

파워 절약을 위한 IEEE 802.16 OFDMA 시스템의 효율적 상향링크 자원 할당 알고리즘

윤종필[○], 김우재, 백주영, 서영주

포항공과대학교 컴퓨터공학과

{feeling[○], hades15, nalsunia, yjsuh}@postech.ac.kr

Efficient Uplink Resource Allocation for Power Saving in IEEE 802.16 OFDMA Systems

Jong-Pil Yoon[○], Woo-Jae Kim, Joo-Young Baek, and Young-Joo Suh
Department of Computer Science & Engineering, POSTECH

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.16 OFDMA 시스템에서 단말들의 에너지 절약을 위한 효율적인 상향 링크 자원 할당 알고리즘을 제시한다. 기지국은 각각의 단말들이 상향링크로 데이터를 전송할 수 있도록 상향링크 부프레임에 연속적인 형태의 자원을 할당해 줘야 한다. 이렇게 각 단말들의 에너지 소비를 고려하여 효율적으로 자원을 할당하는 방식은 최적화 문제의 형태로 접근할 수 있다. 본 논문에서는 전체 에너지 소비가 최소가 되는 자원 할당 문제를 Multiple Choice Knapsack 문제로 정의하고, 이를 효율적으로 풀 수 있는 준최적화 알고리즘을 제시한다. 준최적화 알고리즘은 전체 에너지 소비가 최소가 되는 각 단말들의 최적의 변조 및 부호화 기법을 찾는다. 그리고 성능평가를 통해 준최적화 알고리즘이 채널 상태만을 고려하여 변조 및 부호화 레벨을 결정하는 기법에 비해 최대 53%의 성능 이득을 보이는 것을 제시한다.

1. 서 론

인터넷이 발전함에 따라 사용자들은 점점 더 높은 데이터 전송속도를 제공할 수 있는 시스템 및 언제/어디에서나 접속할 수 있는 무선 시스템에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 광대역 무선 접속 시스템에 대한 사용자들의 요구를 충족시키기 위해 IEEE에서는 802.16 프로토콜 계열을 표준화 하였다. IEEE 802.16 [1,2]은 자원 예약 방식을 사용하는 매체 접속 제어 계층 프로토콜로서, 단말이 데이터를 전송하기 위해서는 기지국으로부터 자원을 할당 받아야 한다. 기지국은 단말의 QoS 요구사항과 대역폭 요구를 바탕으로 연속적인 형태로 자원을 할당해 준다. 그러나 현재 IEEE 802.16 표준에서는 자원 요구와 할당을 위한 시그널링 기법은 정의되어 있으나, 대역폭 할당 알고리즘은 정의하고 있지 않다. 본 논문에서는 단말의 에너지 효율을 고려한 기지국에서의 자원 할당 알고리즘을 제안한다.

에너지 효율은 대부분 배터리로 동작하는 무선 네트워크에서 중요한 이슈 중 하나이다. IEEE 802.16 네트워크에서 단말의 에너지 효율을 고려할 때, 단말의 파워를 절약하는 간단한 방법은 단말의 전송 파워를 낮추어 데이터를 전송하는 것이다. 하지만 파워를 낮춰서 데이터를 전송할 경우, 신호대 잡음비(SNR)의 감소를 초래하게 되며, 그로 인해 비트 에러율(BER)의 증가로 네트워크의 심각한 성능 감소를 야기한다. 그러나 IEEE 802.16과 같이 다중 전송 속도를 지원하는

네트워크에서는 파워를 낮춤으로써 발생하는 BER의 증가는 낮은 레벨의 변조 및 부호화 기법을 사용함으로써 문제를 해결할 수 있다. 따라서 전체 네트워크의 에너지 효율을 높이기 위해서는 단말의 파워와 변조 및 부호화 기법을 함께 고려해야 한다.

