



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

IEEE 802.11n 무선 LAN 환경의
에너지 효율적인 전송속도 조절 기법

**An Energy Efficient Rate Adaptation Method
in IEEE 802.11n WLAN**

2014 年 2 月

서울대학교 大學院

電氣컴퓨터工學部

朴 珉 洙

초 록

최근 다양한 기기들에 802.11n 표준이 적용되면서 휴대 장비의 네트워크 접속 카드(network interface card; NIC)에서 소모하는 에너지를 최소화 하기 위한 많은 기법들이 연구되어왔다. 특히 802.11n 표준에서는 이전의 표준 IEEE 802.11 a/b/g와는 다르게 더 넓은 대역폭을 사용할 수 있게 되었고 다중입출력(multiple input multiple output; MIMO) 전송기법을 사용 가능하게 됨에 따라 에너지 효율이 점점 더 큰 문제점으로 제기 되고 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.11n NIC의 파워 소모량을 모델링하고 단말의 에너지 효율을 최적화하는 전송속도 조절 기법(rate adaptation algorithm; RA)을 제안한다. 상용 장비에서 소모되는 파워를 모델링하기 위해 Intel과 Atheros사의 NIC을 대상으로 여러 변수를 변화 시키며 송신, 수신, 대기 모드의 파워 소모량을 측정하였으며 이를 기반으로 에너지 효율을 최대화하는 전송속도 조절 기법을 제안한다. 제안 기법은 유효 SNR(signal to noise ratio; 신호 대 잡음비)을 기반으로 에너지 효율을 추정하여 에너지 효율이 가장 높은 변조 및 부호화 방법(modulation and coding scheme; MCS)를 선택한다. 유효 SNR은 AP(access point)가 주기적으로 빈 데이터 패킷(null data packet; NDP)을 송신해 줌으로써 계산 할 수 있다. 제안하는 기법은 다양한 실내 채널 환경을 적용한 시뮬레이션에서 그 성능을 검증하였으며 특히 시변 채널에서 기존의 기법보다 최적에 가까운 성능을 보인다.

주요어 : 802.11n WLAN, 에너지 효율, 전송속도 조절 기법

학 번 : 2012-20768

목 차

초 록.....	i
제 1 장 서 론.....	1
제 2 장 시스템 모델 및 측정 환경.....	3
제 3 장 파워 소모 모델.....	6
제 4 장 제안 기법.....	17
제 5 장 시뮬레이션 결과.....	20
제 6 장 결 론.....	28
참 고 문 헌.....	30
Abstract	31

제 1 장 서 론

최근 다양한 휴대 기기들의 보급으로 개인 및 사업자의 WiFi 서비스 이용량이 기하 급수적으로 증가하고 있다. 여러 가지 표준 중에서도 IEEE 802.11n 무선 LAN(wireless local area network; WLAN) 표준이 최근 상용화 되었으며 가장 널리 사용되고 있다. IEEE 802.11n 표준[1]은 기존의 IEEE 802.11 a/b/g 표준에 비해 더 넓은 대역폭 사용이 가능하며 다중 입출력(multiple input multiple output; MIMO) 전송이 가능해짐으로써 더 많은 파워를 소모하게 되었다. 이에 따라 에너지 효율이 중요시 되고 있으며 특히 배터리를 사용하는 휴대 기기의 경우 네트워크 접속 카드(network interface card; NIC)에서 소모하는 에너지가 휴대기기 사용시간에 큰 영향을 미칠 수 있다.

에너지 효율을 높이기 위한 노력으로 802.11n 표준에서는 SMPS(spatial multiplexing power save)와 PSMP(power save multi poll)와 같은 파워 세이빙 기법들이 정의 되어있다. 전송속도를 변경하여 에너지 효율을 높이는 기법은 EERA(energy efficient rate adaptation)에서 연구되었다[2]. EERA에서는 NIC의 수신, IDLE 파워 소모량을 측정 및 모델링 하였으며 에너지 효율이 가장 높은 변조 및 부호화 방법(modulation and coding scheme; MCS)를 찾기 위해 ternary search를 사용한다.

본 논문에서는 802.11n 무선 LAN 환경에서 에너지 효율적인 전송속도

조절 기법(rate adaptation algorithm; RA)을 제안한다. 에너지 효율적인 전송속도 조절 기법은 에너지 당 전송 가능한 비트 수(bit/J)의 최대화를 목표로 한다. 특정 채널 환경에서 패킷(packet) 전송 시 사용하는 MCS에 따라 에너지 효율은 증가 또는 감소 할 수 있다. 에너지 소모량은 송신, 수신, IDLE 상태의 파워 소모량과 전송 시간의 함수이며, 성공적으로 전송된 비트 수는 MCS와 채널 상태의 영향을 받는다. 높은 MCS를 사용하는 경우 전송시간은 감소 하지만 더 많은 안테나의 사용을 필요로 하기 때문에 더 많은 파워를 소모하게 된다. 제안 기법은 에너지 소모량의 정확한 예측을 위해 NIC의 파워 소모 모델을 사용하며, 주기적으로 채널의 유효 SNR(signal to noise ratio; 신호 대 잡음비) [3]을 계산하여 가장 에너지 효율이 높은 MCS를 선택한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델과 파워 소모량 측정 방법, 시뮬레이션을 위한 채널 측정 방법에 대해 설명하고 3장에서는 802.11n NIC의 파워 소모량 측정결과와 파워 소모 모델을 소개한다. 4장에서는 제안 기법인 유효 SNR기반의 전송속도 조절 기법에 대해 설명한다. 5장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안 기법의 성능 개선을 확인하며 마지막으로 6장에서 결론을 내린다.

제 2 장 시스템 모델 및 측정 환경

2.1. 시스템 모델

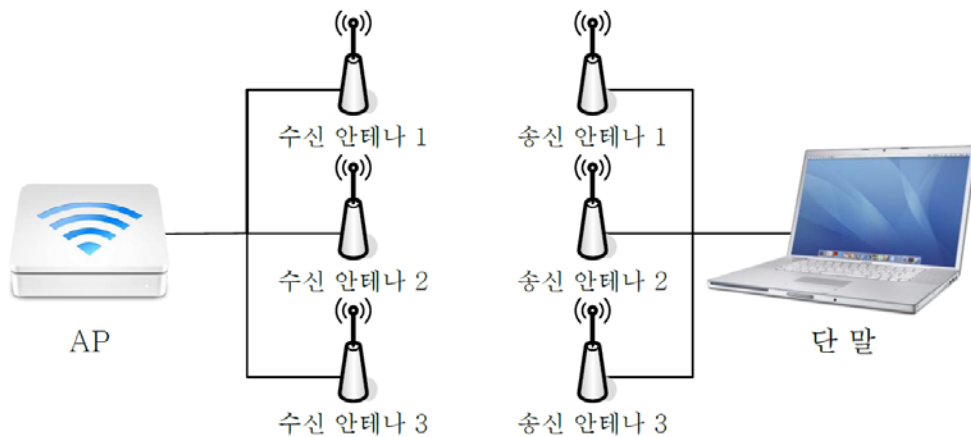


그림 2-1. 시스템 모델.

