픽을 가정한 시뮬레이션을 통해 다양한 환경에서 제안한 기법의 에너지 소비 성능을 평가한다.

Key words : IEEE 802.11, wireless LAN, wide-band operation, bandwidth adaptation, energy consumption

* Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

★ Corresponding author

E-mail : jhyun@seoultech.ac.kr, Tel : +82-2-970-6455

※ This study was supported by the Research Program funded by the SeoulTech (Seoul National University of Science and Technology).

Manuscript received Aug. 31, 018; revised Sep. 17, 2018; accepted Sep. 18, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

IEEE 802.11 무선랜은 데이터 프레임 전송 시 20, 40, 80 또는 160MHz의 다양한 대역폭을 사용할 수 있다. 일반적으로 넓은 대역폭을 이용해 전송하면 전송 속도(단위 시간당 보낼 수 있는 비트 수)가 증가하지만 단위 주파수 당 사용되는 전송 전력이 작아지기 때문에 비트에러가 증가할 수 있어, 결과적으로 패킷 에러를 유발할 수 있다. 패킷 에러가 발생하면, 해당 패킷에 대한 재전송이 실행되어야 하므로 추가적인 에너지 소비가 발생한다. 따라서, 넓은 대역폭을 이용하여 전송하는 것이 에너지 소비 관점에서 항상 최적이지 아닐 수 있다.

본 논문은 IEEE 802.11 무선랜에서 전송 대역폭에 따른 에너지 소비를 수학적으로 모델링하고, 최적의 에너지 소비를 달성하는 채널 대역폭 결정 기법을 제안한다. 먼저 전송 데이터 크기 및 채널 환경과 에너지 소비의 관계를 모델링한다. 이를 바탕으로 다양한 동작 환경에서 최적의 에너지 소비를 달성하는 채널 대역폭 결정 기법을 제안한다. 제시된 기법은 기존 전송 결과를 기반으로 대역폭별 오류율을 추정하고 이를 바탕으로 대역폭별 에너지 소비 테이블을 업데이트 후 이들 간의 비교를 통해 최적 대역폭을 결정한다. 시뮬레이션에서는 전송 대역폭에 상관없이 전송 전력을 고정하여 사용하는 경우와 대역폭 증가에 따라 전송 전력을 비례적으로 증가시키는 두 가지 경우를 각각 고려한다. 시뮬레이션 결과는 제안된 기법이 적용되었을 때 VoIP(Voice over IP) 음성 트래픽 전송 시 에너지 소모를 최대 26%까지 줄일 수 있음을 보인다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련된 기존 연구를 알아본다. III장에서는 대역폭에 따른 전송 에너지 소비 모델을 제시한다. IV장에서는 대역폭 결정 기법을 기술한다. V장에서는 제시한 기법의 성능을 평가하며, VI장에서 논문의 결론을 맺는다.

II. 기존 연구

본 장에서는 무선랜의 전력 소비 및 절전과 관련된 다양한 연구를 소개한다.

1. 무선랜 소비 전력 분석

IEEE 802.11n 어댑터의 다양한 동작 상태에 대한 소비전력을 측정하는 연구가 제시되었고[2], 최근의 연구[3]는 802.11ac 장치의 에너지 효율을 포함한 측정 성능을 제공했다. 본 논문에서는 상용 어댑터의 소비 전력 측정 데이터를 모델과 결합하여, 보다 심층적인 특성 관계를 분석하는 것이 가능하다.

2. IEEE 802.11 절전

IEEE 802.11 표준[4]에서는 전력 소비를 줄이기 위한 동작을 정의하고 있다. PSM (Power Save Mode)는 전력 소비 절감을 위해 가장 기본적으로 정의된 동작이다. 이 모드에서 무선랜 장치는 AP (Access Point)의 비콘(beacon) 프레임 수신하기

위해 주기적으로 깨어나서 데이터 프레임의 수신 여부를 확인한다. 수신해야 할 프레임이 없는 경우는 다시 수면 상태(sleep state)로 전환한다. APSD (Automatic power save delivery)는 지연에 민감한 트래픽을 대상으로 성능 저하 없이 전력 소비를 줄일 수 있게 해준다. IEEE 802.11n은 PSMP (Power Save Multi-Poll)를 정의한다. 이는 다수의 단말 장치를 대상으로 송·수신 이벤트를 알리기 위해 AP를 활성화한다.