변조 및 부호화 레벨은 채널 상태 정보를 바탕으로 선택될 수 있다. 좋은 채널 상태를 바탕으로 높은 변조 및 부호화 레벨이 선택 되었을 경우, 단말은 특정 BER을 만족시키기 위해 높은 전송 파워로 데이터를 전송해야 한다. 반면에 좋은 채널 상태에도 불구하고 낮은 변조 및 부호화 레벨이 선택 되었을 때, 단말은 낮은 전송 파워로 데이터를 전송할 수 있다. 그러나 기지국은 단말이 낮은 변조 및 부호화 레벨을 통해서 동일한 양의 데이터를 전송할 수 있도록 더 많은 자원을 할당해야만 한다. 즉, 높은 변조 및 부호화 레벨이 선택되었을 때, 단말에게 할당되어야 하는 자원의 크기는 감소하지만 전송 파워는 특정 BER을 만족시키기 위해 증가된다. 이와 반대로 낮은 변조 및 부호화 레벨이 선택되었을 때, 단말은 낮은 전송 파워를 통해서 데이터를 전송할 수 있지만 할당되어야 하는 자원의 양은 증가된다. 이처럼 자원의 양과 전송 파워는 서로 tradeoff 관계를 가진다.

본 논문에서는 단말에 할당되는 자원 크기와 전송 파워 간의 tradeoff 관계를 고려하여, 최적의 변조 및 부호화 레벨을 선택함으로써 전체 네트워크의 에너지 소비를 최소화 하는 자원 할당 문제를 정의한다. 이 문제는 Multiple Choice Knapsack 문제와 같은 최적화

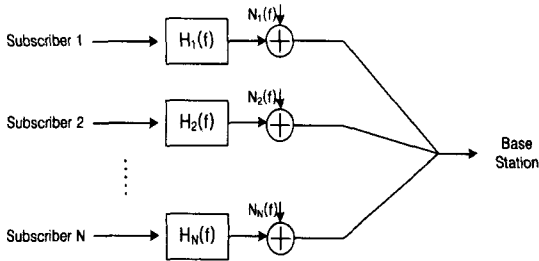


그림 1. IEEE 802.16 OFDMA 상향링크 채널 모델

문제로 정의할 수 있다. 그러나 Multiple Choice Knapsack 문제는 잘 알려져 있듯이 NP-hard 문제이며, 따라서 이 문제를 효율적으로 풀기 위한 준최적화 알고리즘이 필요하다.

본 논문의 2장에서 본 논문에서 풀고자 하는 문제를 정의한다. 그리고 문제를 해결하기 위한 준최적화 알고리즘을 3장에서 제시하고, 4장에서 실험을 통한 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문을 마무리 한다.

2. Multiple Choice Knapsack 기반의 문제 정의

본 논문의 목적은 전체 에너지 소비가 최소가 되도록 각각의 단말들에게 자원을 할당해 주는 것이다. 이때, 고려되어야 하는 것은 각 단말에게 할당되는 자원의 크기와 전송 파워이다. 여기서 자원의 크기와 전송 파워는 모두 변조 및 부호화 레벨에 따라 그 값이 결정될 수 있다. 따라서 전체 에너지 소비가 최소가 되도록 단말의 전송파워를 줄임으로써 각 할당되는 자원 양의 증가가 상향링크 부프레임의 총 심볼 수를 초과하지 않는 범위 내에서 각 단말의 변조 및 부호화 레벨을 결정하는 것이다. 즉, 이것은 각 단말을 위한 에너지 소비를 최대한 줄이면서 할당되는 자원 양의 증가가 최소가 되는 변조 및 부호화 레벨을 찾는 것이다. 이 문제는 Multiple Choice Knapsack 문제와 같이 정의될 수 있다. 본 장에서는 채널 상태 정보의 측정을 위해 상향링크 채널 모델을 정의하고, 할당되는 자원의 양과 변조 및 부호화 레벨간의 관계 그리고 에너지 소비와 변조 및 부호화 레벨간의 관계를 알아본다. 그리고 나서 해결하고자 하는 문제를 정의하도록 한다.

