

# 반복적 다중사용자 검출을 가진 단일 반송파 주파수 분할 다중접속 시스템에서 다단계 변조를 위한 적응형 전력 제어

김태경\*

## Adaptive Power Control for Multilevel Modulation in Single-Carrier Frequency Division Multiple Access Systems with Iterative Multiuser Detection

Kim Tae-Kyoung\*

요약

본 논문에서는 다중 사용자를 검출할 수 있는 단일 반송파 시스템에서 멀티레벨 변조방식을 위한 적응형 전력 제어 기법을 제안한다. 멀티레벨 변조방식은 독립된 여러 개의 신호들을 중첩시켜 보내는 방식으로 데이터 전송 효율이 높지만 수신부에서 중첩된 신호를 단일 신호들로 검출해야 한다. 이때, 송신기에서 무선 환경에 따라 각 신호들의 전력 가중치를 다르게 보내면 수신기가 다중 단일 신호들을 효과적으로 검출할 있다. 본 논문에서는 전력 가중치를 수신 SNR에 따라 바꾸어 주는 적응형 전력 제어 기법을 제안하고, 이 기법을 max-SNR과 round-robin의 스케줄링 방식에 적용하여 주파수 효율이 개선됨을 보였다.

**Key Words** : Multilevel modulation, adaptive power control, SC-FDMA

ABSTRACT

We consider adaptive power control for multilevel modulation in SC-FDMA with iterative multiuser detection. Multilevel modulation technique constructs the constellation by superimposing independent

signals. In multilevel modulation, the receiver should detect the independent signals from superimposed signal. The independent signals can be effectively detected when the signals are differently weighted according to channel condition. In this letter, we propose adaptive power control according to received SNR. In simulations, the proposed algorithm can effectively increase spectral efficiency in max-SNR and round-robin scheduling algorithms.

## 1. 서론

단일 반송파 주파수 분할 다중 접속 방식(SC-FDMA)은 직교적 다중 접속 방식으로 간섭이 없고 높은 데이터 전송률을 가져 광대역 통신의 적합하다. SC-FDMA에 다중 사용자 검출(iterative multiuser detection)을 적용한 비직교적 방식은 직교적 방식에 비해 최적의 데이터 전송률을 가질 수 있다. 비직교적 방식으로 SC-FDMA에 연속적인 부반송파(subcarrier)의 모임인 chunk 단위로 다중 사용자 검출을 적용한 grouped FDMA (GFDMA)가 제안되었다<sup>1)</sup>.

16QAM, 64QAM 등의 고차의 변조방식은 무선 자원의 특성을 이용하여 데이터 전송속도를 올리는데 중요한 역할을 하는데, 심볼에서 비트의 소프트 디맵핑 과정에서 높은 복잡도가 요구된다. 하지만 멀티레벨 변조방식(multilevel modulation)은 낮은 차수의 변조방식을 가진 독립적인 신호(layer)를 중첩시켜 보내고 다중단계 복호화 방식에 기반 하여 신호들을 분리하기 때문에 그레이 코딩과 비교하여 수신기의 복잡도가 낮고<sup>2)</sup>, 반복적인 검출 과정을 통해 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다<sup>3)</sup>.

멀티레벨 변조방식은 독립적인 신호들을 중첩시켜 보낼 때 신호들 사이의 전력 가중치를 다르게 하는 방식으로 이 방식의 성능은 가장 낮은 전력 가중치를 가진 layer의 성능을 따른다. 그리고 전력 가중치에 따라 다중 사용자 간의 간섭 정도가 달라지기 때문에 이 간섭 정도가 작아지도록 전력 가중치를 제어하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 수신 신호 대 잡음비(SNR)에 따라 그 전력 가중치를 다르게 하여 보내는 방법을 제안하고자 한다. GFDMA 환경에서의 시뮬레이션 검증을 위해 스케줄링을 고려하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 적응형 전력 제어가 max-SNR

\* First Author : Pohang university of science and technology, masterme@postech.ac.kr, 정회원  
논문번호 : KICS2017-09-262, Received September 25, 2017; Revised October 15, 2017; Accepted November 1, 2017

