

반복적 다중사용자 검파 기반의 단일 반송파 주파수분할다중접속 시스템을 위한 송신 전력 제어 기법

민 문 식[°]

A Transmit Power Control Method for Single-Carrier FDMA with Iterative Multiuser Detection

Moonsik Min[°]

요 약

본 논문은 반복적 다중 사용자 검출 기법을 사용하는 단일 반송파 주파수 분할 다중 접속 기법에 관해 연구한다. 특히, 다중 사용자 검출에 있어서 상향링크 유저들의 송신 전력을 제어하는 방식을 주로 연구하며, 직관적인 전력분배 알고리즘을 제안하여 다중 사용자검출에 있어서 전력제어가 가지는 중요성을 보여주고자 한다.

Key Words : SC-FDMA, iterative multiuser detection, power control, spectral efficiency

ABSTRACT

This letter considers a single-carrier frequency division multiple access system with iterative multiuser detection. Specifically, this letter focuses on the uplink transmit powers of multiple users, and proposes a power control method in order to provide an insight into the importance of transmit power design.

I. 서 론

단일 반송파 주파수 분할 다중 접속(SC-FDMA)은 직교주파수분할과 함께 광대역 고속데이터 통신 기법으로써 활발히 연구되어 왔다¹⁻². SC-FDMA 시스템은 일반적으로 수신부에 걸리는 부담이 크기 때문에 주로 상향링크에 활용되어 왔다. 또한, 수신부인 기지국의 높은 신호 처리 능력을 기반으로 반복적 다중사용자 검출(IMD)방식을 조합한 grouped SC-FDMA (GFDMA)기법이 제안되어 기존 대비 높은 주파수 효율을 얻을 수 있었다³.

GFDMA는 복수의 유저가 하나의 시간-주파수 자원을 공유함에 따라, 신호 검출 단계에서 다른 유저의 신호가 간섭으로 작용하기 때문에 송신파워 배분이 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 그럼에도 불구하고 대부분의 GFDMA 연구는 사용자간의 전력제어를 고려하지 않고 있다³⁻⁵. 본 논문에서는 직관적인 방식의 전력 분배 방법을 제안하여, 전력제어가 GFDMA의 성능에 미치는 영향을 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 기지국이 U_T 명의 유저와 통신하는 GFDMA 시스템을 고려한다. 기지국과 각 유저는 하나의 안테나를 가진다. 시스템내의 유저들은 GFDMA의 기본 자원할당 단위인 부반송파와 청크(subcarrier chunk)를 공유하는 방식으로 통신한다. 전체 청크의 수를 M , 각 청크내의 부반송파의 수를 K 라고 하면, GFDMA 시스템의 전체 주파수 대역은 MK 개의 부반송파로 나뉜다. 주파수 영역에서 m 번째 청크의 수신 신호 벡터 \mathbf{R}_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{R}_m = \sum_{u \in S_m} \sqrt{P_u^L P_{u,m}} \mathbf{A}_{u,m} \mathbf{X}_{u,m} + \mathbf{N}_m \quad (1)$$

여기서 S_m 은 청크 m 을 공유하는 유저들의 집합이고 S_m 의 원소의 개수를 U_m 이라 한다. $\mathbf{A}_{u,m}$ 은 m 번째 청크의 u 번째 유저의 주파수 영역 채널응답을 나타내는 $K \times K$ 대각행렬이고, $\mathbf{X}_{u,m}$ 은 m 번째 청크의 u 번째 유저의 송신 신호를 주파수 영역에서

* 이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5074268)

[°] First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1206-3805) Mokpo National University, Department of Electronics, Information and Communication Engineering, mnsk1min@mokpo.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2018-01-001, Received January 2, 2018; Revised January 22, 2018; Accepted January 22, 2018

나타낸 $K \times 1$ 유닛 벡터이다. \mathbf{N}_m 은 공분산 행렬이 $\sigma_N^2 \mathbf{I}_K$ 인 복소 백색가우시안 잡음이다. $P_{u,m}$ 은 m 번째 청크의 u 번째 유저의 송신파워이며, P_u^L 는 기지국으로부터 u 번째 유저로의 자유공간 경로감쇄이다. $P_u^L = \left(\frac{c}{4\pi d_u f_c}\right)^2$, 여기서 c 는 빛의 속도, d_u 는 기지국으로부터 유저 u 사이의 거리, f_c 는 중심 주파수이며, $P_{u,m} \leq 1$ 로 정규화 한다.