그림 2-1은 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 나타낸다. 다중입출력 전송이 가능한 802.11n AP(access point)와 단말(station)이 존재하고 이 때 단말이 AP로 A-MPDU(aggregate MPDU) 패킷을 전송하는 상향링크(uplink; UL) 상황을 고려한다. 이러한 환경에서 제안 기법 ESER(effective SNR-based energy-efficient rate adaptation)은 단위 에너지 당 전송 가능한 비트 수의 최대화를 위해 에너지 효율이 가장 높은 MCS를 선택한다. 하향링크(downlink; DL)에서 단말의 안테나 개수를 AP가 조절하는 것은 표준상 불가능하며 기존 기법 EERA [2]에서는 이러한

한계점을 해결하기 위해 action 프레임을 새로이 정의하여 AP가 단말에게 안테나의 켜고 끄를 요청하는 방식을 선택하였다. 실험 대상으로 하는 NIC은 Intel, Atheros사의 두 종류(Intel WiFi link 5300, Atheros AR9380)로 모두 최대 40 MHz 채널 결합과 3 by 3 다중입출력 전송이 가능하여 최대 450 Mbps의 전송속도를 사용 할 수 있다.

2.2. 파워 소모량 측정 환경



그림 2-2. 파워 소모량 측정 환경.

그림 2-2는 파워 소모량 측정 환경을 나타낸다. NIC의 파워 소모 측정을 위해 NIC에 입력되는 3.5 V 전원에 전류 감지 저항($40\text{ m}\Omega$)을 직렬로 연결하였다. 전류 감지 저항의 전압 강하를 측정하여 전원으로부터 출력되는

전류량을 알 수 있으며 전류와 전원 전압의 곱으로 NIC에서 소모하는 파워를 계산 할 수 있다. 이때 전압 강하는 National instrument사의 USB-6210 DAQ(data acquisition module)와 LabView를 이용하여 측정 및 기록 하였다. 위 방법으로 측정한 파워 소모량은 크게 수신 상태, 송신 상태, IDLE 상태의 파워 소모량으로 구분 할 수 있다. 수신 상태, 송신 상태의 파워 소모량은 패킷을 수신, 송신하는 동안의 파워 소모량을 나타내며 IDLE상태의 파워 소모량의 경우 패킷의 송, 수신 없이 대기 하고 있는 상태에서 소모하는 파워의 양을 나타낸다. 이러한 파워 소모량 측정 결과와 모델링의 결과는 3장에서 자세히 설명한다. 추가적으로 송신 파워가 송신 시 파워 소모량에 미치는 영향을 확인하기 위해 Agilent사의 E4417A EPM-P 시리즈 이중 채널 파워 미터를 사용하여 안테나 포트에서 출력되는 파워를 측정 하였다.

2.3. 채널 측정 환경

시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 분석하기 위해 실내 환경의 다중입출력 채널을 측정하였고 채널 모델로 사용하였다. 이는 Intel WiFi link 5300 NIC을 이용하여 측정[4] 가능하며 측정된 결과와 MATLAB을 이용해 채널 상태 정보(channel state information; CSI)를 계산 할 수 있다. 다양한 채널 상태에서 제안 기법을 검증하기 위해 사무실 환경의 여러 지점과 단말이 정지된 상태, 움직이는 상태 등의 채널을 측정 및 시뮬레이션에 적용하였다.

제 3 장 파워 소모 모델

에너지 효율적인 데이터 전송을 위해서는 실제 데이터를 전송하기 이전에 특정 전송 방법에서 소모할 에너지 양을 예측해야 한다. 에너지는 파워와 시간의 곱으로 파워 소모 모델과 전송 또는 IDLE 시간을 이용하여 계산 할 수 있다. 본 장에서는 IDLE, 수신상태, 송신상태의 파워 소모량의 측정 결과와 모델링 결과를 설명 한다. IDLE상태와 수신상태의 모델은 측정된 자료를 기반으로 EERA[2]에서 정의한 모델의 계수를 수정 하였으며 송신 상태의 파워 소모량의 경우 새롭게 정의 내린다. 다양한 변수의 파워 소모량을 하나의 식으로 표현하기 위해 통계 프로그램 SPSS를 이용하여 오차가 가장 적은 계수를 결정 하였다. 모델링 식과 실제 측정결과의 최대 오차는 5% 이하로 실제 측정결과에 매우 근접한 모델링 결과를 얻을 수 있었다.

3.1. IDLE 상태의 파워 소모량

그림 3-1은 Intel과 Atheros사의 NIC이 IDLE 상태일 때 파워 소모량을 나타낸다. IDLE 상태에서 단말은 채널을 sensing 하며 대기 한다. 이 때 파워 소모량은 사용되고 있는 있는 안테나 개수에 비례하며 20 MHz

대역폭을 사용할 때 보다 40 MHz 대역폭을 사용할 때 증가한다.

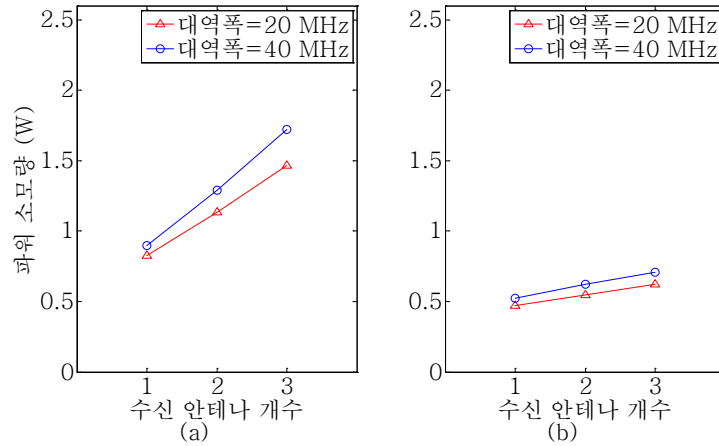


그림 3-1. IDLE상태 파워 소모량 측정 결과; (a) Intel, (b) Atheros.

IDLE 상태의 파워 소모량은 식 (3.1)로 나타낼 수 있다.

$$P_{idle} = i_1 \cdot N_{rx} \times BW + i_2 \cdot N_{rx} + P_c \quad (3.1)$$

식 (3.1)에서 N_{rx} 는 수신 안테나 개수, BW 는 대역폭, P_c 는 다른 변수의 영향을 받지 않는 일정한 파워를 나타내며 i_1, i_2 는 계수를 나타낸다. 계수의 값은 두 NIC의 경우에 대해 다음 표 3-1과 같다.

표 3-1. IDLE 상태의 파워 소모량 모델의 계수.

IDLE 상태의 파워 소모량 모델의 계수			
	i_1	i_2	P_c
Intel	4.117	241.4	493.1
Atheros	1.654	34.62	414.7

3.2. 수신 상태의 파워 소모량

그림 3-2는 수신상태의 파워 소모량 측정 결과를 나타낸다. 각 그래프는 MCS 0 패킷을 수신 시 소모하는 파워 소모량을 나타낸다. IDLE 상태와 동일하게 수신상태에서도 Intel사의 NIC이 Atheros 사의 NIC보다 더 많은 파워를 소모한다. 수신 상태의 파워 소모량은 수신안테나 개수, 대역폭에 비례하지만 MCS는 큰 영향을 미치지 않는다.

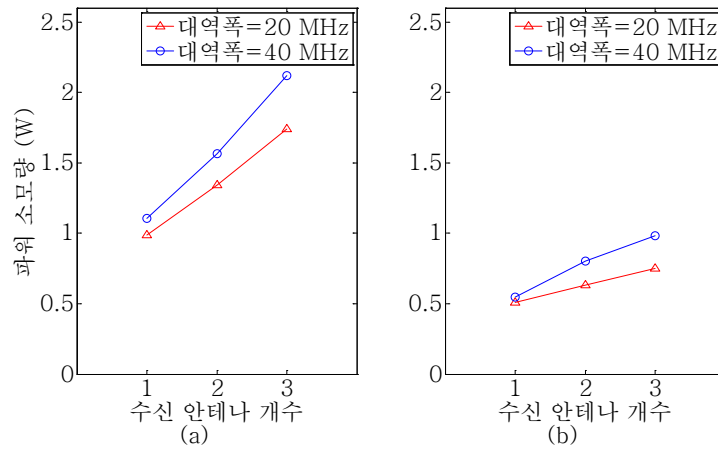


그림 3-2. 수신 상태 파워 소모량 측정 결과; (a) Intel, (b) Atheros.

