

OFDM 기반 무선 센서 네트워크에서의 Reserve Power를 이용한 효율적인 파워 할당 알고리즘

정희원 김 병 호*, 오 승 열*, 종신회원 김 치 하*

An Efficient Power Allocation Algorithm in OFDM-based Wireless Sensor Networks using Reserve Power

Byungho Kim*, Seoungyoul Oh* *Regular Members*, Cheeha Kim* *Lifelong Member*

요 약

OFDM은 높은 데이터 전송율을 지원할 수 있는 기술로 미래의 광대역 통신에 촉망받는 통신 방식이다. 이 논문은 주파수 선택적 페이딩 채널 환경에서 파워 예산을 각 부채널 상태에 적합하게 할당하는 알고리즘을 제안한다. 하지만 센서 네트워크의 하드웨어 제약상 기존의 파워할당 알고리즘을 적용하면 높은 계산 복잡도 때문에 실제 적용하는데 문제가 있다. 제안된 방식은 실제 환경과 비슷하게 구현되었으며 계산 복잡도를 현저히 줄여 최적의 방식에 비교할 수 있는 동시에 정해진 파워 예산을 만족 시킬 수 있다. 또한, 제안한 방식의 throughput은 최적의 throughput을 보여주는 알고리즘과 비교될 수 있을 정도의 성능을 낸다. 시뮬레이션 결과를 통해 기존 제안된 방식보다 throughput, 계산 복잡도가 뛰어난을 보여준다.

Key Words : Power Allocation , OFDM, Adaptive Bit Loading, Sensor Network

ABSTRACT

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has been investigated as promising technology for future broadband communication. In this paper, we propose a power allocation algorithm for a frequency selective fading channel. However, many investigated algorithms that perform high computation overhead are not appropriate for sensor network systems due to hardware limitations. The proposed algorithm significantly reduces computational overhead and satisfies the power budget. Throughput of the algorithm is comparable to the optimum solution. Simulation results support the claim stated.

I. 서 론

직교 주파수 분할 다중화(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)은 고속 송신을 다수의 직교(orthogonal)하는 협대역 반송파로 다중화시키는 변조 방식으로서 이동 무선 FM 채널, 고속

디지털 가입자 회선(High-bit-rate Digital Subscriber Line: HDSL; 1.6Mbps), 비대칭 디지털 가입자 회선(Asymmetric Digital Subscriber Line: ADSL; 6Mbps 까지), 초고속 디지털 가입자 회선(Very-High-bit-rate Digital Subscriber Line: VDSL; 100Mbps), 디지털 오디오 방송(Digital Audio Broadcasting: DAB), 고

* This research was supported by the MKE(The Ministry of Knowledge Economy), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency). (NIPA-2010-(C-1090-1021-0006))

* Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)(bhkim, ohsy, chkim@postech.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-10-473, 접수일자 : 2010년 10월 6일, 최종논문접수일자 : 2010년 12월 9일

선명 텔레비전 지상파 방송(high-definition television terrestrial broadcasting) 등의 광대역 데이터 통신을 위해 연구되고 있다.^[1-7] 또한, IEEE 802.11 무선 근거리 통신망 등과 같은 다양한 무선 통신 시스템에서도 표준으로 사용되고 있으며,^[8] 미래의 광대역 멀티미디어 통신 분야에서 널리 연구되고 있다. 이것은 OFDM의 장점과도 많은 관련이 있다. OFDM은 상대적으로 느린 시변 채널에서 특정 부반송파에서의 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio : SNR)에 따라 각 부반송파에 대한 데이터 전송률을 적응적으로 조절하여 전송 용량을 크게 향상시킬 수 있고, 협대역 간섭이 일부 부반송파에만 영향을 주기 때문에 협대역 간섭에 강하다.^[1] 즉, 높은 데이터 전송률과 다채널 상에서의 강건성이 강하므로 고속 데이터 전송에 적합하며, 이것은 많은 데이터를 많은 데이터를 빠르게 보내야 하는 멀티미디어 통신에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

반면, OFDM은 상대적으로 큰 최대전력 대 평균 전력 비(Peak-to-Average Power Ratio: PAPR)을 갖는데 PAPR이 크면 아날로그-디지털 변환기(Analog-to-Digital Converter: ADC)와 디지털-아날로그 변환기(Digital-to-Analog Converter: DAC)의 복잡도가 증가하고 RF 전력 증폭기의 효율이 감소하는 단점이 발생한다. OFDM을 포함한 대부분의 무선 통신 시스템은 송신단에서 충분한 전력 공급을 위하여 고전력 증폭기(high power amplifier: HPA)를 사용하는데 OFDM의 큰 PAPR은 HPA가 송신기에서 사용될 경우 많은 수의 전송 신호가 왜곡되어 심각한 비트오율(Bit Error Rate: BER)을 유발하게 된다. 그러므로 에러 확률에 대한 성능을 향상 시키기 위해서는 각 채널 상태에 기반하여 파워나 비트를 유동적으로 할당할 필요가 있다.