3. MIMO 에너지 소비 특성

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 전송이 무선랜에 적용된 이후, MIMO의 에너지 효율이 연구되었다. IEEE 802.11n에서는 유휴(idle) 상태에서 에너지 효율을 높이는 SMPS (Spatial Multiplexing Power Save)가 정의되었다[4]. CMES[5]는 가장 효율적인 MIMO 송·수신 설정을 찾는다. MIMO에서 가장 효율적인 물리계층 전송속도를 찾는 EERA 기법[6]이 제안되었다.

4. 다운클럭킹(Downclocking)

무선랜 어댑터의 동작 클럭을 낮추는 것이 소비 에너지 절감에 영향이 있음이 연구되었다[7]. 해당 연구에서는 이를 기반으로 적응적으로 송신기와 수신기 사이의 최적 대역폭을 결정한다. SloMo[8]와 Enfold[9]는 무선랜의 소비 전력을 줄이기 위해 Downclocked 수신을 제안한다. 반면에 E-MiLi[10]은 유휴 상태에서 에너지 소비를 최소화하기 위해 클럭을 줄이고 프레임 송·수신시에는 기존 클럭으로 돌아간다. 이러한 다운클럭킹 자체는 표준을 준수하지만, 송신 노드와 수신 노드 사이에 클럭의 차이를 방지하기 위한 방안이 필요하고 이는 표준의 수정을 요한다.

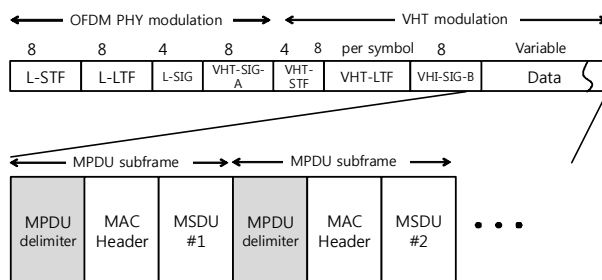


Fig. 1. IEEE 802.11ac frame structure.

그림 1. IEEE 802.11ac 프레임 구조

III. 전송 에너지 소비 모델

1. 무선랜 프레임 구조

그림 1은 IEEE 802.11ac의 프레임 구조를 보이고 있다[1]. 802.11ac의 경우 이전의 표준과는 다르게 물리계층(PHY) 헤더가 시간단위로 정해져있다. 프레임의 맨 앞에 OFDM PHY 변조에 해당하는 프리앰블(preamble) 시간(T_{phy})과 VHT(Very High Throughput) 변조에 해당하는 프리앰블 시간(T_{vht})이 위치한다. 이후에는 MSDU (MAC Service Data Unit)가 64개까지 결합되어 프레임에 담기게 된다. 각 MSDU에는 MPDU (MAC Protocol Data Unit) delimiter와 MAC 헤더가 위치하게 된다. 특정 MPDU에서 에러가 발생 하면, 해당 MPDU는 재전송된다. 따라서, 하나의 프레임에 주어진 데이터를 재전송을 포함하여 온전히 전송 완료하기까지 무선랜 장치가 전송에 소비하는 시간 T_{on} 은 식 (1)과 같다(전송 완료까지 추가 데이터 발생은 없다고 가정한다).

$$T_{on} = \sum_{k=1}^{\infty} [(T_{phy} + T_{vht}) + n_k \cdot L_{MPDU}/r] \quad (1)$$

여기에서 k 는 전송 회차, n_k 는 해당 회차에서 전송하는 MPDU의 수이다. 즉, n_1 은 프레임의 최초 전송에서 결합된 MPDU 수이고, 이후의 n_k 는 이전 전송에서 에러가 발생해 재전송하는 MPDU 수이다. n_k 가 0이 되는 것은 모든 MPDU의 전송이 완료된 것이다. L_{MPDU} 는 단일 MPDU의 크기이다. 하나의 MPDU가 전송되는데 걸리는 시간은 MPDU 크기를 전송속도 r 로 나누어 얻을 수 있다.