수신 상태의 파워 소모량은 식 (3.2)로 나타낼 수 있다.

$$P_{rx} = (j_1 \cdot N_r + f(N_{ss})) \times BW + j_2 \cdot N_r + j_3 \cdot r + P_c \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 N_{rx} 는 수신 안테나 개수, N_{ss} 는 스트림의 개수, BW 는 대역폭, r 은 전송속도, P_c 는 다른 변수의 영향을 받지 않는 일정한 파워를

나타내며 $f()$, j_1, j_2, j_3 는 계수를 나타낸다. 계수의 값은 두 NIC의 경우에 대해 표 3-2와 같다. 표 3-2에서 SS, DS, TS는 각각 single stream, dual stream, triple stream을 사용하여 전송 할 경우를 나타낸다.

표 3-2. 수신 상태의 파워 소모량 모델의 계수.

수신 상태의 파워 소모량 모델의 계수							
	$f(N_{ss})$			j_1	j_2	j_3	P_c
	SS	DS	TS				
Intel	3.34	4.2	4.6	2.5	354	0.2	493.1
Atheros	0.6	4.6	7	2.31	19.8	0.3	414.7

3.2. 송신 상태의 파워 소모량

송신 상태의 파워 소모량은 수신 상태의 파워소모량에 추가적으로 송신 파워의 변수를 포함하며 송신 파워가 증가 할수록 파워 소모량 또한 증가한다.

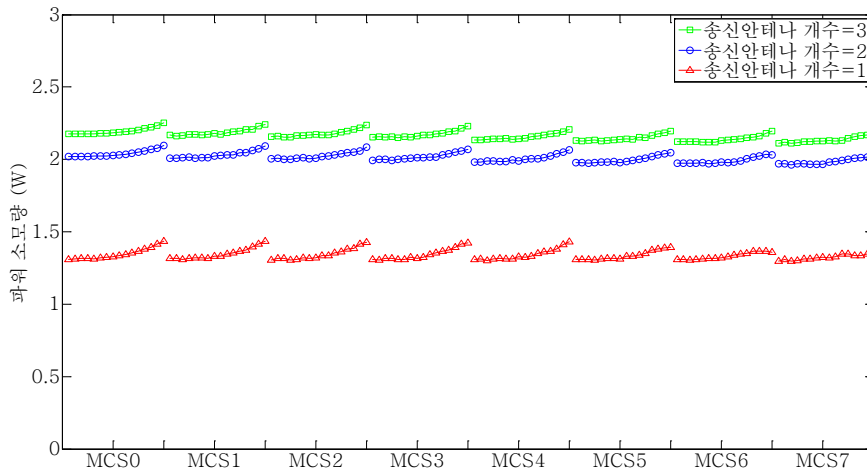


그림 3-3. Intel NIC의 송신 상태 파워 소모량 측정 결과.

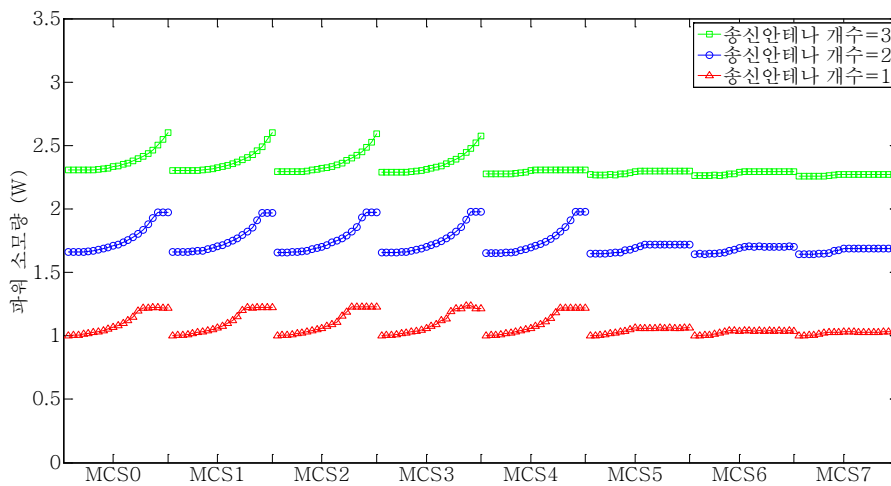


그림 3-4. Atheros NIC의 송신 상태 파워 소모량 측정 결과.

그림 3-3, 4의 그래프는 는 모든 MCS와, 1 dBm 단위로 설정 된 송신 파워로 패킷을 전송하였을 경우의 파워 소모량을 나타낸다. 하나의 MCS내에서 각 점들은 1 dBm 간격의 송신 파워를 의미하며 0 dBm 부터 시작하여 오른쪽으로 갈수록 높은 송신 파워를 사용한 결과이다. 그림 3-4의 Atheros NIC 파워 소모량 그래프를 보면 송신 안테나를 3개 사용하는 경우의 MCS 0, 1, 2, 3 (또는 MCS 16, 17, 18, 19)를 제외한 나머지 모든 MCS에서 파워 소모량이 전송 파워가 증가 하더라도 더 이상 증가하지 못하고 포화되는 것을 확인 할 수 있다. 그림 3-3의 Intel NIC 파워 소모량 그래프의 MCS 6, 7에서도 비슷한 측정 결과를 확인 할 수 있다. 파워 미터를 사용해 송신 파워를 직접 측정해본 결과 실제로 송신 파워를 증가시키지 못하는 것으로 확인 되었다. 이러한 동작은 파워앰프의 특성과 관련이 있다[5].

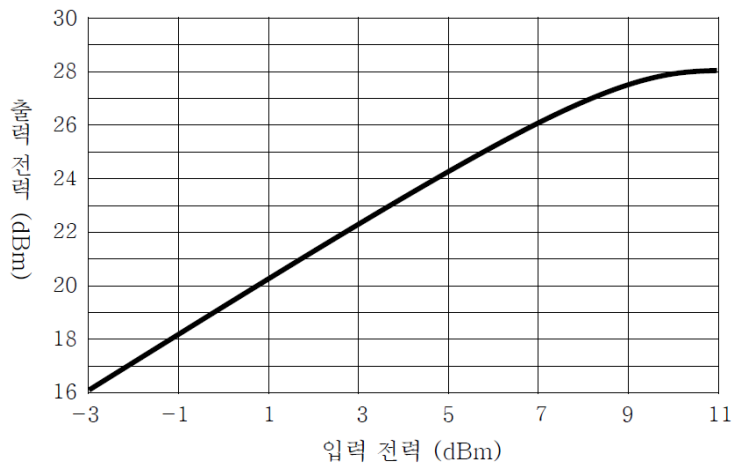


그림 3-5. 파워 앰프의 입/출력 특성 그래프.

그림 3-5는 파워앰프의 일반적인 입/출력 특성그래프로 가로축은 파워앰프의 입력 파워를, 세로 축은 파워 앰프의 출력 파워를 나타낸다. 입력 파워가 낮을 경우 파워 앰프는 선형 영역에서 동작한다. 하지만 입력 파워가 높아질 경우 비선형 구간에서 동작하게 되며 이는 출력신호 진폭의 감소로인해 수신기의 오류 벡터 크기를 증가 시킨다.