시스템 성능 향상 요인과 시스템 조건에 따라서, 파워 할당 알고리즘은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) 평균 BER을 최소화 - 목표 throughput이나 파워 조건을 만족 시키거나 둘 다를 만족시키면서 평균 BER을 최소화 시키는 알고리즘^[9]
- 2) 전송 파워를 최소화 - 목표 throughput 이나 BER 조건을 만족 시키거나 둘 다를 만족시키면서 전송 파워를 최소화 시키는 알고리즘^[10,11]
- 3) Throughput을 최대화 - 목표 파워나 BER 조건을 만족 시키거나 둘 다를 만족시키면서 throughput을 최대화 시키는 알고리즘^[12,13]

본 논문은 세 번째인 throughput에 초점을 맞춘다. 그리고 추가적으로 실제 시스템에 적용 가능성을 살

펴보기 위해 계산 복잡도를 성능 평가 요소로 고려한다. 그 동안, 높은 복잡도를 갖고 있는 최적의 알고리즘과 복잡도를 줄이는 많은 알고리즘이 제안되었다. 하지만, 이러한 것들은 채널 상태와 각 부채널에 현재 할당되어 있는 파워 관계에 대한 고려가 부족하다. 제안한 방식은 이러한 것들을 모두 고려한다.

본 논문에서는 계산상의 복잡도를 줄이고, 파워 예산을 효율적으로 사용할 수 있는 파워 할당 알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로 전송율과 수행 시간을 기존 알고리즘과 비교해 본다. 이러한 목표를 위하여 Reserve power이란 개념을 정의하여 사용한다. 이것은 각 부채널에 할당되어 있는 비트에 대하여 이것이 다음 비트를 위하여 얼마만큼 파워를 더 할당 받았는지, 혹은 내림을 위하여 얼마만큼의 파워를 희생하였는지 알 수 있는 파워이다. 한편, 현재 할당되어 있는 파워에 대한 정보를 효율적으로 사용하기 때문에 각 부채널에 파워를 할당하는 수행 시간은 기존의 최적화 알고리즘과 크게 차이 나지 않는다. 따라서, 제안하는 알고리즘의 throughput은 기존 최적의 알고리즘과 비교될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 파워 할당 알고리즘과 관련된 부분에 대하여 설명하고, III장에서는 시스템 모델을 소개한다. IV장에서는 새로운 알고리즘을 제안하고, V장에서는 성능을 계산하여 비교해 본다. 마지막으로 VI장에서는 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

비트 로딩 알고리즘의 기본적인 개념은 더 좋은 상태의 부채널에 더 많은 비트를 할당하는 것이다. 반대로, 좋지 않은 조건을 갖고 있는 부채널에는 더 적은 비트가 할당된다.

Leke와 Cioffi^[10]은 모든 부채널에 일정하게 같은 파워를 할당하는 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘에서 모든 부채널의 SNR은 투입되는 에너지를 위해 계산되며, 일정 경계선 아래의 부채널과 SNR 값은 버려진다. 그리고 나서 총 에너지 예산은 최적화된 water-filling 분포를 사용하여^[11] 실제 사용하는 모든 채널에 할당된다.

Fischer^[9]는 신호 성상도(constellation) 크기와 [14]에서 표현된 비트 에러율 사이의 관계를 통해 비트 에러 확률을 공식화하였다. [3]에 따르면, BPSK에서의 비트 에러율은 다음과 같다.

$$BER_i \cong Q(\sqrt{2SNR_i}), \quad (1)$$

위 식에서 BER_i와 SNR_i 각각 i번째 부채널에서 비트 에러율과 신호-대-잡음 비율이다. 또한, 4-QAM, 16-QAM과 같은 직각 QAM(Retangular quadrature amplitude modulation)에서의 비트 에러 확률을 다음과 같다.

$$BER_{i,M_i} = 1 - \left[1 - \frac{2}{\log_2 M_i} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M_i}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M_i \times SNR_i}{M_i - 1}} \right) \right]^2, \quad (2)$$

위 식에서 M_i는 부채널 i에서 신호 성상도 크기를 나타낸다. Fischer는 BER은 모든 부채널에서 일정하며 각 부채널의 평균 BER을 최소화하는 비트와 파워를 할당하는 알고리즘을 제안하였다.