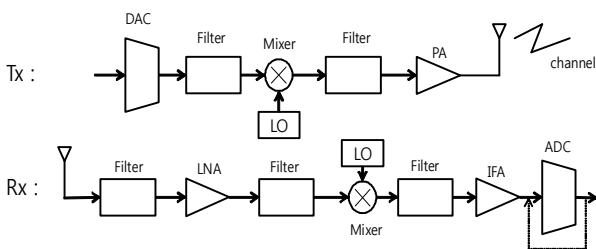


Fig. 2. Transmit and receive circuit model block diagram. 그림 2. 송·수신 회로 모델 블록도

2. 송·수신 회로 모델

송·수신시 에너지 소비 계산을 위해 [11]의 회로모델을 이용하며, 이는 그림 2와 같다. 데이터 송

신의 경우 디지털 신호가 DAC (Digital-to-Analog Converter)를 통해 아날로그 신호로 변환된 후 저대역 필터를 통과한다. 이후 Mixer에 의해 변조되고 다시 한번 필터링을 거친다. 최종적으로 파워앰프를 통해 신호를 증폭하여 전송하게 된다. 반면, 수신시 경우 안테나를 통해 아날로그 신호를 수신하고 저잡음앰프(LNA)와 필터를 이용하여 우선적으로 잡음을 제거한다. 이후 Mixer에 의해 기저대역 신호를 변환된다. IFA(Intermediate Frequency Amplifier)에서 게인 조절을 한 뒤에 ADC (Analog-to-Digital Converter)를 통해 최종 디지털 신호로 변환된다. 그림 2를 바탕으로 송·수신시 회로에서 소비하는 전력을 근사화하여 소비에너지를 계산한다. 각 블록에서 소비하는 전력을 바탕으로 송신전력 P_{Tx} 와 수신전력 P_{Rx} 는 각각 식 (2)과 (3)로 나타낼 수 있다.

$$P_{Tx} = P_t + P_{amp} + P_{mix} + P_{syn} + P_{filt} + P_{DAC} \quad (2)$$

$$P_{Rx} = P_{mix} + P_{syn} + P_{LNA} + P_{filt} + P_{IFA} + P_{ADC} \quad (3)$$

P_t 는 전송파워로서 본 논문에서는 15dBm으로 설정한다. 파워앰프(PA)에서 발생하는 소비 전력을 P_{amp} 로 하며 이는 $P_{amp} = \alpha P_t$ 와 같다. α 는 $\alpha = \xi/\eta - 1$ 로 계산 가능하며, η 는 Drain efficiency로 0.35의 값을 갖는다[12]. ξ 는 Peak-to-average power ratio (PAPR)이며, M-QAM에 대해 $3(\sqrt{m} - 1/\sqrt{m} + 1)$ 로 계산된다($m = 2^{L/BT_{on}}$, B : Bandwidth, T_{on} : 전송 시간). 필터에서 발생하는 소비전력은 P_{filt} 이고, P_{mix} 는 Mixer에서 발생한 소비전력을, P_{syn} 은 Frequency synthesizer의 소비전력을 의미한다. DAC와 ADC의 소비전력은 각각 P_{DAC} 와 P_{ADC} 로, LNA와 IFA의 소비전력은 P_{LNA} 와 P_{IFA} 으로 표시한다. P_{LNA} , P_{IFA} 와 P_{syn} 은 3mW로 설정 한다[13]. P_{DAC} 는 식 (4), P_{ADC} 는 식 (5)로 계산된다[11].