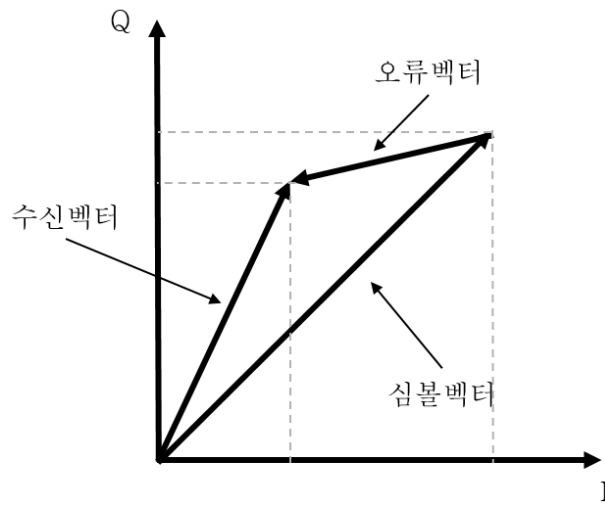


그림 3-6. 오류 벡터 크기.

그림 3-6은 오류 벡터 크기와 수신벡터, 심볼벡터의 관계를 나타낸다. 오류 벡터 크기가 커지게 되면 오류 확률이 커지게 되며 이러한 현상을 막기 위해 디바이스 드라이버 상에서 파워 앰프의 출력 파워를 제한한다. 출력 파워의 제한이 설정된 파워는 MCS마다 다르며 사용하는 안테나 개수와도 관계가 있다. 여러 개의 안테나를 사용하면 각 안테나에 분배되어 사용되기 때문에 파워 앰프 또한 선형영역에서 동작 할 수 있게 된다. 따라서 안테나를

여러 개 사용 할수록 더 높은 전송 파워를 사용 할 수 있게 된다. 802.11n에서 사용되는 모듈레이션 중 16QAM, 64QAM은 진폭의 정보를 사용하므로 파워 앰프가 비선형 구간에서 동작할 경우 위상 정보만을 사용하는 BPSK, QPSK보다 더욱더 큰 영향을 받게 된다. 이에 따라 16QAM, 64QAM을 사용하는 MCS에서는 낮은 송신 파워에서 더 이상 파워를 증가시키지 못하게 된다.

그림 3-7, 8은 각각 Intel과 Atheros NIC의 PAPR(peak to average power ratio)측정 결과를 나타낸다. 파워 앰프의 입/출력 특성상 높은 파워를 사용할 경우 비선형 구간에서 동작하기 때문에 PAPR은 감소하게 된다. 하지만 송신 파워의 제한을 통해 높은 모듈레이션에서 PAPR이 감소하지 않는 것을 확인 할 수 있다. PAPR은 Agilent사의 N9020A MXA 신호 분석기를 이용하여 측정하였다.

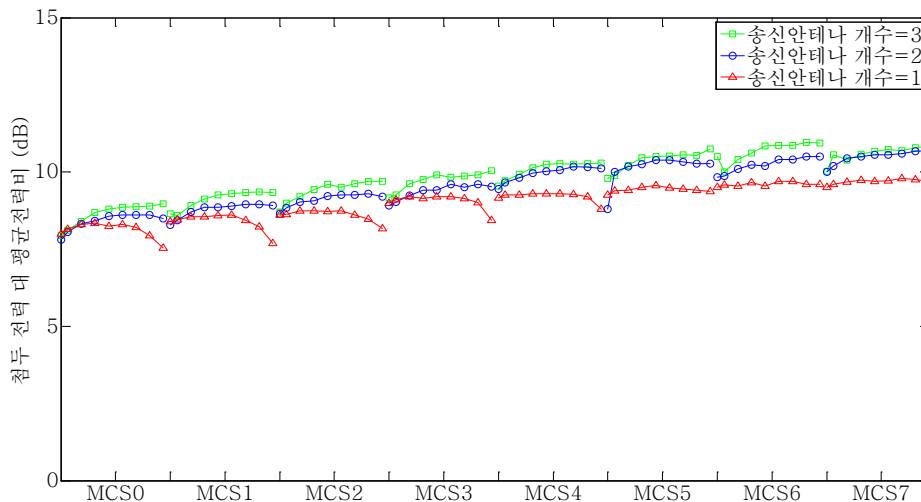


그림 3-7. Intel NIC의 PAPR 측정 결과.

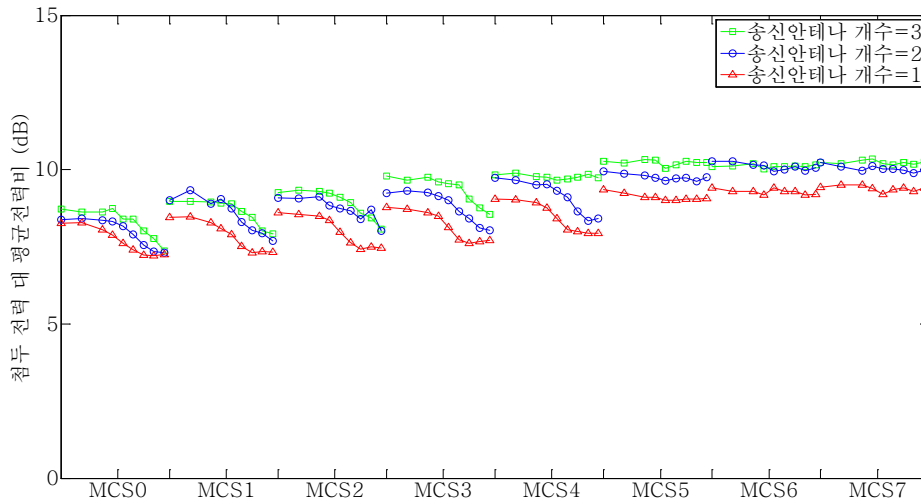


그림 3-8. Atheros NIC의 PAPR 측정 결과.

송신 상태의 파워 소모량은 식 (3.3)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{tx} = N_{tx} \times (f_1(N_{tx}) \cdot P_t + k_1 \cdot BW + f_2(N_{tx})) + k_2 \cdot BW + P_c \quad (3.3)$$

식 (3.3)에서 N_{tx} 는 송신 안테나 개수, P_t 는 송신 파워, BW 는 대역폭 P_c 는 다른 변수의 영향을 받지 않는 일정한 파워를 나타내며 $f_1(), f_2(), k_1, k_2$ 는 계수를 나타낸다. 계수의 값과 최대 송신 파워는 Intel, Atheros NIC에 대해 표 3-3, 4, 5, 6로 정리하였다. 전송속도와 스트림 개수는 파워 소모량에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 확인되어 생략하였다.

표 3-3. 송신 상태의 파워 소모량 모델의 계수.

송신 상태의 파워 소모량 모델의 계수									
	$f_1(N_{tx})$			$f_2(N_{tx})$			k_1	k_2	P_c
	1	2	3	1	2	3			
Intel	3.8	1.3	0.9	728.6	721	536	0.39	1.4	493.1
Atheros	7.8	2.7	1.13	559.8	604.7	613.2	0.1	1.0	414.7

표 3-4. Intel NIC의 최대 송신 파워 (대역폭 20, 40 MHz).

Intel NIC의 최대 송신 파워 (대역폭 20, 40 MHz)									
MCS \ 안테나 개수	0	1	2	3	4	5	6	7	
1	-	-	-	-	-	13	11	10	
2	-	-	-	-	-	-	14	13	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	

표 3-5. Atheros NIC의 최대 송신 파워 (대역폭 20 MHz).