2.1 상향링크 채널 모델

IEEE 802.16 OFDMA 시스템의 상향링크 채널 모델은 그림1과 같이 모델링 할 수 있다[5]. 그림1과 같은 채널 모델에서 SNR $\rho_k(f)$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho_k(f) = |H_k(f)|^2 / N_k(f) \quad (1)$$

표1. 변조 및 부호화 레벨

인덱스	변조 기법	부호화율	b
1	64-QAM	3/4	4.5
2	64-QAM	2/3	4.0
3	16-QAM	3/4	3.0
4	16-QAM	1/2	2.0
5	QPSK	3/4	1.5
6	QPSK	1/2	1.0

여기서 $H_k(f)$ 은 단말 k 의 채널 주파수 응답 함수를 의미하며, $N_k(f)$ 은 잡음 전력 밀도 함수를 의미한다. 여기서 $\rho_k(f)$ ($1 \leq k \leq N$)은 각 변조 및 부호화 레벨에 따른 단말의 전송파워를 결정하기 위한 채널 상태 정보로 사용된다.

2.2 할당자원 크기와 변조 및 부호화 레벨간의 관계

기지국은 각각의 단말들이 데이터를 전송할 수 있도록 상향링크 부프레임에 자원을 할당한다. 할당되는 각 자원은 다수의 심볼로 구성되며, 하나의 심볼은 변조 및 부호화 레벨에 따라 표현할 수 있는 데이터의 양이 달라진다. 즉, 할당되는 자원은 전송하는 데이터 양과 변조 및 부호화 레벨에 따라 크기가 결정된다. 이때, 할당되는 자원의 양은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$B_k = \frac{\lambda_k}{b} \quad (2)$$

여기서 λ_k 는 현재 프레임에서 단말 k 에게 서비스 해줘야 하는 데이터 양(bits)을 의미하며, 이 값은 단말의 QoS 요구사항과 대역폭 요구에 따라 기지국의 스케줄러에 의해 결정된다. 따라서 현재 프레임에서 모든 단말에게 서비스 해줘야 하는 데이터 양은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda = \sum_{k=1}^N \lambda_k \quad (3)$$

그리고 b 는 변조 및 부호화 레벨로 심볼당 비트 수(bits/symbol)을 의미한다. 표1은 각 변조기법 및 부호화율에 따른 b 의 값을 정의하고 있다. 이때 단말 k 를 위해 할당되어야 하는 부반송파의 수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|D_k| = \lceil (\lambda_k / b) / (U_{sf} / S_d) \rceil = \left\lceil \frac{\lambda_k \cdot S_d}{b \cdot U_{sf}} \right\rceil \quad (4)$$

여기서 D_k 는 단말 k 에게 할당된 부반송파의 집합을 의미하며, U_{sf} 는 상향링크 부프레임의 지속 시간, S_d 는

심볼의 지속 시간을 나타낸다. 즉, (U_{sf}/S_d) 는 한 부반송파 축에서의 심볼들의 수를 나타낸다.

그리고 각 단말에게 할당되는 자원 크기의 합은 전체 상향링크 부프레임의 총 심볼 수를 초과할 수 없다. 따라서 총 자원의 크기(B)는 다음을 만족해야 한다.

$$\sum_{k=1}^N B_k \leq B \quad (5)$$

2.3 에너지 소비와 변조 및 부호화 레벨간의 관계

단말의 전송파워는 특정 BER을 만족 시키기 위해 채널 상태와 변조 및 부호화 레벨을 고려하여 결정되어야 한다. [3-5]에 따라 부반송파 j 에서 단말 k 의 전송 효율 $c_k[j]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c_k[j] = \log_2(1 + \beta p[j] \rho_k[j]) \quad (6)$$

여기서,

$$\beta = \frac{1.5}{-\ln(5BER)} \quad (7)$$

부반송파 j 에서 b bps/Hz을 전송하기 위해 요구되는 전송 파워를 $f_{bit}(j, b)$ 라고 하자. $f_{bit}(j, b)$ 는 (6)으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_{bit}(j, b) = \frac{2^b - 1}{\beta \rho_k[j]} \quad (8)$$