과 round-robin 스케줄링 방식에서 높은 성능 이득을 가진 것을 확인하였다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 멀티레벨 변조방식을 가진 GFDMA 시스템

본 논문에서는 총 대역폭을 C개의 chunk로 나누어진 GFDMA 시스템을 고려한다. 각 chunk는 연속된 K개의 부반송파로 구성된다. 식을 간단히 전개하기 위해 chunk 표시자 c는 생략한다. Chunk를 공유하고 있는 사용자들의 수는 U로 고정시켰다. 본 논문에서는 고려하는 멀티레벨 변조방식은 낮은 차수의 변조 방식을 가지는 독립적인 신호(layer)들의 선형 결합을 이용한다<sup>2)</sup>. 또한, 전력 제어의 초점을 두기 위해 layer 수는 2개로 고정한다. 각각의 신호들은 독립적으로 채널 부호화 및 인터리버에 의해 부호화가 수행된다. 부호화된 신호는 QPSK 심볼로 맵핑된다  $s_{u,m}(n)$ . 여기서 u는 사용자, m은 layer, n은 시퀀스 인덱스를 의미한다. Layer들의 QPSK 심볼은  $\mathbf{s}_u = [\mathbf{s}_{u,1}, \mathbf{s}_{u,2}]^T$  선형 결합하여 전송된다. 여기서  $(\cdot)^T$ 는 transpose을 의미한다. 전송되는 신호는  $x_u(n)$  다음과 같이 표현된다.

$$x_u = (\mathbf{w}^T \otimes \mathbf{I}_K) s_u, \quad u = 1, \dots, U. \quad (1)$$

여기서  $\otimes$ 는 Kronecker 연산이고  $\mathbf{I}_K$ 는  $K \times K$  단위 행렬 이다.  $\mathbf{w}$ 는 정규화된 전력 가중치로 다음과 같다.

$$\mathbf{w} = [w_1 \ w_2]^T. \quad (2)$$

예를 들면,  $[w_1 \ w_2]^T$ 이  $[4/5 \ 1/5]^T$ 이면 16QAM 성상도와 같다.

반복적 다중 사용자 검출을 가진 수신기는 다중 사용자 검출과 채널 등호화를 각각의 chunk에 대해서 수행한다. Chunk c에서의 u번째 사용자의 m번째 layer간 간섭이 제거된 후의 주파수 영역에서의 수신 벡터는  $\mathbf{Y}_{u,m} = [Y_{u,m}(0) \cdots Y_{u,m}(K-1)]^T$  다음과 같이 나타내어진다.

$$Y_{u,m} = \sum_{u'} \sum_{m'} \sqrt{P} \tilde{A}_{u',m'}(S_{u',m'} - \bar{S}_{u',m'}) + \sqrt{P} \tilde{A}_{u',m'} \bar{S}_{u',m'} + Z, \quad u = 1, \dots, U, \quad m = 1, 2, \quad (3)$$

여기서  $S_{u,m}(k)$ 와  $\bar{S}_{u,m}(k)$ 는 각각 주파수 영역에서 u번째 사용자의 m번째 layer에서의 수신 심볼과 부호화기의 평균값이다.  $\tilde{A}_{u,m} = \mathbf{w}_m A_{u,c}$ 는 u번째 사용자의 m 번째 layer의 유효 주파수 응답 (CFR)이다.

$A_{u,c} = \text{diag}\{A_{u,c}(0) \cdots A_{u,c}(K-1)\}$ 는 대각 행렬로

$(k,k)$ 성분이 채널 응답 (CIR)  $A_{u,c}(k)$ 의  $(cK+k)$ 번째 DFT 성분과 같다.  $P_T$ 를 총 전력이라고 정의했을 때 P는  $P_T/U$ 과 같이 동등하게 나누어 가진다. Z는 평균이 0 이고 분산이  $\sigma_z^2 \mathbf{I}_K$ 인 백색정규잡음 (AWGN)의 행렬이다.