Bit-Removal 알고리즘은 throughput을 최대화 하기 위하여 제안되었다.^[16,17] 이 알고리즘은 모든 부채널에 가장 큰 신호 성상도 크기를 부여한 후, 전송 파워를 계산한다. 즉 현재 채널 상황에서 가장 많은 비트가 전송 가능한 파워를 계산한다. 만약 전송 파워가 미리 정해진 파워 예산을 넘을 경우에는, 가장 안 좋은 부채널을 찾아내서 그 부채널의 신호 성상도 크기를 줄인다. 이 과정(찾고 줄이는)은 총 전송 예산이 미리 정해진 파워 예산을 넘지 않을 때까지 반복된다. Bit-removal 알고리즘은 시스템 성능을 높이기 위한 최적의 해결 방법이다. 그러나 이것은 실제 시스템에서 사용하기에는 너무 많은 계산 복잡도를 갖고 있다.

Chow는 계산 복잡도를 줄이는 비트 로딩 알고리즘을 제안하였다. Chow의 알고리즘의 간단한 설명은 다음과 같다. 첫째로, 모든 부채널을 채널 이득 대 잡음비(channel gain to noise ratio)를 내림차순으로 정렬한다. 그리고 나서 알고리즘은 가장 안 좋은 채널의 파워를 받아서 다른 부채널에 똑같이 할당한다. 만약 이러한 재할당에 의해 총 비트율이 증가하였다면, 이 과정은 반복된다.(예를 들면, 다음 과정에서는 두 번째로 안 좋은 채널의 파워를 빼앗아서 재할당한다.) Chow의 알고리즘은 가벼운 알고리즘임을 보여준다. 하지만, 이 제안은 부채널 간의 조건 차이를 고려하지 않기 때문에 많은 전송 비트의 손실을 감안해야 한다.

이 논문에서의 목표는 Chow의 알고리즘과 같이 작은 계산 복잡도를 가지면서 동시에 bit-removal 알고리즘의 throughput에 근접할 수 있는 파워 할당

알고리즘을 설계하는 것이다.

III. 시스템 모델

OFDM을 기반으로 한 시스템은 사용 가능한 대역폭을 N개의 직교하는 부채널로 나눈다. 이 실험에서는 실제 잡음과 거의 같은 환경을 위하여 일반적인 잡음을 나타내는 부가백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian noise : AWGN)을 사용한다. 또한, 이 시스템은 송신기와 수신기가 한 묶음으로 되어있는 점 대 점(point-to-point) 무선 링크이다. 이것을 싱글 유저 OFDM 시스템이라 부른다.

한편, 동적인 비트 할당 수정을 위해 송신기는 수신기로부터 피드백을 받아 트레이닝 신호를 사용하여 채널 정보를 얻을 수 있다고 가정한다. H. Minn과 S.xing은 AWGN에서 최적의 채널 상태를 얻기 위한 방법을 제안하였다. 여기서 채널 상태 정보(channel state information : CSI)를 얻기 위한 과정을 다음과 같다. 송신기는 특정 부채널에 미리 정의된 트레이닝 신호를 보낸다. 그러면 수신기는 채널 추정을 위한 계산을 한다. 수신 받은 신호는 이미 수신기에 알려진 트레이닝 신호와 비교된다. 그리고 나서 송신기는 추정된 CSI를 수신기로부터 피드백 받게 된다.

SNR에 따른 각 부채널의 비트수 i는 식 (3)에 의하여 계산된다.

$$b_i = \log_2 \left(1 + \frac{P_i \times CNR_i}{\Gamma} \right) \quad (3)$$

여기서 b_i는 i번째 부채널에 할당되는 비트 숫자를 나타내며, CNR_i는 부채널 i(in dB)에서의 이득 대 잡음비(gain-to-noise Ratio)를, P_i는 파워를 나타내며, Γ는 샤논의 채널 용량 모델(Shannon channel capacity model)^[14]에 따른 SNR의 간격을 말한다. 그리고 Γ는 다음과 같이 정의되어 있다.

$$\Gamma = \frac{1}{3} \left[Q^{-1} \left(\frac{SER}{4} \right) \right]^2 \quad (4)$$

이 때, SER은 심볼 오율(symbol error rate)를 나타낸다.