$$P_{DAC} = \beta \left(\frac{1}{2} V_{dd} I_0 (2^{n_1} - 1) + n_1 C_p (2B + f_{cor}) V_{dd}^2 \right) \quad (4)$$

$$P_{ADC} = \frac{3V_{dd}^2 L_{min} (2B + f_{cor})}{10^{-0.1525n_2 + 4.838}} \quad (5)$$

이때 $\beta = 1$, $V_{dd} = 3V$, $L_{min} = 0.5\mu s$, $n_1 = n_2 = 10$, $I_0 = 10\mu A$, $C_p = 1pF$, $f_{cor} = 10MHz$ 로 한다.

3. 에너지 소비

식 (2)와 (3)에서 보인 소비 전력을 바탕으로 송·수신시에 사용되는 소비 에너지를 계산하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 하나의 프레임이 모두 전송 완료 될 때까지 소모되는 총 소비에너지를 계산한다. 프레임의 전송에서는 PER(Packet Error Rate)에 해당하는 확률로 프레임 내의 특정 MPDU에서 오류가 검출된다. 식 (1)의 T_{on} 은 하나의 패킷에 포함된 모든 MPDU가 모두 전송되는데 걸리는 시간이다. 전송에너지와 수신에너지는 E_{Tx} 와 E_{Rx} 로 표시하고, 각각 $P_{Tx}T_{on}$ 와 $P_{Rx}T_{on}$ 으로 얻어진다. 총 소비에너지는 이 둘의 합으로서, E 로 표시한다.

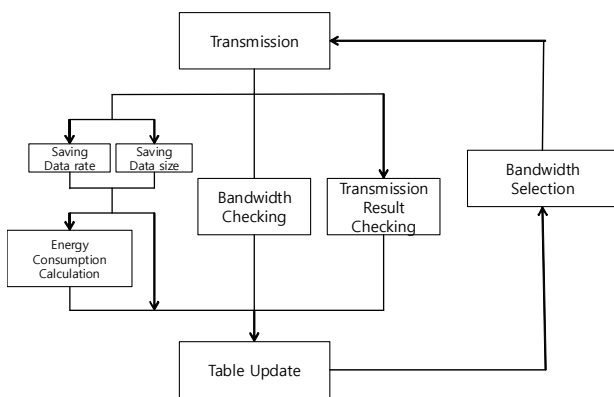


Fig. 3. Transmission bandwidth adaptation scheme.

그림 3. 전송 대역폭 결정 기법

IV. 전송 대역폭 결정 기법

그림 3은 제안하는 전송 대역폭 결정 기법을 도시하고 있다.

앞서 모델링된 것처럼, 전송 시 소모하는 에너지는 전송 대역폭, 전송시간(T_{on})에 크게 의존한다. 이때, 전송시간은 데이터의 길이, 대역폭, 경로 감쇄와 연관된다. 즉, 소비 에너지는 다양한 변수와 관련되며, 특히 전송 대역폭과 소비 에너지는 비선형적 관계를 갖는다. 뿐만 아니라, 무선 채널의 상황은 수시로 변하므로, PER로 대변되는 채널 상황은 전송 결과를 통해 매번 업데이트되어야 한다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 전송 대역폭 결정 기법은 그림에 도시된 것처럼 테이블 기반 방식을 따른다.

Energy Consumption Calculation 블록에서는 전송하고자 하는 하나의 MSDU가 완전히 전송되는데 소모되는 에너지를 전송 대역폭 별로 계산한다.

이를 위해서 전송 시에 사용된 전송속도와 데이터의 크기를 저장한다. 전송속도와 데이터 크기를 이용하여 전송시간을 계산할 수 있고, 전송속도와 데이터 크기, 계산된 전송 시간을 테이블에 업데이트하고, PER을 반영하여 전송 대역폭별 소비 에너지를 계산한다. 획득한 에너지 소비 테이블을 바탕으로 전송해야 할 데이터에 대해 최소의 에너지 소비를 달성하는 전송 대역폭을 설정하여 전송한다.