Atheros NIC의 최대 송신 파워(대역폭 20 MHz)								
안테나 개수 \ MCS	0	1	2	3	4	5	6	7
1	15	15	15	15	15	9	7	6
2	18	18	18	18	18	11	10	9
3	-	-	-	-	10	10	10	8

표 3-6. Atheros NIC의 최대 송신 파워 (대역폭 40 MHz).

Atheros NIC의 최대 송신 파워(대역폭 40 MHz)								
안테나 개수 \ MCS	0	1	2	3	4	5	6	7
1	15	15	15	15	15	12	10	9
2	18	18	18	18	18	14	13	12
3	-	-	-	-	13	13	13	11

제 4 장 제안 기법

제안 기법 ESER은 에너지 효율적인 데이터 전송을 위해 유효 SNR을 이용한다. 시뮬레이션 상에서 하향링크와 상향링크의 채널은 같다고 가정하며 AP가 송신하는 패킷을 수신한 단말은 현재 채널의 채널 상태 정보를 얻을 수 있다. 이때 모든 MCS의 유효 SNR을 계산하기 위해서는 스트림 3개 이상의 패킷을 수신해야 한다. 이를 위해 AP는 그림 4-1과 같이 비컨(beacon) 메시지 직후에 MCS 16의 빈 데이터 패킷(null data packet; NDP)을 송신한다. 빈 데이터 패킷은 물리계층의 헤더만을 포함하기 때문에 전송 시간이 짧고 이에 따라 유효 SNR을 얻기 위한 오버헤드를 최소화 할 수 있다. 단말에서 빈 데이터 패킷 수신 시 에러확률을 최소화하기 위해 3 by 3 전송 중 모듈레이션이 가장 낮은 MCS 16을 사용한다.

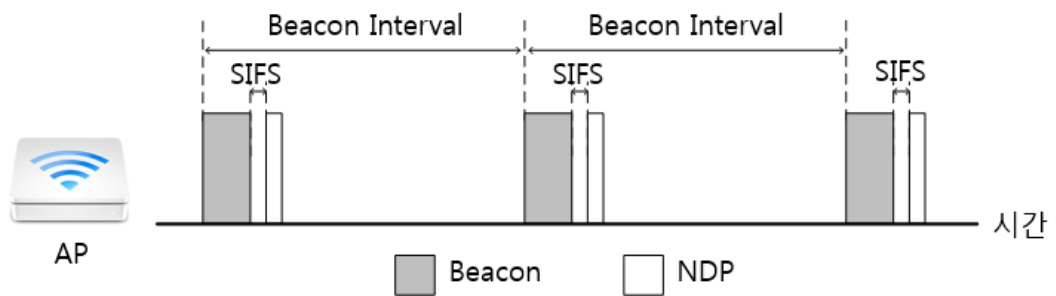


그림 4-1. 주기적인 NDP 전송.

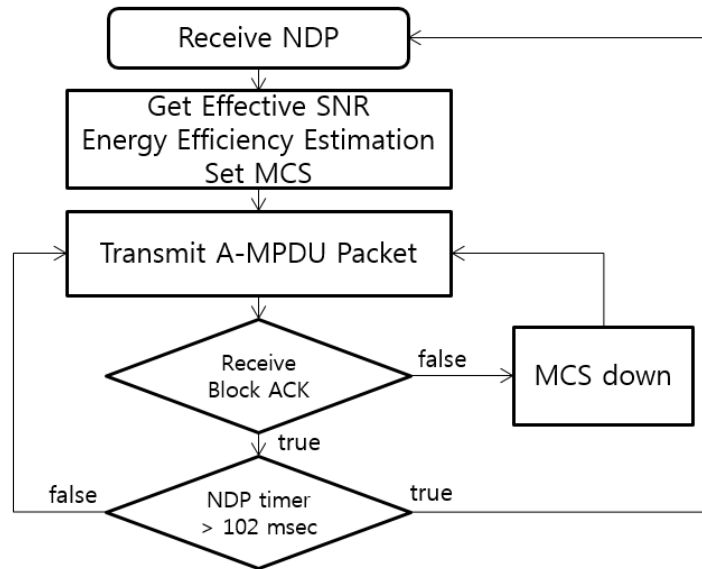


그림 4-2. 제안 전송속도 조절 기법의 순서도.

그림 4-2는 제안 전송속도 조절 기법 ESER의 순서도를 나타낸다. 빈 데이터 패킷을 수신한 단말은 식 (4.1) 또는 (4.2)를 사용하여 에너지 효율을 추정하며 에너지 효율이 가장 높은 MCS를 선택한다. 설정된 MCS를 이용하여 A-MPDU 패킷을 전송한 뒤 block ACK을 수신할 경우 다음 빈 데이터 패킷을 수신할 때까지 고정된 MCS 등급의 A-MPDU 패킷을 전송하며 block ack을 수신하지 못할 경우 MCS 등급을 낮추는 동작을 수행한다.

에너지 효율, 즉 단위 에너지 당 전송 가능한 비트 수를 얻기 위해서는 식 (4.1)에 나타나있는 파워 소모량, 송수신 및 IDLE시간, 성공적으로 전송될 비트 수를 필요로 한다.

$$\text{에너지 효율} = \frac{\text{전송 비트}}{P_{tx} \times T_{tx} + P_{rx} \times T_{rx} + P_{IDLE} \times T_{IDLE}} \quad (4.1)$$

식 (4.1) 분자의 성공적으로 전송 가능한 비트 수는 주기적으로 얻을 수 있는 유효 SNR을 이용하여 예측 할 수 있다. 분모의 P_{tx} , P_{rx} , P_{IDLE} 는 각각 송신, 수신, IDLE 상태의 파워 소모량을 의미하며 T_{tx} , T_{rx} , T_{IDLE} 은 각각 송신, 수신, IDLE 상태의 전송 시간을 의미한다. 파워 소모량은 MCS에 따라 3장에서 소개한 파워 소모 모델을 이용하여 얻을 수 있다.

포화된 트래픽의 경우 IDLE시간은 DIFS, SIFS 시간과 backoff 시간의 평균으로 계산 할 수 있지만 불포화 트래픽의 경우 예측하기 쉽지 않다. 불포화 트래픽의 경우 EERA [2]에서 제안한 아래 식 (4.2)를 이용한다.

$$E_b = \frac{P_a \times T_a + P_{na} \times T_{na}}{S \times T} = \frac{P_a - P_{na}}{G} + \frac{P_{na}}{S} \quad (4.2)$$

위 식에서 P_a 와 P_{na} 는 각각 액티브 시간(송신 또는 수신 시)동안 소모하는 파워를 나타내며 T_a 와 T_{na} 는 액티브 시간을 의미한다. G 와 S 는 각각 유효 수율(goodput)과 신호원 속도(source rate)을 나타내고 $G \cdot T_a = S \cdot T$ 일 때 에너지 효율은 시간에 관련된 변수를 포함하지 않는 식으로 정리 할 수 있다.

제 5 장 시뮬레이션 결과

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안 기법의 성능을 검증 한다. 시뮬레이션은 NS-3(Network Simulator 3)를 이용해 수행하였다. 제안 기법의 성능을 미리 저장된 채널 트레이스를 이용하여 최적의 MCS를 선택하는 EOPT(energy optimal rate adaptation), 기존의 에너지 효율적인 전송속도 조절 기법인 EERA [2], 그리고 유효 수율의 최대화를 목적으로 하는 전송속도 조절 기법 MiRA(MIMO rate adaptation) [6]와 비교한다.