단말 k 의 에너지 소비(En_k)는 상향링크 부프레임의 지속 시간(U_{sf}) 동안 전송파워를 할당된 모든 부반송파(D_k)에 대해 합한 값이 된다. 즉 에너지 소비는 다음과 같이 표현된다.

$$En_k = \sum_{j \in D_k} f_{bit}(j, b) \cdot U_{sf} \quad (9)$$

따라서, 전체 에너지 소비(En_{tot})는 모든 단말의 에너지 소비의 합으로 표현할 수 있다.

$$En_{tot} = \sum_{k=1}^N En_k = \sum_{k=1}^N \sum_{j \in D_k} f_{bit}(j, b) \cdot U_{sf} \quad (10)$$

2.4 문제 정의

할당되는 자원 크기와 변조 및 부호화 레벨 관계 그리고 에너지 소비와 변조 및 부호화 레벨 관계를 통해서 전체 에너지 소비가 최소가 되고, 각 단말에게

할당되는 자원 크기의 합이 상향링크 부프레임의 전체 심볼수를 초과하지 않는 변조 및 부호화 레벨의 결정은 다음과 같이 정의된다.

$$\min_b \left(\sum_{k=1}^N \sum_{j \in D_k} f_{bit}(j, b) \cdot U_{sf} \right) \quad (11)$$

s. t.

$$\sum_{k=1}^N B_k \leq B$$

위의 정의는 Multiple Choice Knapsack 문제와 같은 최적화 문제이다. Multiple Choice Knapsack 문제는 다수의 클래스에 여러 아이템이 포함되어 있을 때, 각 클래스(Class) 별 하나의 아이템(item)을 선택하여 그 가치(Value)가 최대가 되는 아이템들을 선택하는 문제이다. 이때 선택된 아이템들의 무게(Weight)의 합은 가방에 담을 수 있는 총 무게(Knapsack)를 초과할 수 없다. 아래와 같이 위에서 정의한 문제의 각 변수들을 Knapsack 문제의 변수들로 치환하면, 두 문제가 동일하다는 것을 알 수 있다.

- 기지국과 단말간의 링크 → Class
- 선택 가능한 MCS 레벨 → Item
- 에너지 소비 → Value
- 할당되는 자원 크기 → Weight
- 상향링크의 총 심볼수 → Knapsack

Multiple Choice Knapsack 문제는 일반적으로 알려져 있듯이 NP-hard 문제로써 고속의 데이터 전송을 요구하는 IEEE 802.16 OFDMA 시스템에서 사용되기 위해서는 효율적인 준최적화 알고리즘이 필요하다. 따라서 다음 장에서는 위에서 정의한 문제를 해결하기 위한 준최적화 알고리즘을 제시하도록 한다.

3. 상향링크 자원 할당 알고리즘

에너지 소비가 최소가 되는 각 단말의 변조 및 부호화 레벨을 선택하기 위해서는 에너지 소비를 최대로 줄이면서 할당되는 자원 크기의 증가가 최소화 되는 변조 및 부호화 레벨을 선택해야 한다. 이것에 기반한 준최적화 알고리즘[6]을 제시하기 위해 다음과 같은 *benefit_ratio*을 정의한다.

$$benefit_ratio(k, i, j) = \begin{cases} \frac{En_k(i) - En_k(j)}{B_k(j) - B_k(i)} & i > j \\ 0 & i \leq j \end{cases} \quad (12)$$

위 *benefit_ratio* 함수는 단말 k 가 변조 및 부호화 레벨을 i 에서 j 로 변경하였을 때, 할당되는 자원의 크기

표2. 링크 정보

단말1		
변조 및 부호화 레벨	활당되는 자원 (symbols)	에너지 소비 (mW*sec)
64-QAM 3/4	228	0.025681
64-QAM 2/3	256	0.020623
16-QAM 3/4	342	0.012687
16-QAM 1/2	512	0.008062
QPSK 3/4	683	0.006513
QPSK 1/2	1024	0.005375
단말2		
64-QAM 3/4	456	0.061633
64-QAM 2/3	512	0.048371
16-QAM 3/4	683	0.029923
16-QAM 1/2	1024	0.019348
QPSK 3/4	1366	0.015632
QPSK 1/2	2048	0.012824