Transmission Result Checking 블록에서는 해당 대역폭에서 데이터의 전송 성공 여부를 체크한 후 그 결과를 바탕으로 테이블의 PER값을 업데이트한다. 이 정보를 바탕으로 데이터 전송에 사용 가능한 대역폭별로 전송 에너지 소비를 계산하고 이를 테이블에 업데이트한다. 채널 환경이 변하지 않는 경우, PER 변화가 없으므로 테이블업데이트가 더 이상 없고, 따라서 동일한 트래픽 상황에서 고정된 전송 대역폭을 사용하게 된다. 하지만, 실제로는 채널 환경이 계속해서 변화하기 때문에 전송 결과에 따라 PER을 재계산하고, 이에 따른 전송 대역폭별 에너지 소비를 업데이트하여야 한다. 뿐만 아니라, 전송속도, 데이터크기에 따라라도 전송의 성공 여부는 달라지기 때문에 전송에 대한 결과는 계속해서 업데이트되어야 한다. 하지만, 채널 상황을 대변하는 PER이 전송 대역폭 별로 테이블에 정확히 반영되어 있지 않을 수 있고, 이 때 산출한 최적 전송 대역폭이 실제 최적값과 다를 수 있다. 이는 특히 동일 전송 대역폭을 사용하여 반복된 전송을 수행한 경우, 다른 대역폭 경우에 대한 PER 값이 최신 상황을 반영하지 못할 수 있어 발생할 수 있다. 이러한 경우를 보완하기 위해, 테이블값을 통해 산출된 최적 전송 대역폭 외에 일정한 확률로 다른 전송 대역폭을 이용해 전송을 시도하여 해당 대역폭에 따른 PER 값을 획득하도록 한다. 다음장의 시뮬레이션에서는 5%의 확률로 최적 대역폭 이외의 대역폭을 임의로 선택하여 전송을 시도한다.

Table 1. VoIP codec specification.

표 1. VoIP 코덱 사양

| Codec & Bit rate (kbps) | Codec sample size (Bytes) | Codec sample interval (ms) |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| G.711 (64) | 80 | 10 |
| G.726 (32) | 20 | 5 |
| G.729 (16) | 10 | 5 |
| G.729 (8) | 10 | 10 |

Table 2. Path losses for 3, 5 and 10m distance.

표 2. 3, 5, 10m 전송거리에 대한 경로 감쇄값

| | 3m | 5m | 10m |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Path loss | 55.96(dB) | 60.41(dB) | 70.94(dB) |

Table 3. Data rate for different transmission bandwidth cases(single stream).

표 3. 전송 대역폭에 따른 전송속도

| | 20MHz | 40MHz | 80MHz | 160MHz |
|------------------|-------|-------|-------|--------|
| Data rate (Mbps) | 87 | 200 | 433 | 867 |

V. 성능 결과

본 장에서는 제안하는 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증한다. 전송 트래픽은 VoIP에 중점을 둔다. 표 1은 VoIP 코덱별 데이터 생성을 보인다. 예를 들어, G.711의 경우 10ms 간격으로 80바이트를 생성하여 1초 동안에는 총 64kbits를 생성한다. 코덱에서 생성하는 샘플 데이터마다 하나의 MSDU를 구성한다고 가정한다. 경로 감쇄 산출은 IEEE TGax Simulation Scenarios 문서의 실내 모델을 사용하였으며, 중심 주파수는 5GHz를 고려하였다. 표 2는 이에 따른 3, 5, 10m 거리에 대한 경로 감쇄값을 보인다.