IV. 제안하는 알고리즘

이런 장에서는 제안할 파워 할당 알고리즘에 대해

여 설명을 한다. 알고리즘의 수도 코드(pseudo-code)는 참고 문헌 뒤에 제공한다.

샤논의 용량 이론 (Shannon's capacity theorem)에 의하면, 각 부채널에 할당될 비트 수가 실수(real number)로 계산된다. 하지만, 실제 송신기는 이러한 실수를 그대로 전송할 수가 없기 때문에 정수 부분만 전송이 가능하다. 예를 들어, 식(3)에 따라 주어진 파워와 잡음을 고려하여 계산된 비트의 결과가 3.8인 경우 3비트만이 전송 가능하다. 나머지 0.8비트는 전송될 수 없다. 여기서 주목해야 할 점은 나머지 0.8비트의 할당을 위하여 사용된 에너지는 낭비된다는 점이다.

이 실험에서는 바로 위에서 언급한 낭비된 에너지에 초점을 맞춘다. 자세한 내용은 뒤에서 설명하도록 하겠다. Reserve power 이전에 고려해야 할 점은 정수 비트 할당에 관련된 부분이다. 이 실험에서 비트 할당은 정수로 해야 한다. 이 때, 정수 할당은 반올림으로 수행한다. 즉, 식 (3)에 의하여 1.8이란 값이 나오는 경우는 2비트를 할당하는 것으로 하고, 1.4라는 값이 나오는 경우는 반올림에 의하여 1비트를 할당하게 되는 것이다. 버리는 경우에는 파워 재할당 시, 더 많은 파워가 남아있기 때문에 할당해야 할 채널이 많아지지만 반올림을 하게 되는 경우에는 더 적은 파워가 남아있을 확률이 높기 때문에 할당해야 할 채널이 상대적으로 적어질 수 있다는 점에 착안하여 정책을 반올림으로 정한다.

다음은 앞의 단락에서 언급하였던 낭비된, 혹은 더 사용한 에너지가 얼마만큼인지 알아보아야 한다. 이것을 위하여 Reserve power가 고려된다. 이것은 실제 전송기가 정수 비트로 전송을 하기 때문에 계산된 실수 비트에서 더 많은 비트를 보내기 위하여 더 필요한 에너지, 혹은 자신이 낭비한 에너지를 표시하여 준다. 만약 자신이 에너지를 낭비하고 있는 경우에는 플러스(+)의 값이 나올 것이고, 더 차지하고 있는 경우는 마이너스(-)의 값이 나올 것이다. 예를 들어, 식 (3)에 의하여 1.8이라는 값이 나온 경우는 반올림을 하면 2가 나오므로 0.2를 향상시키기 위하여 필요한 에너지를 더 차지하였기 때문에 -값이 나오고, 1.4라는 값이 나온 경우는 반올림을 하게 되는 경우 1이 나오므로 0.4만큼의 에너지를 낭비하였기 때문에 +값이 나오게 되는 것이다.

Reserve power는 식(5)에 의하여 계산된다.

$$Reserve_{power} = - (I \times \frac{(2^{C_b} - 2^{b_i})}{CNR_i}), \quad (5)$$

여기서 C_{bi} 는 부채널 i 에서 할당될 정수 비트이며, CNR_i 는 부채널 i (in dB)에서의 이득 대 잡음비 (gain-to-noise Ratio)를 나타낸다.

이후에는 계산한 결과의 합을 구한다. 만약 총 합이 -가 나온 경우는 파워가 더 많이 할당된 것이므로 합이 +가 될 때까지 가장 많이 초과된 채널부터 1비트씩 뺀다. 가장 많이 초과된 채널부터 빼게 되면 가장 적은 비트를 원래대로 돌리기 때문에 실제로 보낼 수 있는 비트 수가 많게 되므로 가장 많이 초과된 채널부터 뺀다. 반면, 총 합이 +가 나온 경우는 파워가 남은 것이므로 -가 되기 직전까지 가장 많이 빼앗긴 채널부터 남은 파워를 할당한다. 가장 많이 빼앗긴 채널은 그만큼 다음 채널을 위해 더 적은 파워만 할당하면 1비트를 추가할 수 있기 때문에 가장 많이 빼앗긴 채널부터 할당한다.