증가에 대한 에너지 소비의 감소 비를 나타낸다. 따라서 큰 *benefit_ratio* 값을 가지는 변조 및 부호화 레벨 *j*를 선택하는 것이 최대 이득을 얻을 수 있다.

benefit_ratio 함수를 이용한 준최적화 알고리즘의 동작과정은 아래와 같다.

- 1) 기지국과 모든 단말간 링크의 변조 및 부호화 레벨을 채널 상태에 따라 특정 BER을 만족 시킬 수 있는 가장 높은 변조 및 부호화 레벨로 설정하고, 남은 변조 및 부호화 레벨 간의 *benefit_ratio*를 계산한다.
- 2) 각 링크에 대해 *benefit_ratio*가 가장 큰 변조 및 부호화 레벨을 선택한다. 각 링크에서 선택된 변조 및 부호화 레벨에 대해 *benefit_ratio*가 가장 큰 링크를 선택한다. 만약 가장 큰 *benefit_ratio*를 가지는 링크가 다수라면, 임의의 한 링크를 선택한다. 그리고 만약 $\Delta E n_k > 0$ 인 링크가 존재하지 않으면, 알고리즘을 끝낸다.
- 3) 선택된 링크에 *benefit_ratio*가 가장 큰 변조 및 부호화 레벨을 설정하였을 때, $\sum_{k=1}^N B_k \leq B$ 을 만족 하는지 검사한다. 만약 만족한다면, 해당 변조 및 부호화 레벨을 선택된 링크에 설정하고, 설정된 변조 및 부호화 레벨과 낮은 변조 및 부호화 레벨간의 *benefit_ratio*을 다시 계산한다. 그러나 만족하지 않는다면, 이전 변조 및 부호화 레벨로 재설정한다.
- 4) 2번 과정을 반복한다.

예를 들어, 기지국이 단말1을 위해 1024 bits, 단말2를 위해 2048 bits의 데이터 양을 서비스

표3. 자원 할당 알고리즘의 결과

	단말	변조 및 부호화 레벨	활당 되는 자원	에너지 소비	전체 에너지 소비
CSI	1	64-QAM 3/4	228	0.025681	0.055603
	2	16-QAM 3/4	683	0.029923	
제안 기법	1	QPSK 1/2	1024	0.005375	0.018199
	2	QPSK 1/2	2048	0.012824	

해준다고 가정한다. 또한 만족시켜야 하는 BER은 10^{-6} 이며, 단말의 채널 상태는 각각 18 dB, 15 dB라고 가정한다. 표 2는 각 단말의 변조 및 부호화 레벨에 따른 활당되는 자원 크기와 에너지 소비를 나타낸다.

채널 상태에 따라 기지국은 단말1의 변조 및 부호화 레벨을 64-QAM 3/4, 단말2의 변조 및 부호화 레벨은 16-QAM 3/4로 설정된다. 그리고 나서 기지국은 표 2를 바탕으로 각 단말의 현재 변조 및 부호화 레벨에 따른 *benefit_ratio*를 구한다. 두 번째 과정과 세 번째 과정을 통해 변조 및 부호화 레벨의 설정 과정은 다음과 같이 설정된다. 단말1을 위해 64-QAM 2/3, 단말1을 위해 16-QAM 3/4, 단말2를 위해 16-QAM 1/2, 단말1을 위해 16-QAM 1/2, 단말2를 위해 QPSK 3/4, 단말1을 위해 QPSK 3/4, 단말2를 위해 QPSK 1/2, 마지막으로 단말1을 위해 QPSK 1/2가 설정된다. 결과적으로 기지국은 단말1과 단말2를 위해 각각 QPSK 1/2을 설정한다. 표 3을 통해 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통한 변조 및 부호화 레벨 결정 방식이 채널 상태 정보 (Channel State Information, CSI)만을 고려하여 변조 및 부호화 레벨을 결정하는 방식에 비해 더 적은 에너지 소비로 데이터를 전송할 수 있음을 알 수 있다.