최소 평균 제곱 오류 (MMSE)를 기반으로, 주파수 영역에서의 등호화를 위한 값  $G_{u,m}(k)$ 들은 다음과 같다.

$$G_{u,m}(k) = \frac{\sqrt{P} \tilde{A}_{u,m}(k)}{\sum_{u'} \sum_{m'} v_{u',m'} P |\tilde{A}_{u',m'}(k)|^2 + \sigma_z^2}. \quad (4)$$

$\bar{s}_{u,m}(n)$ 를 부호화기의 시간 영역에서의 평균 값들 이라고 했을때,  $\mu_{u,m} = 1/K (\sum_{n=0, \dots, K-1} |\bar{s}_{u,m}(n)|^2)$ 으로 구해진다. 이를 바탕으로 주파수 영역에서의 추정 값  $\hat{S}_{u,m}(K)$ 는 아래와 같다.

$$\hat{S}_{u,m}(k) = G_{u,m}^*(k) Y_{u,m}(k) + (\mu_{u,m} - G_{u,m}^*(k) \tilde{A}_{u,m}(k)) \sqrt{P} \bar{S}_{u,m}(k), \quad (5)$$

여기서  $(\cdot)^*$ 는 공액 복소수이고  $\mu_{u,m} = 1/K (\sum_{k=0, \dots, K-1} G_{u,m}^*(k) \tilde{A}_{u,m}(k))$ 이다.

### 2.2 적응형 전력 제어 알고리즘

기지국은 각 사용자들의 채널 정보로 비트 오류율 (BER) 성능을 추정할 수 있어야 한다. 반복적인 검출의 경우 수식적으로 성능을 구하기 어렵기 때문에 SNR-분산 밀도 진화 방식을 이용하여 BER 성능을 예측한다. 멀티레벨 변조방식을 이용하는 경우에는 layer들 사이의 유효 주파수 응답이 독립적이지 않기 때문에 [4]에서 제안된 SNR-분산 밀도 진화 방식을 이용한다. 이 방식을 이용하면 사용자들 사이의 BER 성능을 추정하여 스케줄링이 가능해진다.

제안하고자 하는 알고리즘은 다음의 스케줄링 문제를 해결한다.

$$\max_{w_n \in W} SE = \sum_c \sum_{u \in S_c} R_{u,c}(w_n) \quad (6)$$

$$s.t. BER_{th} > BER_u, \forall u \in S_c.$$

여기서  $S_c$ 는 chunk c에서 선택된 사용자들의 모임 이고  $R_{u,c}$ 는 그들의 주파수 효율이다. 적응형 전력 제어 알고리즘은 우선 전력 제어를 위한 전력 가중치들의 집합을 만든다  $\mathbf{w} = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_I\}$ . 전력 가중치 집합에 대해 적응형 제어 알고리즘 1을 수행한다. 먼저 주어진 SNR 및 전력 가중치에 대해 최대 주파수 효율을 계산한다. 동일한 변조 방식을 사용하기 때문에 스

케줄링된 사용자가 많을수록 주파수 효율은 증가한다. SNR-분산 밀도 진화방식 [4]으로 BER 성능을 추정하여 타겟 BER 성능을 보장할 수 있는 만큼 사용자를 증가시킨다. 이를 각 전력 가중치 집합에 대해 수행하여 가장 높은 주파수 효율을 가지는 전력 가중치를 선택한다.

알고리즘 1. 적응형 제어 알고리즘	
1.	초기화 $SE_{max} = 0$
2.	for $n=1:L$
3.	주어진 SNR, $w_n$ 에 대해 최대 주파수 효율 계산 (6)
4.	if ( $SE_n > SE_{max}$ & $BER_n > BER_{u=Sc}$ )
5.	$SE_{max} = SE_n$
6.	$w_{applied} = w_n$
7.	end if
8.	end for