이러한 과정이 끝나면 최종적으로 파워가 할당되어 해당되는 비트를 전송하게 된다.

아래 예제는 파워 할당 과정을 보여준다. Fig. 1을 보면 5개의 부채널이 할당되어 있다. 총 파워 예산은 $3.125 \times 10^{-6} W$ 로 가정한다. 따라서 각 부채널은 $0.625 \times 10^{-6} W$ 의 파워를 갖게 되며, 할당된 비트는 식 (3)에 의하여 계산된다. 이러한 최초 상태를 바탕으로 하여, 다음과 같은 과정을 통하여 계산을 할 것이다.

채널	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5
Bits	0.46	1.86	1.30	3.12	2.81
(Real Number)					
(a) 최초 상태 : 모든 부채널은 같은 파워가 할당된다. 할당되는 비트는 식(3)에 의하여 계산된다. 총 파워 예산은 $3.125 \times 10^{-6} W$ 이다. 따라서, 각 채널은 $0.625 \times 10^{-6} W$ 의 파워를 갖게 된다.					
채널	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5
Bits	0.46	1.86	1.30	3.12	2.81
(Real Number)					
Bits(integer)	0	2	1	3	3
(b)1 단계 : 부채널에 할당된 비트들을 반올림을 통해 계산한다.					
채널	Ch1	Ch2	Ch3	Ch2	Ch5
Reserve power	2.31	2.07	1.69	-2.54	-4.73
$(10^{-7} W)$					
(c)2 단계 : 각 부채널이 반올림을 통하여 파워를 얼마만큼 더 차지하였는지, 혹은 버렸는지 계산한 후, 내림 차순으로 정렬한다. 모자란 파워 : $1.2 \times 10^{-7} W$					
채널	Ch1	Ch4	Ch3	Ch2	Ch5
Power	+1.53	+1.72	0	0	-4.73
Reallocation $(10^{-7} W)$					
Bits(integer)	1	4	1	2	2
(d)3 단계 : 만약 할당 후 가용 파워가 모자란 경우는 가장 많이 더 차지한 채널부터 Reverse power 를 빼고 가장 많이 파워를 잃은 채널부터 파워를 할당한다. 이 경우는 Ch5 에서 빼고 후, 다시 Ch1, Ch4 에 할당하였다. 결과적으로 1 비트를 빼앗아 2비트를 더 할당할 수 있음을 볼 수 있다.					

Fig. 1. 새로 제안하는 파워 할당 알고리즘의 예

첫번째로 부채널들에 할당된 비트에 대하여 반올림을 한다. 이 과정에서 채널 1, 3, 4는 내림이 된 반면, 채널 2와 5는 올림이 된 것을 확인할 수 있다.

두번째로 Reserve power를 계산하여 이것을 정렬한다. 그리고 Reserve power의 합을 계산해 본다. 예제에서는 $1.2 \times 10^{-7} W$ 의 파워가 부족함을 확인할 수 있다.

마지막으로 재할당을 한다. 가장 많은 Reserve power를 갖고 있는 ch5에서 1비트를 뺀다. 그 결과 $3.53 \times 10^{-7} W$ 의 총 에너지가 남게 된다. 이것을 다시 할당을 해야 한다. 예제에서는 가장 많이 빼앗긴 채널 1은 $1.53 \times 10^{-7} W$ 의 파워를 더 공급하는 경우 1비트를 더 보낼 수 있기 때문에 그에 해당하는 파워를 할당하고, 채널 1에 할당한 후에도 1비트가 파워가 남았기 때문에 채널 4가 1비트를 더 보내기 위하여 필요한 파워를 계산한다. 그 결과 $1.72 \times 10^{-7} W$ 의 파워를 더 공급하는 경우 1비트를 더 보낼 수 있

는 것을 확인하여 필요한 파워를 할당한다. 채널 3을 계산하여 본 결과 필요한 파워가 남은 파워보다 크기 때문에 더 이상 수행하지 않고 종료한다.

그 결과 채널 5에서 1비트가 빠지지만, 채널 1과 채널 4에 1비트씩 더 보낼 수 있어서 결과적으로 초기 상태보다 더 많은 데이터를 전송할 수 있음을 확인할 수 있고, 최종적으로는 $0.28 \times 10^{-7} W$ 의 파워가 남음을 확인할 수 있다.

알고리즘 1은 제안한 전략에 대한 슈도 코드이다.