4. 성능평가

본 절에서는 실험을 통해 준최적화 알고리즘의 성능을 평가한다. 성능평가는 IEEE 802.16 OFDMA 시스템 파라미터를 사용하여 C로 구현한 시뮬레이터를 통해 수행 하였다. 표 4는 성능평가에서 사용된 파라미터들을 나타낸다. 여기서 만족 시켜야 하는 BER은 10^{-6} 이며, 기지국은 각 단말을 위해 1024 bits의 고정된 데이터 양을 서비스한다. 성능평가는 현재 프레임에서 서비스 해야 하는 데이터 양 (λ)을 1024에서 20480 bits로 변화 시키면서, 준최적화 알고리즘과 채널상태 만을 고려하여 변조 및 부호화 레벨을 결정하는 기법(CSI)과 비교를 하였다.

표4. 시뮬레이션 파라미터

프레임 주기	5 ms	
부반송파의 수	1024	
심볼 주기	115.2 μ s	
상향링크 부프레임	크기	12 symbols
	주기	1.3824 ms
경쟁 구조	심볼 타임의 수	2
	부채널의 수	6
상향링크 부채널 할당 방식	PUSC	
상향링크 전체 심볼 수	7904	
단말의 수	1 ~ 20	

그림 2는 한 프레임에서 서비스해야 하는 데이터 양에 따른 전체 에너지 소비량을 보여 주고 있다. CSI 방식은 서비스 해야 하는 데이터 양이 증가함에 따라 선형적으로 에너지 소비량이 증가한다. 이것은 데이터 양에 따른 할당되는 자원 크기의 증가 때문이다. 준최적화 알고리즘은 CSI 방식에 비해 모든 경우에서 적은 에너지 소비로 데이터를 서비스 할 수 있다. 기지국이 적은 양의 데이터를 서비스 할 때, 상향링크의 충분한 심볼을 통해서 낮은 레벨의 변조 및 부호화 레벨을 선택할 수 있다. 따라서 각각의 단말은 낮은 전송파워로 데이터를 전송할 수 있으며, 따라서 에너지 소비를 급격하게 줄일 수 있다. 많은 양의 데이터를 서비스 할 때는 한 프레임에서 정해진 데이터 양을 처리하기 위해 최대한 할당되는 자원 크기를 작게 해야 한다. 따라서 높은 변조 및 부호화 레벨을 선택하여야 하며, 이것은 높은 전송파워를 초래한다. 처리해야 하는 데이터 양이 20480 bits일 경우, 한 프레임에서 모든 데이터를 서비스하기 위해 모든 단말들의 변조 및 부호화 레벨은 채널 상태 정보를 바탕으로 BER을 만족시킬 수 있는 최대 변조 및 부호화 레벨을 선택해야 한다. 따라서 CSI 기법과 동일한 전체 에너지 소비량을 나타낸다.

그림 3은 준최적화 알고리즘을 사용함으로써 얻는 성능이득을 나타낸다. 준최적화 알고리즘의 성능 향상을 보이기 위해 다음과 같이 성능 이득을 계산한다.

$$\text{Performance gain} = 1 - \frac{\text{Energy consumption using Proposed scheme}}{\text{Energy consumption using CSI scheme}} \quad (13)$$

그림 3을 통해 준최적화 알고리즘은 최고 53% 정도의 성능 이득, 즉 전체 에너지 소비량의 감소를 보여준다. 그러나 서비스 해야 하는 데이터 양이 증가함에 따라 여분의 유용한 심볼이 줄어들기 때문에 성능 이득이 감소한다. 이것은 한 프레임에서 많은 데이터를 처리하기 위해 높은 변조 및 부호화 레벨을 선택하기 때문이다.