EOPT는 단말이 현재 채널을 추가적인 오버헤드 없이 알 수 있다고 가정한다. 이에 따라 항상 에너지 효율적인 MCS를 선택 할 수 있게 되며 모든 채널 모델에서 최적의 성능을 보인다. EERA [2]는 에너지 효율적인 전송을 위해 MCS에 대한 에너지 효율 함수가 단봉형(unimodal) 함수임을 증명하였고 프로빙 오버헤드를 줄이기 위해 ternery search를 사용한다. Ternery search는 안테나 개수 별 사용 가능한 MCS 8개에 대해 4~5회의 프로빙으로 최적의 MCS를 선택할 수 있다. 프로빙 오버헤드가 감소 하였더라도 시변 채널에서 이러한 동작은 변화하는 채널에 대해 최적의 MCS를 선택하는데 한계가 있으며 이러한 원인에 의한 성능 저하는 MCS 분포도에서 확인 할 수 있다. MiRA [6]는 zigzag방식의 프로빙을 이용하여 프로빙 기반의 유효 수율 추정을 수행한다. 하나의 스트림 내부에서의 전송속도 조절 기법(intra mode rate adaptation), 스트림 개수를 변경할

경우의 전송속도 조절 기법(inter mode rate adaptation)을 제안하였으며 항상 최대의 유효 수율을 찾는 방향으로 프로빙이 진행된다. Intra mode rate adaptation이 완료되면 inter mode rate adaptation을 수행하며 현재의 유효 수율과 변경하고자 하는 MCS를 사용하여 전송 시 에러가 없다고 가정할 때 유효 수율에 가장 근접한 MCS를 선택한다. 모든 intra mode, inter mode rate adaptation이 완료되면 가장 높은 유효 수율을 얻을 수 있는 MCS를 결정하게 되며 이는 프로빙 주기가 끝나거나 유효 수율이 변화할 때까지 유지된다. 프로빙의 주기는 프로빙 타이머를 사용하며 block ACK을 수신하였을 때 유효 수율의 평균 값과 표준편차를 저장하여 유효 수율의 변화가 있을 경우 MCS를 높이거나 낮추게 된다. MiRA[6]의 경우 에너지 효율에 관계 없이 가장 높은 유효 수율을 얻을 수 있는 MCS를 선택하기에 더 많은 안테나를 사용하여 많은 파워를 사용하게 된다. 따라서 유효 수율은 높지만 신호원 속도가 낮은 경우에는 에너지 효율이 감소하게 된다.

보다 현실적인 시뮬레이션을 위해 사무실 환경에서 단말이 정지된 상태, 이동하는 상태의 채널을 측정하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 5 GHz 대역의 20 MHz 채널을 측정 하였으며 MATLAB을 이용하여 채널 매트릭스를 계산한 후 NS-3에 적용하였다[4].

5.1. 시불변 채널 시뮬레이션 결과

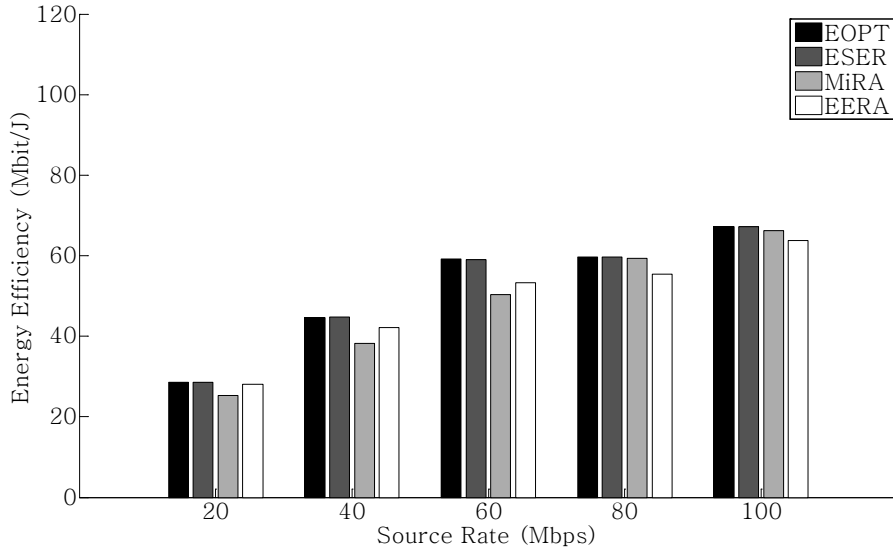


그림 5-1. 시불변 채널의 에너지 효율 시뮬레이션 결과.

그림 5-1은 단말이 정지된 상태의 비교적 안정적인 채널을 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 제안 기법 ESER의 경우 적은 오버헤드로 비컨마다 주기적으로 채널 정보를 알 수 있으며 이에 따라 최적에 가까운 성능을 보인다. MiRA [6]의 경우 신호원 속도가 낮은 경우에도 높은 MCS를 사용하기 때문에 에너지 소모량이 많고 이에 따라 에너지 효율이 감소하게 된다. EERA [2]는 프로빙 오버헤드로 인해 성능이 감소하였으며 이는 다음 MCS 분포도에서 확인 할 수 있다.

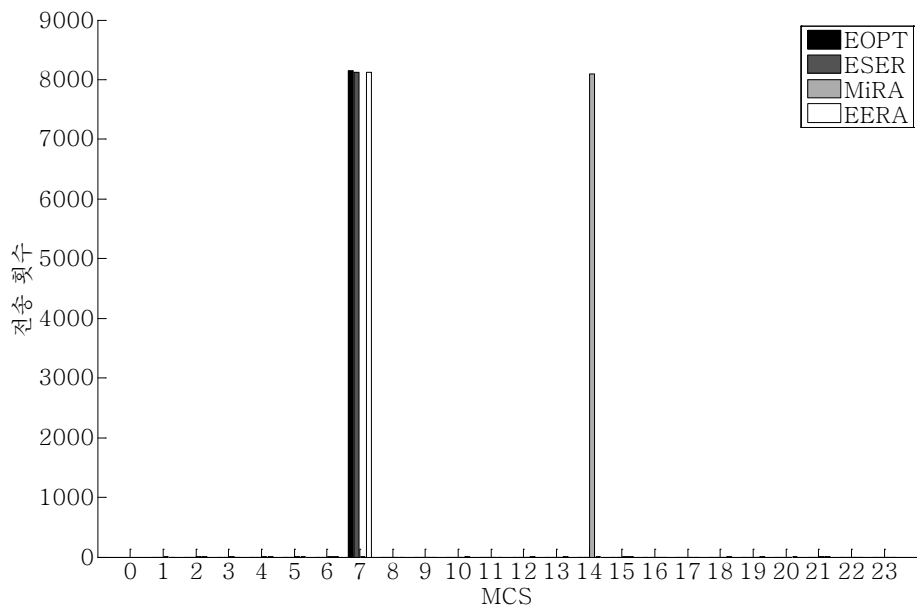


그림 5-2. 시불변 채널의 MCS 분포도. (신호원 속도=20 Mbps)