V. 성과 측정

5.1 시뮬레이션 셋팅

제안된 알고리즘은 파워 예산을 제한 두어 bit-removal와 Chow's algorithm과 성능을 비교한다. 두 개의 알고리즘은 각각 throughput과 가벼운 계산 복잡도에 있어서 최고의 해결 방법으로 여겨지고 있다. 여기에서는 다양한 부채널과 파워 예산에서 제안한 알고리즘의 처리량과 계산 시간을 bit-removal, 그리고 Chow's algorithm과 비교하여 본다.

이 실험에서는 OFDM 기반 시스템을 채택한다. 그러나 표준과는 약간 달리, 이 알고리즘에서는 각자 다른 성상도 크기를 갖게 한다. 우리는 이 시뮬레이션에서 신호 성상도 크기를 2, 4, 16, 64, 128로 가정한다. 신호 성상도 크기에 따르면, 가능한 모듈화 전략은 BPSK, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 128-QAM이다.

또한, 이 시뮬레이션을 위해 우리는 Jakes channel model과 가장 비슷하다고 잘 알려진 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩 채널(frequency selective Rayleigh fading channel) 모델을 사용한다.

실제와 비슷한 채널 모델링을 위해 각 부채널은 각각 다른 채널 상태가 되게 한다. 이 경우에는 파워 예산을 -10dBm으로 설정한다.

두 번째로, 우리는 다양한 파워 예산을 가진 상태에서 bit-removal와 Chow's algorithm과 처리량과 계산 시간을 비교하여 본다. 이 때, 부채널은 256개로 설정한다.

시뮬레이션은 각기 다른 잡음을 갖는 채널의 상태에서 10,000번을 반복하여 시행되고, 결과는 평균값을 취한다.

5.2 시뮬레이션 결과

Fig. 2는 다른 수의 부채널일 때 측정된 총

알고리즘 1 - 제안하는 파워 할당 알고리즘

```

Ptotal: Total power budget
b[i]: The allocated bits of sub-channel i, i=1...n in real number
rb[i]: The allocated bits of sub-channel i, i=1...n in integer number(round operation based on b[i])
CP[i]: The Reserve power of sub-channel i, i=1...n

for i=1 to n do
    P[i] = Ptotal / n
    Compute b[i] using Equation (3) and (4)
    Compute rb[i] based on b[i]
end for
for i=1 to n do
    Compute CP[i] using Equation (5)
end for
the sequence of sub-channel IDs sorted in increasing order of CP[i]
Let SoP = sum of CP[i]
if SoP < 0 then
    for j = 1 to n do
        index = find(p == CP[j])
        b[index] = b[index] - 1
        SoP = SoP + CP[index]; //using Equation (5)
        if SoP >= 0
            Exit this for loop
        End for
    for j = n to 1 do
        index = find(p == CP[j])
        b[index] = b[index] + 1
        SoP = SoP - CP[index]; //using Equation (5)
        if SoP >= 0
            Exit this for loop
        End for
    Else
        for j = n to 1 do
            index = find(p == CP[j])
            b[index] = b[index] + 1
            SoP = SoP - CP[index]; //using Equation (5)
            if SoP >= 0
                Exit this for loop
            End for
        for j = 1 to n do
            index = find(p == CP[j])
            b[index] = b[index] - 1
            SoP = SoP + CP[index]; //using Equation (5)
            if SoP >= 0
                Exit this for loop
            End for
        End if
    End if

```

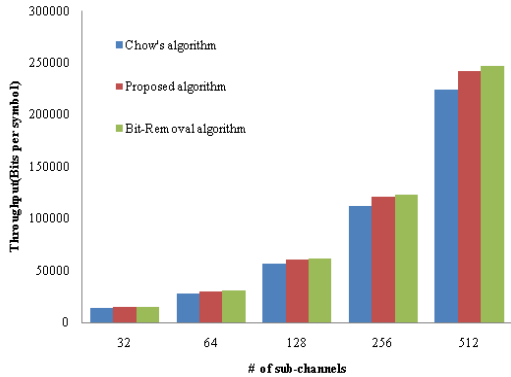


Fig. 2. 다양한 부채널 수에서 비트 로딩 알고리즘의 평균 throughput(파워 예산 = -10dBm)

throughput을 보여준다. 여기서 부채널은 32에서 512까지 다양하게 설정한다. 결과는 제안한 방법이 최적의 알고리즘으로 알려진 bit-removal 알고리즘의 throughput과 거의 동일함을 보여준다. 가장 실제에 가까운 상황인 부채널이 256개일 때를 살펴보면 Chow's 알고리즘이 최적에 비하여 87.9%인데 비하여 제안한 알고리즘의 throughput은 최적의 97.2%로 거의 근접하였음을 보여준다.