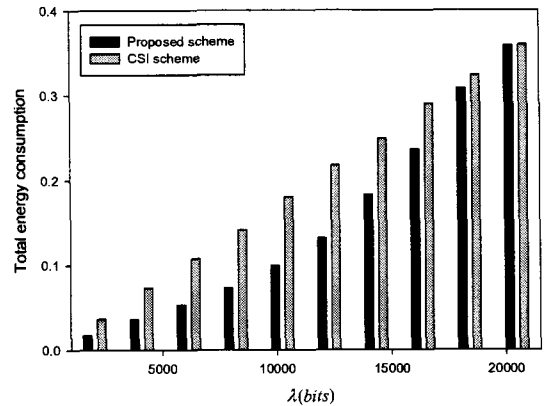


그림 2. 에너지 소비량 비교

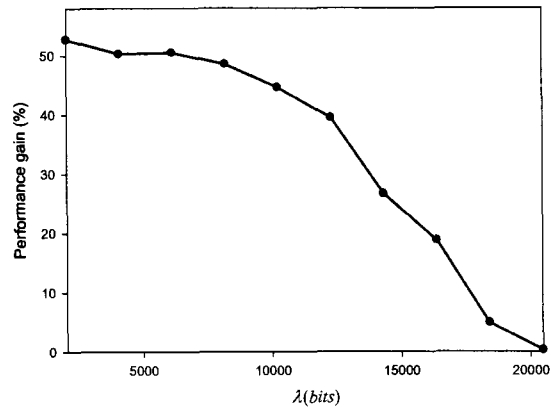


그림 3. 성능 이득

5. 결론

무선 인터넷의 발전으로 무선 장비들의 에너지 효율은 중요한 이슈로 부각되고 있다. 현재 활발히 연구 개발이 진행되고 있는 IEEE 802.16 OFDMA 시스템 역시 무선 장비들의 에너지 효율은 중요한 연구 과제 중에 하나이다. 본 논문에서는 IEEE 802.16 OFDMA 시스템의 상향링크 에너지 소비를 줄일 수 있는 자원 할당 알고리즘을 제시하고 있다. 본 알고리즘을 통해서 상향링크의 자원을 할당 하는데 있어서 사용자가 요구하는 자원을 할당해 주면서 최소한의 에너지를 제공함으로써 사용자의 배터리 소모를 최소화 하는 이득을 제공해 주고자 하였다. 이는 성능 결과를 통해서도 보여 주듯이 채널 상태만을 고려해서 변조 및 부호화 레벨을 결정하는 기법과 비교해 보았을 때 같은 서비스를 제공 해 주면서도 에너지 효율 측면에서 최대 53%의 성능 이득을 보임을 알 수 있었다.

Acknowledgements

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었으며 (IITA-2007-C1090-0701-0045), 2007년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] IEEE 802.16-2004, "IEEE standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," Oct. 2004.
- [2] IEEE 802.16-2006, "IEEE standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems," Feb. 2006.
- [3] Bo Rong, Yi Qian, and Kejie Lu, "Integrated Downlink Resource Management for Multiservice WiMAX Networks", IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 6, no. 6, pp. 621–632, Jun. 2007.
- [4] G. Song and Y.G Li, "Cross-Layer Optimization for OFDM Wireless Networks – Part I: Theoretical Framework," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 2, pp. 614–624, Mar. 2005.
- [5] G. Song and Y.G Li, "Cross-Layer Optimization for OFDM Wireless Networks – Part II: Algorithm Development," IEEE Transaction Wireless Communications, vol. 4, no. 2, pp. 625–634, Mar. 2005.
- [6] Kun Wang, Fan Yang, Qian Zhang, Dapeng Oliver Wu, and Yinlong Xu, "Distributed Cooperative Rate Adaptation for Energy Efficiency in IEEE 802.11-Based Multihop Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 2, pp. 888–898, Mar. 2007.