IMD를 통한 검출 시, 다중 접속으로 인한 간섭을 제거한 신호는 다음과 같이 표현 된다.

$$\mathbf{Z}_{u,m} = \sqrt{P_u^L P_{u,m}} \mathbf{A}_{u,m} \mathbf{X}_{u,m} + \sum_{w \in S_m, w \neq u} \sqrt{P_w^L P_{w,m}} \mathbf{A}_{w,m} (\mathbf{X}_{w,m} - \bar{\mathbf{X}}_{w,m}) + \mathbf{N}_m, \quad (2)$$

여기서 $\bar{\mathbf{X}}_{u,m}$ 은 주파수영역에서 디코더에 입력되는 $\mathbf{X}_{u,m}$ 의 샘플평균을 뜻한다. 매 iteration에서 복원 신호 $\hat{\mathbf{X}}_{u,m}$ 은 $\mathbf{Z}_{u,m}$ 을 통해 얻어지며, 그 과정에서 최소 평균제곱오차(MMSE) 방식을 사용한다⁴⁾.

III. 제안하는 전력 제어 기법

본 논문에서는 GFMDA의 신호검출 과정에서 전력 제어를 통해 얻을 수 있는 이득에 관해 고찰 해 보고자 한다. 만약 최적의 솔루션을 고려한다면 전력제어 문제는 다음과 같이 구성될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \operatorname{argmax}_{P_{u,m}} \eta \text{ [bps/Hz]} \\ & \text{subject to } BER_u < BER_{th}, P_{u,m} \leq 1, \forall u \in S_m, \forall m. \end{aligned} \quad (4)$$

주파수 효율 η 는 $\eta \equiv \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{u \in S_m} r_{u,m} (1 - BER_{u,m})$ 로 정의 되며, $r_{u,m}$ 은 단일 유저의 modulation and coding set (MCS)에 따른 데이터 율을 의미한다. 본 논문에서는 각 유저의 MCS가 동일하다고 가정한다. 또한, 일반적인 무선통신 시스템의 QoS는 BER_{th} 이 10^{-3} 이하의 작은 값이므로

$$\eta \approx \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{u \in S_m} r = \frac{r}{M} \sum_{m=0}^{M-1} U_m \quad (5)$$

로 근사할 수 있다. 따라서 (4)의 최적화 문제는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \operatorname{argmax}_{P_{u,m}} \sum_{m=0}^{M-1} U_m \\ & \text{subject to } SINR_u > SINR_{th}, P_{u,m} \leq 1, \forall u \in S_m, \forall m. \end{aligned} \quad (6)$$

즉, 최적의 전력제어를 위해서는 (6)의 문제를 풀 수 있어야 한다. 하지만 IMD는 매 iteration에서의 신호의 SINR값을 정확히 알 수 없기 때문에, (6)의 최적화 문제를 풀어내기가 쉽지 않다. 대신에 본 논문에서는 다음 두 가지 사실에 주목한다.

- 1) GFMDA에서는 하나의 신호파워가 다른 신호의 검출에 간섭으로 작용하므로 유저의 송신파워를 순차적으로 줄여나가는 것이 검출에 유리할 수 있다.
- 2) IMD과정은 먼저 검출되는 유저의 신호가 차례로 빠져나감으로써 다음 유저의 검출시 SINR이 증가하는 구조이다. 따라서 인접한 유저사이의 SINR간의 역학관계가 유사하다.

이에 착안하여, 본 논문에서는 일정한 비율로 그리고 순차적으로 전력을 줄이는 방법을 고안한다. 이러한 방식은 수학적으로 최적의 해법을 제공하진 않지만 GFMDA 시스템에서 전력 제어가 어느 정도의 효과를 가지는지, 그 중요성을 보여 줄 수 있다는 점에서 의미를 가진다.

3.1 제안하는 전력 제어 기법

초기에 유저들은 최대 파워 $P_{u,m} = 1$ 으로 송신한다. 이어서 수신 SNR $P_{u,m} P_u^L \bar{\Lambda}_{u,m} / \sigma_N^2$ 을 기준으로, QoS를 만족시키지 못하는 유저들을 제외한 후, 나머지 유저들을 내림차순으로 정렬한 집합을 $O_m = \{u_1, u_2, \dots, u_{L_m}\}, L_m \leq U_m$ 로 표기한다. 제안하는 전력 제어 기법은 상기한 논의를 기반으로, 집합 O_m 의 유저들의 다음번 송신 파워를 아래와 같이 등비수열로 조절한다.

$$P_{u_{k-1},m} = \gamma P_{u_k,m}, P_{L_m,m} = \frac{\sigma_N^2 \cdot SINR_{th}}{P_{u_{L_m}}^L \bar{\Lambda}_{u_{L_m},m}}, \quad (7)$$

여기서 $\bar{\Lambda}_{u,m} \equiv \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |A_{u,m}(k)|^2$ 이며, $\gamma > 1$ 는 시스템의 디자인 파라미터이다. 본 논문의 주안점은 독립적인 전력 제어 알고리즘을 제안하는 것이기 때

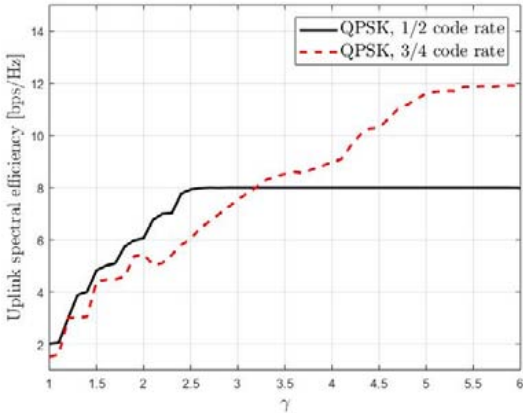


그림 1. 주파수 효율 vs 전력제어 공비 γ .
Fig. 1. Spectral efficiency vs γ .