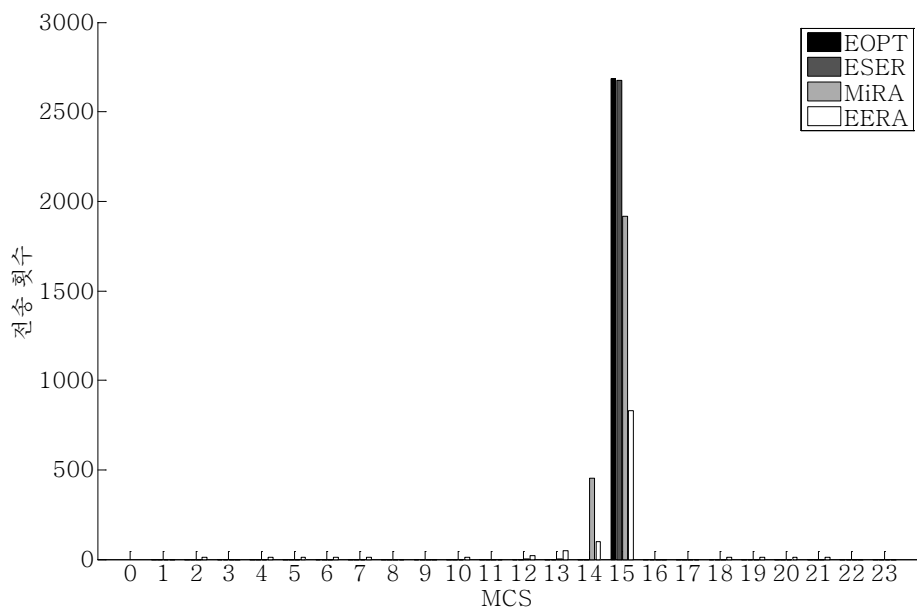


그림 5-3 시불변 채널의 MCS 분포도. (신호원 속도=100 Mbps)

그림 5-2, 3은 단말이 고정된 상태에서 측정한 시불변 채널에서 각 전송속도 조절 기법을 적용했을 경우의 MCS의 분포도를 나타낸다. 그림 5-2는 신호원 속도가 20 Mbps, 그림 5-3은 100 Mbps일 때의 그래프이며 신호원 속도가 20 Mbps인 경우 총 전송횟수가 신호원 속도가 100 Mbps인 경우 보다 많은 이유는 A-MPDU의 길이가 상대적으로 짧기 때문에 동일한 시간에 더 많은 패킷을 전송 할 수 있기 때문이다.

제안 기법 ESER의 경우 시불변 채널에서 EOPT와 근사한 성능을 보이며 이는 두 전송속도 조절 기법의 MCS분포를 통해 확인할 수 있다. 신호원 속도가 20 Mbps인 경우 안테나 1개를 이용하여 전송 할 수 있는 최고 전송속도 MCS 7을 선택한다. 하지만 100 Mbps인 경우 신호원 속도보다 높은 유효 수율을 얻기 위해 안테나 2개를 사용하여 전송 할 수 있는 최고 전송속도 MCS 15를 선택하게 된다. 빈 데이터 패킷의 전송으로 인한 오버헤드는 패킷 전송 횟수에 큰 영향을 미치지 않음을 확인 할 수 있다. MiRA[6]의 경우 신호원 속도가 낮은 경우에도 최대한의 유효 수율을 얻을 수 있는 MCS 15를 선택하기 때문에 불필요한 에너지를 소모하게 된다. EERA[2]의 경우 프로빙 오버헤드로 인해 최적의 MCS의 전송 횟수가 감소함에 따라 에너지 효율이 감소하게 된다. 프로빙 주기가 짧은 수록 최적의 MCS를 찾는 시간은 감소 하지만 채널의 변하지 않는 상황에서는 프로빙을 많이 할수록 에너지 효율은 감소 하게 된다.

5.2. 시변 채널 시뮬레이션 결과

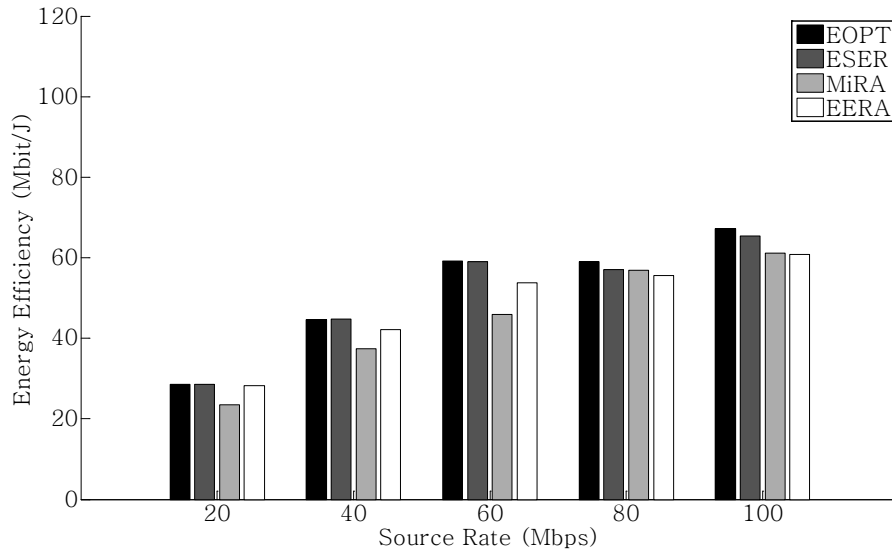


그림 5-4 . 시변 채널의 에너지 효율 시뮬레이션 결과.

그림 5-4는 단말을 움직이며 측정한 채널을 사용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 단말을 움직이며 측정한 채널의 경우 시간에 따라 채널이 변화하며 이에 따라 각 시간에서 최적의 MCS는 바뀌게 된다. 제안 기법 ESER은 비컨 주기마다 채널을 알 수 있지만 비컨 사이에서 채널이 바뀌는 경우 최적의 MCS가 바뀔 수 있으며 이에 따라 EOPT보다 약간 낮은 에너지 효율을 갖는다.

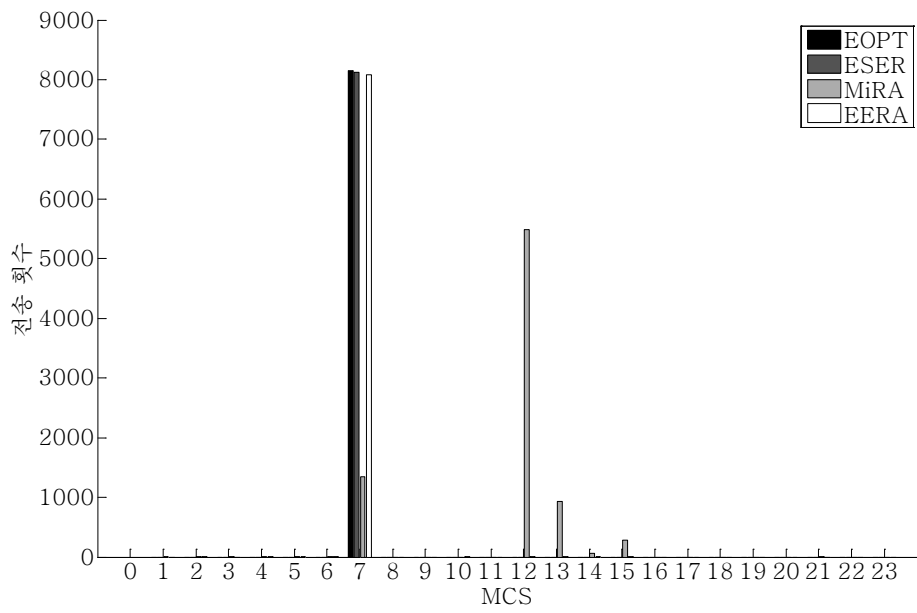


그림 5-5 . 시변 채널의 MCS 분포도. (신호원 속도=20 Mbps)