Fig. 3은 다양한 파워 예산일 때 측정된 throughput을 보여준다. 여기서 부채널의 수는 256으로 고정한다. 결과는 제안한 알고리즘이 최적의 알고리즘에 근접하였음을 보여준다.

Fig. 4는 다양한 부채널 수일 때 비트 로딩 알고리즘의 계산 복잡도를 보여준다. 복잡도는 부채널에 최종적으로 비트를 할당하는데 걸리는 시간으로 측정한다. 결과는 우리의 알고리즘이 가장 가볍다고 알려진 Chow's 알고리즘에 거의 근접하였음을 보여준다. 채널 개수가 256개인 경우, 계산하는데 걸린 시간은 bit-removal 알고리즘이 Chow's 알고리즘의

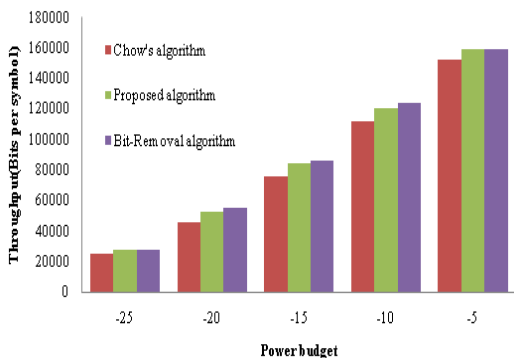


Fig. 3. 다양한 파워 예산에서 비트 로딩 알고리즘의 평균 throughput(부채널의 수 = 256)

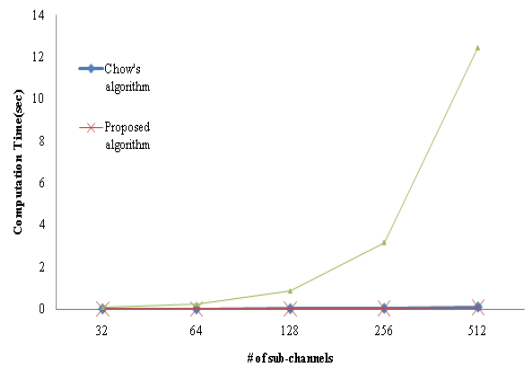


Fig. 4. 다양한 부채널 수에서 비트 로딩 알고리즘의 평균 계산 시간(파워 예산 = -10dBm)

9812%인데 비하여 제안한 알고리즘은 122%밖에 걸리지 않는다. 이것은 제안한 알고리즘의 복잡도가 정렬과 인덱싱을 할 때 최적의 방식을 사용하는 경우의 복잡도를 가지기 때문에 가능하다.

부채널의 개수가 256일 때 throughput은 Fig 3.을 통하여 Chow's 알고리즘에 비해 모든 파워 예산에서 우위를 점하고 있음을 확인할 수 있다.

시뮬레이션을 통해 얻어진 결과 분석을 통해, 제안한 알고리즘은 정해진 파워 예산 내에서 계산 시간을 매우 단축하는 동시에 최고의 throughput에 근접하였음을 확인할 수 있다. 이러한 계산 복잡도는 OFDM을 기반한 센서 네트워크에서 충분히 적당하며 동시에 throughput을 향상시킨다. 이것이 알고리즘을 OFDM을 기반한 센서 네트워크에 제안한 이유이다.

VI. 결론

미래에 OFDM을 기반한 무선 센서 네트워크 시스템에서는 하드웨어 제약이 크기 때문에 낮은 복잡도를 기여야 하며 미디어 전송을 위한 높은 throughput을 모두 만족해야 한다. 이 논문에서는 두 가지를 모두 만족시키기 위해 파워 할당 알고리즘에 대하여 접근을 하여 보았고, 계산 시간을 줄이면서 throughput은 최적의 방법에 근접하는 알고리즘을 제안하였다.