수신 MSDU 별 오류 발생 방식은 아래 설명과 같다. 대역폭에 대한 M-QAM 변조의 PER은 식 (7)로 정의한다[14].

$$PER = 1 - (1 - P_b)^L \quad (7)$$

식에서 L 은 MSDU에 포함되는 비트 수를 나타내고, P_b 는 비트에러율로서 $P_b = \frac{1}{\log_2 M} \cdot P_M$ 으로 계산된다. 이때 P_M 은 심볼(symbol) 에러율로서 $P_M = 1 - (1 - P_{\sqrt{M}})^2$ 로 계산 된다. $P_{\sqrt{M}}$ 은 식 (8)을 통해 얻을 수 있고, 802.11ac는 256-QAM을 지원하므로 M 은 최대 256이 된다. P_s 는 수신기에서 수신하는 파워로 송신기의 전송 파워 P_t 에서 경로 감쇄를 제한 값이다. 또 N_0 는 열잡음으로 $N_0 = -175 + 10\log_{10}(\Delta f)$ 를 통해 얻을 수 있다. Δf 는 전송 대역폭이다.

$$P_{\sqrt{M}} = 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot Q\left(\frac{3}{M-1} \cdot \frac{P_s}{N_0}\right) \quad (8)$$

위의 같이 정의된 PER 값을 바탕으로, 수신 장치가 수신하는 매 MSDU 별로 오류 여부를 랜덤하게 결정한다.

전송은 단일 스트림을 가정하고, 각 대역폭에 따른 전송속도는 해당 대역폭에서의 최대 전송속도로 가정한다. 이 경우, 각 전송 대역폭에 대한 전송속도는 표 3과 같다[1].

전송 파워 P_t 의 설정은 두 가지 경우를 고려한다. 먼저, 고정 전송파워의 경우, 전송 대역폭과 무관하게 단말 장치가 전송에 사용하는 전송파워를 15dBm으로 고정한다. 따라서, 넓은 대역폭을 사용할수록 주파수 영역에서 전송파워 밀도(dBm/Hz)는 낮아진다. 두 번째는 전송 대역폭에 따라 P_t 를 15dBm(31.62mW)씩 증가시키는 대역폭 비례 전송 파워이다. 즉, 20MHz의 대역폭에서는 31.62mW를, 40MHz에서는 그의 두 배인 63.24mW의 P_t 를 갖도록 한다. P_t 가 비례적으로 증가함에 따라 전송거리가 10m일 때에도 PER은 0이 된다.

시뮬레이션에서는 AP가 전송할 MPDU를 바로 전송하지 않고 자신의 버퍼에 저장한 후 일정한 MPDU가 모였을 때 이를 결합(aggregation)하여 하나의 프레임으로 전송하는 동작을 가정한다. 얼마나 많은 MPDU를 한 프레임에 결합하는 지에 따라 성능이 달라지므로, 성능 결과는 이 값을 변수로 하여 제시한다.

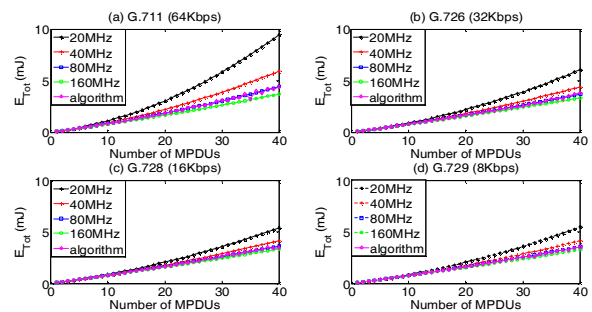


Fig. 4. Energy consumption for fixed transmit power (5m). 그림 4. 고정 전송 파워에 대한 에너지 소비 결과(5m)

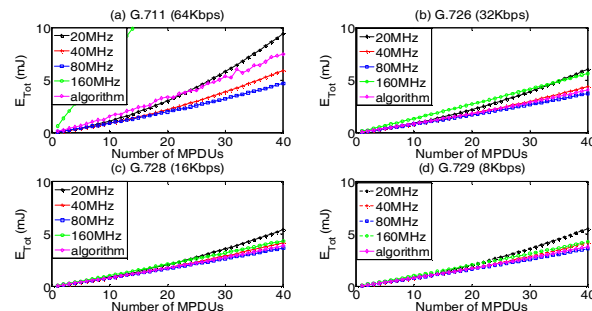


Fig. 5. Energy consumption for fixed transmit power (10m). 그림 5. 고정 전송 파워에 대한 에너지 소비 결과(10m)