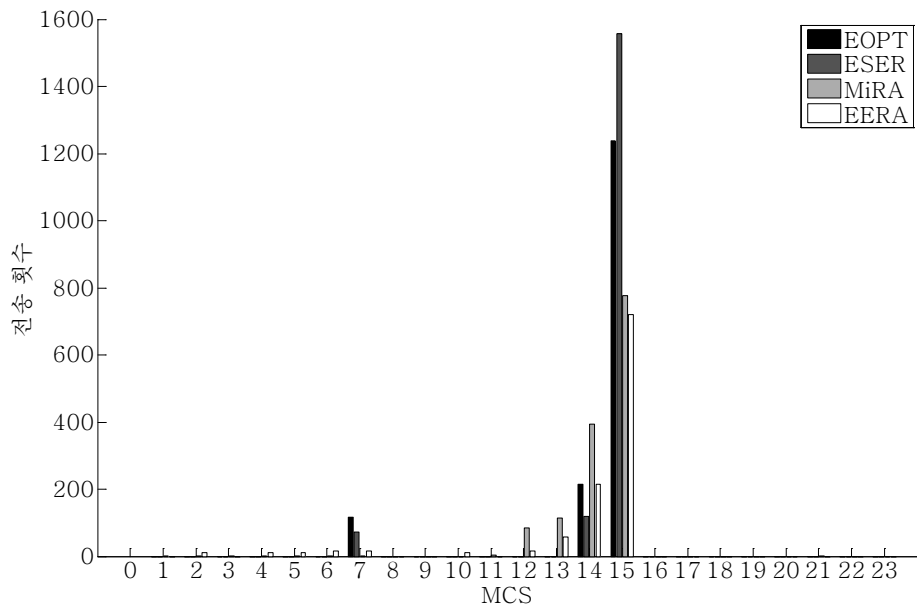


그림 5-6. 시변 채널의 MCS 분포도. (신호원 속도=100 Mbps)

그림 5-5, 5-6은 각각 단말이 이동하는 상태에서 측정한 시변 채널에서 각 전송속도 조절 기법을 적용했을 경우의 MCS의 분포도를 나타낸다.

제안 기법 ESER의 경우 신호원 속도가 낮은 경우 EOPT와 근사한 분포를 보이지만 신호원 속도가 높은 경우 상대적으로 MCS 15를 더 많이 전송한다. 이는 제안기법이 채널을 알 수 있는 주기 사이에 채널 상태가 바뀔 경우 EOPT는 MCS를 변경할 수 있지만 ESER의 경우 다음 빈 데이터 패킷을 수신할 때까지 MCS를 변경하지 않기 때문에 나온 결과이다. 그림 5-6의 분포를 보면 MCS 15의 경우 ESER의 전송횟수가 더 많지만 MCS 7의 경우 EOPT의 전송 횟수가 더 많음을 알 수 있다. MCS 15를 이용하여 패킷을 전송 중 채널 상태가 나빠졌을 경우 EOPT는 즉시 MCS를 7로 낮출 수 있지만 ESER은 다음 빈 데이터 패킷을 수신할 때까지 MCS 15를 유지한다. MiRA [6]의 경우 변화 하는 채널에 적응하기 위해 다양한 MCS를 사용하며 신호원 속도가 낮은 경우 안테나 2개를 이용한 MCS를 선택하기에 에너지 효율이 감소하게 된다. EERA [2] 또한 변화하는 채널에 대해 최적의 MCS를 선택하기 위해 프로빙을 시도하며 이는 최적의 MCS를 이용한 전송횟수를 감소 시키는 결과를 가져온다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 상용 IEEE 802.11n NIC의 다양한 설정에서의 파워 소모량을 측정하고 모델링 하였으며 파워 소모 모델을 이용하여 에너지 효율을 높이기 위한 유효 SNR 기반의 에너지 효율적인 전송속도 조절 기법을 제안하였다.

NIC의 파워 소모량 측정을 통해 기존의 수신, IDLE 상태의 파워 소모량 모델에 추가적으로 송신 상태의 파워 소모량을 모델링 하였다. 송신 파워가 송신 시 파워 소모량에 미치는 영향을 고려 하였으며 파워 앰프의 동작과 관련된 최대 송신 파워의 제한을 파워 소모 모델에 포함하였다. 제안 기법 ESER은 주기적으로 빈 데이터 패킷을 수신하여 채널 상황을 알 수 있으며 가장 에너지 효율이 높은 MCS를 선택 할 수 있게 된다. 기존의 프로빙 기반의 전송속도 조절 기법에 비해 채널의 변화에 프로빙 오버헤드 없이 최적의 MCS를 선택 할 수 있다. 시뮬레이션 결과 실내 채널환경에서 최적에 가까운 성능을 보였으며 특히 시변 채널에서 기존의 전송속도 조절 기법보다 개선된 성능을 보인다.

차세대 802.11 표준 802.11ac의 경우 현재 사용되고 있는 802.11n 표준보다 더 넓은 대역폭과 많은 안테나를 사용한 다중 안테나 전송을 정의한다. 이에 따라 탐색해야 하는 MCS의 범위가 기하급수적으로 증가하게 되며 프로빙 기반의 기존의 전송속도 조절 기법들을 적용하는데 한계가 있을

것으로 예상된다. 차세대 표준에 본 논문의 제안 기법을 적용한다면 최소한의 오버헤드인 빈 데이터 패킷을 사용하기에 MCS의 범위에 관계 없이 최적의 MCS를 선택할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE 802.11-2012, Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, IEEE std., 2012 IEEE.
- [2] C. Li, C. Peng, S. Lu, and X. Wang. “Energy-based rate adaptation for 802.11n,” in *Proc. ACM MOBICOM*, 2012.
- [3] D. Halperin, W. Hu, A. Sheth, and D. Wetherall. “Predictable 802.11 packet delivery from wireless channel measurements,” in *Proc. ACM SIGCOMM*, 2010.
- [4] D. Halperin, W. Hu, A. Sheth, and D. Wetherall. “Tool release: gathering 802.11 n traces with channel state information,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 41.1 , 2011, p.53.
- [5] Naraine, P. “Predicting the EVM performance of WLAN power amplifiers with OFDM signals,” *Microwave Journal*, pp.222-227, 2004.
- [6] I. Pefkianakis, Y. Hu, S. H. Wong, H. Yang, and S. Lu. “MIMO Rate Adaptation in 802.11n Wireless Networks,” in *Proc ACM MOBICOM*, 2010.

Abstract

Recently, numerous devices adapt to the IEEE 802.11n standard and a large amount of researches has reported on how to minimize the energy consumption of a NIC in a mobile device. Since IEEE 802.11n standard allows the use of a broader bandwidth and MIMO transmission scheme in contrast to the legacy standard (i.e., IEEE 802.11 a/b/g), the energy efficiency becomes an important issue. This thesis presents modeling of power consumption of an IEEE 802.11n NIC and a rate adaptation algorithm that maximizes energy efficiency of mobile device. To model the power consumed by commercial device, it determines many different variables by measuring the power consumption of NICs from Intel and Atheros under transmission, reception, and IDLE modes. Based on the power consumption model, it presents a rate adaptation algorithm that maximizes the energy efficiency. The proposed scheme estimates the energy efficiency based on effective SNR and selects the MCS that yields the highest energy efficiency. The effective SNR can be calculated by having AP periodically send a null data packet. The performance of the proposed scheme is confirmed by simulations that model various indoor channel environments. It turned out that the proposed scheme outperforms existing schemes and exhibits near-optimal performance for time-varying environment.

Keywords: 802.11n WLAN, energy efficiency, rate adaptation

Student Number: 2012-20768