이를 위해, 여기서는 파워를 재할당하는 과정에 사용되는 Reserve power 개념을 도입하였다. 제안한 방법이 같은 조건에서 다른 방법들과 throughput과 계산하는데 걸리는 시간을 비교하여 보았을 때 뛰어난 성능 향상을 보였음을 증명하였다. 논문에서

제안한 알고리즘의 복잡도는 실제 사용되는 알고리즘과 비교하여 보았을 때 충분히 납득 가능한 수준이었으며 동시에 throughput 역시 최적의 해결책에 거의 근접하는 모습을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] Richard van Nee, Ramjee Prasad, OFDM for Wireless Multimedia communications, Boston : Artech House, 2000
- [2] Chow, P.S., J. C. Tu and J.M. Cioffi, "Performance Evaluation of a Multichannel Transceiver System for ADSL and VHDSL Services," IEEE J. Selected Area in Comm, Vol SAC-9, No. 6, pp. 909-919, Aug 1991.
- [3] Chow, P. S., J. C. Tu and J.M. Cioffi, "A Discrete Multitone Transceiver System for HDSL Applications", IEEE J. Selected Areas in Comm, Vol. SAC-9, No. 6, pp. 895-908, Aug, 1991.
- [4] Paiment, R. V., "Evaluation of Single Carrier and multicarrier Modulation Techniques for Digital ATV Terrestrial Broadcasting", CRC Report, No. CRC-PR-004, Ottawa, Canada, Dec. 1994.
- [5] Sari, H. G. Karam, and I. Jeancluede, "Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting", IEEE Commun. Mag. Vol. 33, pp.100-109, Feb. 1995.
- [6] Oppenheim, A. V., and R. W. Schaffer, Discrete-time Signal Processing, Prentice-Hall International, ISBN 0-13-216771-9, 1989.
- [7] Hara, S., M. Mouri, M. Okada, and N. Morinaga, "Transmission Performance Analysis of Multi-Carrier Modulation in Frequency Selective Fast Rayleigh Fading Channel", in Wireless Personal communications, Kluwer Academic Publishers, Vol.2, pp. 335-356, 1996.
- [8] IEEE Std. 802.11a WG, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specification: Highspeed Physical Layer in the 5 Hz band, September 1999.
- [9] R. Fischer, "A new loading algorithm for discrete multitone modulation", in Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. London, pp. 724-728, Mar 1996
- [10] A. Leke and J. M. Cioffi, "A maximum rate loading algorithm for discrete multitone modulation systems", in Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. Phoenix, pp. 1514-1518, 1997.
- [11] J. Campello, "Practical bit loading for DMT", in Proc. IEEE int. conf. Communications, vancouver, Canada, col.2, pp. 801-905, 1999
- [12] B. Fox, "Discrete optimization via marginal analysis", Manage. Sci., Vol.13, No.3, pp. 210-216, Nov 1996
- [13] A. M. Wyglinski, F. Labeau, and P. Kabal, "Bit loading with BER-constraint for multicarrier systems", IEEE Trans. Wirel. Commun., Vol 4, no. 4, pp. 1383-1387, 2005
- [14] J. G. Proakis, Communication systems Engineering, 2nd ed. Prentice-Hall, 2002.
- [15] H. Minn and S.Xing, "An optimal training signal structure for frequency offset estimation", IEEE Trans. Commun., Vol. 53, No. 3, pp. 343-355, Feb. 2005.
- [16] A. Fasano, G. Di Blasio, E. Baccarelli, and M.Biagi, "Optimal discrete bit loading for DMT based constrained multicarrier systems", in Proc. IEEE ISIT, p. 243, Jul. 2002.
- [17] E. Baccarelli and M. Biagi, "Optimal integer bit-loading for multicarrier ADSL systems sybject to spectral-compatibility limits", Signal Process., Vol. 84, pp.729-741, Apr. 2004.

김 병 호 (Byungho Kim)

정회원

2003년 3월~현재 POSTECH

컴퓨터공학 학사과정

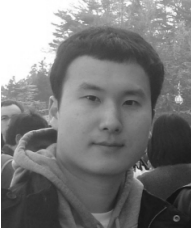
<관심분야> OFDM, Cognitive

Radio



오 승 열 (Seungyoul Oh)

정회원



2006년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학과 졸업

2006년 3월~현재 POSTECH 컴퓨터공학 박사과정

<관심분야> OFDM, Wireless Communications, Cognitive Radio

김 치 하 (Checha Kim)

종신회원



1984년 M.S. in Computer Science, University of Maryland, College Park, USA

1986년 Ph.D. in Computer Science, University of Maryland, College Park, USA

<관심분야> Computer Communication, Mobile Computing, Sensor Networks, Cognitive Radio