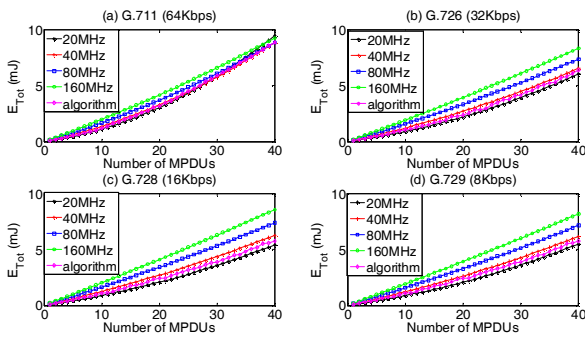


Fig. 6. Energy consumption for bandwidth-adaptive transmit power.

그림 6. 대역폭 비례 전송 파워에 대한 에너지 소비 결과

그림 4는 전송파워가 고정되어 있고 송신기와 수신기 사이의거리가 5m일 때의 에너지 소비 결과를 보이고 있다. 4가지 종류의 VoIP 코덱별로 고정 전송대역폭을 이용하여 전송하는 경우와 제안하는 기법을 비교한다. 5m의 경우 PER이 모두 0이기 때문에 전송 속도가 빠를수록 전송시간이 짧아져 소비 에너지가 적다. 따라서, 가장 넓은 대역폭인 160MHz를 사용하는 것이 유리하다. 하지만, 80MHz와의 에너지 소비 차이가 크지는 않다. 이는 VoIP 트래픽의 특성상 매 프레임이 전송하는 데이터 크기가 제한되어 있기 때문이다. 제안하는 기법은 대체로 160MHz와 80MHz의 중간에 위치한다. 이는 PER 정보의 부정확함과 임의로 최적 이외의 대역폭을 이용해 전송하는 동작에서 기인한다.

그림 5의 10m 전송 거리에서는 경로 감쇄가 증가하여 넓은 대역폭에서 PER이 상승하므로 전송 속도가 빠르더라도 재전송하는 횟수가 증가하게 된다. 이에 따라 전송시간이 증가하고 5m 대비 더 많은 에너지 소모가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 5m의 경우 160MHz 대역폭의 채널이 가장 적은 에너지를 소모하지만, 10m의 경우 160MHz 대역폭의 채널에서 많은 패킷 에러가 발생하게 되어 높은 에너지 소모를 보인다. 제안하는 기법은 에너지 소모가 가장 적은 80MHz 대역폭의 채널과 유사한 양상을 보인다. 예를 들어, 64개의 MPDU가 단일 프레임에 결합된 경우 160MHz 대역폭에서 소비하는 에너지는 52.53mJ 대비 제안된 기법은 26.45mJ로 최대 26.45%로 줄일 수 있다. 하지만, 결과에서 기법의 에너지 소비가 각 크기의 MPDU에서 가장 효율이 좋은 대역폭과 완전히 일치하지 않는 것은 최적 이외의 대역폭을 랜덤하게 이용하

기 때문이다. 특히, 그림 5(a)에서 160MHz를 이용 시에 PER이 0.89로 매우 높은 값을 갖기 때문에 제안 기법이 적용된 에너지 소모가 큰 값을 갖는다. 제안하는 기법의 랜덤한 동작으로 인해 160MHz 대역폭을 이용하는 경우 큰 에너지 소모를 초래하고, 이로 인해 평균 에너지 소모가 최적 대역폭 대비 높은 것을 볼 수 있다.