### III. 결과 및 결론

제안한 방식의 성능을 확인해보기 위하여 다음의 시뮬레이션을 수행하였다. 대역폭 5 MHz에 블록 길이  $N = 512$ 이고 전체 대역폭이 총  $C=16$ 의 chunk로 나누어지는 GFDMA 시스템을 고려하였다<sup>11</sup>. 따라서 각 chunk당  $K=32$ 개의 부반송파를 가진다. 각각의 노드들의 링크들은 TU(Typical Urban) 채널을 이용하고, 수신 단에서는 채널을 완벽히 안다고 가정하였다. 총 사용자는 16명으로 가정하였고, 송신 안테나 하나와 수신 안테나 두 개를 가진 SIMO(Single-input multiple-out) 시스템을 고려하였다. 구축장 3과 1/2의 비율을 가지는 길쌈코드를 사용하였고, 각 사용자는 레이어마다 QPSK 심볼을 사용하였다. 타겟 BER은  $10^{-3}$ 으로 설정하였고 SNR-분산 밀도 진화를 위한 횟수는 5이다. Max-SNR 방식은 가장 좋은 채널을 가진 사용자에게 먼저 자원을 할당하는 방식이고, round-robin 방식은 각 사용자들에게 동일한 자원 할당의 기회를 주는 방식이다<sup>11</sup>.

적응형 전력 제어를 위한 전력 가중치는  $I=3$ 개로  $\{[1/2 \ 1/2]^T, [4/5 \ 1/5]^T, [9/10 \ 1/10]^T\}$ 이다. 각각의 전력 가중치에 해당하는 max-SNR 및 round-robin 스케줄링 방식의 주파수 효율은 그림 1에 나타나 있다. 적응형 전력 제어를 통해 0~11dB에서는  $[1/2 \ 1/2]^T$ 의 전력 가중치를 11~17 dB에서는  $[4/5 \ 1/5]^T$ 를 17~20 dB에서는  $[9/10 \ 1/10]^T$ 를 사용하는 것을 확인할 수 있다. 총 전력이 적은 경우에는 두 전력 가중치가 비슷한 경우에 더 좋은 성능을 가졌다. 이는 멀티레벨 변조방식이 가장 안 좋은 가중치 성능에 영향을 받기 때

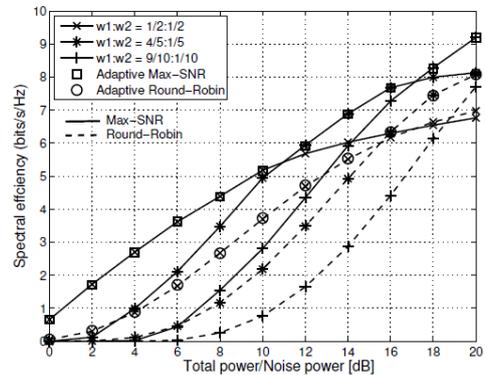


그림 1. 스케줄링 알고리즘에서 적응형 전력 제어의 주파수 효율  
Fig. 1. Spectral efficiency of adaptive power control in scheduling algorithms

문이다. 하지만 총 전력이 커짐에 따라 전력 가중치가 비슷한 경우에는 layer들 사이의 간섭이 커지게 되어 주파수 효율이 제한되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 경우에는 전력 가중치가 클수록 주파수 효율이 큰 것을 확인할 수 있다.

본 논문을 통해 멀티레벨 변조방식에서는 수신 SNR에 따라 전력 가중치를 다르게 하는 것이 간섭을 효과적으로 제어할 수 있기 때문에 주파수 효율에 큰 이득이 되는 것을 확인할 수 있었다.

### References

- [1] T. W. Yune, et al., "SC-FDMA with iterative multiuser detection: improvements on power/spectral efficiency," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 3, pp. 164-171, Mar. 2010.
- [2] H. Imai and S. Hirakawa, "A new multilevel coding method using error correcting codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 23, no. 3, pp. 371-377, May 1977.
- [3] C. H. Choi, et al., "Bit-interleaved coded transmission with multilevel modulation for non-orthogonal cooperative systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 1, pp. 95-105, Jan. 2011.
- [4] T. K. Kim, C. H. Choi, and G. H. Im, "Performance of single-carrier systems with multilevel bit-interleaved coded modulation," in *Proc KICS Fall Conf.*, pp. 9-10, Korea, Nov. 2010.