문에, 최종적으로 데이터 송신에 참여하는 유저 집합을 정하는 스케줄링 과정은 기존에 제안된 방법을 활용한다. 특히, GFDMA기반의 스케줄링 기법 중 가장 높은 성능을 보이는 pattern-aware 방법^[5]을 사용하며, (7)을 통해 전력 제어된 유저들을 입력 집합으로 하여 최적의 송신 유저 집합을 pattern-aware 방식에 따라 최종 결정한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증한다. 5MHz 대역폭, 512 부반송파를 사용하는 GFMDA 시스템이 사용되었으며, 하나의 청크를 공유하는 유저는 8명이다. 기지국과 유저사이의 거리는 균일하게 {1, 8/7, 9/7, 10/7, 11/7, 12/7, 13/7, 2}로 설정하였다. 512개의 부반송파들은 $M=16$ 개의 청크로 나뉜다. 실험에는 constraint length가 3인 convolutional code가 사용되었고, QoS는 $BER < 10^{-5}$ 이다. Fading 채널은 6-tap typical urban, 정규화 된 Doppler 주파수는 0.001, IMD의 반복횟수는 20이다. 그림 1은 제안하는 기법이 가지는 성능을 디자인 파라미터인 공비 γ 에 관해 그린 결과이다. 공비가 증가할수록, 즉, 유저들에게 할당된 송신 파워의 차이가 증가할수록 성능이 좋아지지만 특정 값 이상부터 포화된다. 동일한 성능이라면 송신파워가 작은 쪽이 이득이므로 성능 포화가 시작되는 지점이 최적의 γ 가 된다. 그림 2는 실험을 통해 찾은 최적의 γ 를 사용하였을 경우, 제안된 기법이 얻을 수 있는 성능을 보여 준다. 그림 2에서는 두 결과 모두 QPSK, 1/2 code rate를 사용하였다. 제안된 기법은 전력제어

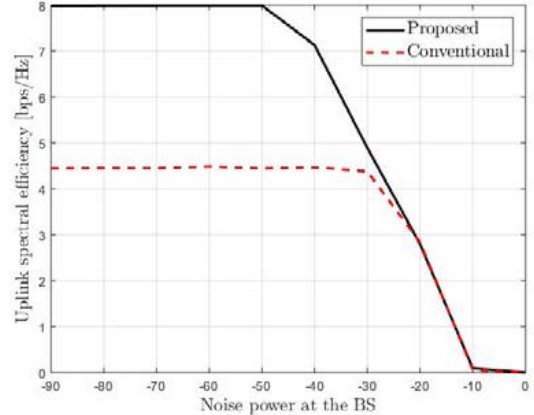


그림 2. 주파수 효율 vs 기지국 잡음 전력.
Fig. 2. Spectral efficiency vs Noise power.

를 사용하지 않는 기존의 방식(conventional)에 비해 낮은 송신 전력으로 훨씬 높은 주파수 이득을 얻을 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 간단한 전력제어 방법을 통해 GFDMA의 성능을 크게 향상 시킬 수 있었다. 제안하는 기법은 실험적인 접근법을 사용하였기 때문에 최적의 제어방식은 아니지만, 적절한 전력제어가 GFDMA 시스템 내에서 가지는 높은 가치를 확인시켜 준다.

References

- [1] F. Pancaldi, G. M. Vitetta, N. Al-Dhahir, M. Uysal, S. Muhaidat, and R. Kalbasi, "Single-carrier frequency domain equalization: A review," *IEEE Sig. Process. Mag.*, vol. 25, no. 5, pp. 37-56, Sept. 2008.
- [2] J. H. Lee and K. Choi, "Spatial and frequency diversity combining order in uplink SC-FDMA with SIMO systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 3, pp. 432-440, Mar. 2015.
- [3] T. W. Yune, C. H. Choi, G. H. Im, J. B. Lim, E. S. Kim, Y. C. Cheong, and K. H. Kim, "SC-FDMA with iterative multiuser detection: improvements on power/spectral efficiency," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 3, pp. 164-171, Mar. 2010.

- [4] C. H. Choi, H. J. Lim, T. K. Kim, G. H. Im, and V. B. Lawrence, "Spectral efficient multiuser technique with channel-dependent resource allocation schemes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 3, pp. 990-999, Mar. 2012.
- [5] Y. S. Cho, D. Kim, T. K. Kim, and G. H. Im, "Improved channel dependent user selection for an SC-FDMA system," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 1608-1611, Oct. 2012.