그림 6은 대역폭에 비례하여 전송파워를 증가했을 때의 결과이다. 기법 적용 시 가장 적은 에너지 소비를 보이는 모든 경우에서 대역폭과 유사한 결과를 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 그림 6(a)에서 MPDU가 28개 결합되어 전송될 때는 20MHz 대역폭이 가장 낮은 에너지소비를 보이고, 33개의 MPDU가 결합되기 전까지 40MHz 대역폭이 가장 낮은 에너지 소비를 보인다. 이후 80MHz가 가장 낮은 에너지 소비를 보인다. 제안 기법을 적용한 결과는 그와 유사한 결과를 갖는다.

VI. 결론

본 논문은 무선랜 장치의 전송 대역폭에 따른 에너지 소비를 모델링하고, 이를 기반으로 최적의 전송 대역폭을 결정하여 사용하는 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 다양한 환경에서 우수한 에너지 소비 성능을 달성함을 보였다. 제안 기법의 최적 동작을 위해 다양한 전송 설정에 대한 전송에러율 정보를 정확히 획득하는 것이 중요하므로, 이를 실현하기 위한 추가 연구가 수행될 필요가 있다.

References

- [1] Matthew S. Gast, *802.11 ac: A survival guide*, O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [2] D. Halperin et al., "Demystifying 802.11n Power Consumption," in *Proc. USENIX HotPower*, Oct. 2010.
- [3] Y. Zeng et al., "A First Look at 802.11ac in Action: Energy Efficiency and Interference Characterization," in *Proc. IFIP Networking*, 2014. DOI:10.1109/IFIPNetworking.2014.6857103
- [4] *IEEE 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)*

specifications, IEEE Standard 802.11, 1999.

[5] I. Pefkianakis et al., "CMES: Collaborative Energy Save for MIMO 802.11 Wireless Networks," in *Proc. IEEE ICNP*, Oct. 2013.

DOI:10.1109/ICNP.2013.6733605

[6] C.-Y. Li et al., "Energy-based Rate Adaptation for 802.11n," in *Proc. ACM MobiCom*, Aug. 2012.

DOI:10.1145/2348543.2348585

[7] R. Chandra et al., "A Case for Adapting Channel Width in Wireless Networks," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR)*, vol.38, no.4, pp.135-146, 2008.

DOI:10.1145/1402958.1402975

[8] F. Lu, et al., "SloMo: Downclocking WiFi Communication," in *Proc. USENIX NSDI*, 2013, pp.255-258.

[9] F. Lu et al., "Enfold: Downclocking OFDM in WiFi," in *Proc. ACM MobiCom*, 2014, pp.129-140.

DOI:10.1145/2639108.2639123

[10] X. Zhang et al., "E-MiLi: Energy-minimizing Idle Listening in Wireless Networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol.11, no.9, pp.1441-1454, 2012. DOI:10.1109/TMC.2012.112

[11] Cui et al., "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.4, no.5, pp.2349-2360, 2005.

DOI:10.1109/TWC.2005.853882

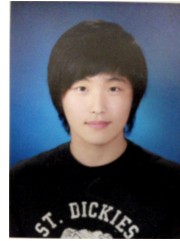
[12] Lee, Thomas H., *The design of CMOS radio-frequency integrated circuits*, Cambridge university press, 2004.

[13] Yamaji et al., "A temperature-stable CMOS variable-gain amplifier with 80-dB linearly controlled gain range," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.37, no.5, pp.553-558, May 2002. DOI:10.1109/4.997847

[14] Qiao et al., "Goodput enhancement of IEEE 802.11 a wireless LAN via link adaptation," in *Proc. ICC 2001*, 2001. DOI:10.1109/ICC.2001.936939

BIOGRAPHY

Hwanwoong Hwang (Member)



2014 : BS degree in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology.

2016 : MS degree in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology.

2016~ : PhD student in Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology.

Ji-Hoon Yun (Member)



2000 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

2002 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

2007 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

2007~2009 : Research Engineer, Samsung Electronics.

2009~2010 : Postdoctoral researcher, The University of Michigan, Ann Arbor, U.S.A.

2010~2012 : Assistant professor, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea.

2012~2016 : Assistant professor, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

2016~ : Associate professor, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea