

다중안테나 FBMC-QAM 시스템에서의 적응적 프로토타입 필터 세트 적용

심 동 규[°]

Adaptation of Prototype Filter Set for MIMO FBMC-QAM System

Dongkyu Sim[°]

요 약

본 논문에서는 다중안테나 FBMC-QAM 시스템에서 적응적으로 프로토타입 필터 세트를 적용하는 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 유효 채널 이득을 기반으로 채널의 주파수 선택적 특성을 추정한 후, 채널 특성에 적합한 프로토타입 필터 세트를 번갈아 사용한다. 모의실험을 통해 하나의 고정된 프로토타입 필터 세트를 사용하는 기존의 FBMC-QAM 시스템에 비해 제안 알고리즘을 기반으로 하는 FBMC-QAM 시스템이 개선된 비트 오류율 성능을 얻을 수 있음을 확인한다.

Key Words : New waveform, FBMC-QAM, MIMO, Prototype filter set, Adaptation algorithm

ABSTRACT

In this paper, we propose an adaptation algorithm of a prototype filter set for multiple-input multiple-output filter-bank multicarrier-quadrature amplitude modulation (MIMO FBMC-QAM) system. The proposed algorithm estimates the frequency selectivity of channels based on the gain of effective channels and utilizes a suitable prototype filter set, alternately, according to the channel

characteristic. Simulation results show that the MIMO FBMC-QAM system based on the proposed algorithm provides an improved bit error rate performance compared to the conventional MIMO FBMC-QAM system based on the one fixed prototype filter set.

I. 서 론

Filter-bank multicarrier (FBMC) 시스템은 사이드 로브 (sidelobe)가 매우 작아 파편화된 주파수 (fragmented spectrum)을 효율적으로 사용하기 위한 dynamic spectrum aggregation 기술에 적합한 새로운 웨이브폼 (waveform) 중 하나로 많은 관심을 받고 있다^{1,2}. FBMC 시스템에서 사용하는 프로토타입 필터 (prototype filter)는 목표로 하는 전송 속도, 직교화 (orthogonality) 특성, 주파수 집중 (frequency confinement) 특성 성능에 따라 설계가 이루어지며, 이러한 세 가지 성능은 trade-off 관계에 있다^{3,4}. 따라서 FBMC 시스템을 효과적으로 사용하기 위해서는 주어진 채널 환경에 적합한 프로토타입 필터를 사용하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 다중안테나 FBMC-QAM 시스템의 프로토타입 필터 세트를 채널 특성에 따라 번갈아 사용하는 적응적 알고리즘을 제시한다. 제안 알고리즘은 유효 채널의 최대 이득과 최소 이득의 비율을 활용하여 채널의 주파수 선택적 특성을 추정하고, 임계값 (threshold)와의 비교를 통해 사용할 프로토타입 필터의 종류를 결정한다. 모의실험을 수행하여 적응적으로 프로토타입 필터 세트를 적용하는 제안 알고리즘이 하나의 고정된 프로토타입 필터 세트를 사용하는 기존 FBMC-QAM 시스템에 비해 비트 오류율 성능이 향상됨을 확인한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 서로 다른 두 개의 프로토타입 필터로 구성된 세트를 활용하는 다중안테나 FBMC-QAM 시스템을 고려하며, N_T 개의 송신 안테나와 N_R 개의 수신 안테나를 가정한다. 부반송파의 총 개수를 M ,

※ 이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2020R1A6A1A12047945)

※ 이 논문은 2020학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

•° First and Corresponding Author : (ORCID: 0000-0002-7012-1700) School of Information and Communication Engineering, Chungbuk National University, dongkyu.sim@chungbuk.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202210-250-A-LU, Received October 21, 2022; Revised November 7, 2022; Accepted November 7, 2022

프로토타입 필터의 차수 (order) 또는 oversampling 인수 (factor)를 N , $L = M \times N$, 크기가 $L \times M$ 인 frequency-shifted 펄스 파형 (pulse shape) 행렬을 \mathbf{P}_f , 크기가 $L \times L$ 인 unitary 이산 푸리에 변환 (discrete Fourier transform) 행렬을 \mathbf{F}_L 로 정의하면, 다중경로 페이딩 채널 (multipath fading channel)을 통과한 n 번째 주기 FBMC 시스템의 수신 심볼 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_n = \sum_i \mathbf{H}_{ni}^{(f)} \mathbf{a}_i + \widetilde{\mathbf{w}}_n \quad (1)$$

식 (1)에서, $\mathbf{H}_{ni}^{(f)} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ni}^{(f),11} & \dots & \mathbf{H}_{ni}^{(f),1N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{ni}^{(f),N_R 1} & \dots & \mathbf{H}_{ni}^{(f),N_R N_T} \end{bmatrix}$,

$\mathbf{a}_i = \left[(\mathbf{a}_i^1)^T, \dots, (\mathbf{a}_i^p)^T, \dots, (\mathbf{a}_i^{N_T})^T \right]^T$, $\widetilde{\mathbf{w}}_n = \left[(\widetilde{\mathbf{w}}_n^1)^T, \dots, (\widetilde{\mathbf{w}}_n^q)^T, \dots, (\widetilde{\mathbf{w}}_n^{N_R})^T \right]^T$ 는 각각 주파수 영역 유효 채널 행렬, QAM 데이터 벡터, 유효 부가 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise; AWGN) 벡터를 나타내며,

$\mathbf{H}_{ni}^{(f),qp} = \mathbf{P}_f^H \mathbf{F}_L \widetilde{\mathbf{H}}_{ni}^{(f),qp} \mathbf{F}_L^H \mathbf{P}_f$, $\widetilde{\mathbf{H}}_{ni}^{(f),qp}$ 는 p 번째 송신 안테나와 q 번째 수신 안테나 사이의 다중경로 페이딩 채널 행렬, $\mathbf{a}_i^p = [a_{0,i}^p, \dots, a_{k,i}^p, \dots, a_{M-1,i}^p]^T$ 는 p 번째 송신 안테나에 해당하는 QAM 데이터 벡터, k 는 부반송파 인덱스 (index), $\widetilde{\mathbf{w}}_n^q = \mathbf{P}_f^H \mathbf{F}_L \mathbf{w}_n^q$, \mathbf{w}_n^q 는 q 번째 수신 안테나의 시간 영역 부가 백색 가우시안 잡음 벡터이다⁵⁾. 이때, m_0 번째 부반송파와 n_0 심볼 주기에 해당하는 다중안테나 수신 심볼 벡터 $\mathbf{z}_{m_0, n_0} = [z_{m_0, n_0}^1, \dots, z_{m_0, n_0}^q, \dots, z_{m_0, n_0}^{N_R}]^T$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{z}_{m_0, n_0} = \left[\mathbf{H}_{n_0 m_0}^{(f)} \right]_{m_0 m_0}^{N_R N_T} \mathbf{a}_{m_0, n_0} + \mathbf{r}_{m_0, n_0} + \widetilde{\mathbf{w}}_{m_0, n_0} \quad (2)$$

$\left[\mathbf{H}_{n_0 m_0}^{(f)} \right]_{m_0 m_0}^{N_R N_T}$ 은 크기가 $N_R \times N_T$ 인 desired 다중안테나 유효 채널 행렬을 나타내며 $\left[\mathbf{H}_{n_0 m_0}^{(f)} \right]_{m_0 m_0}^{N_R N_T}$ 의 (q, p) 성분은 $\mathbf{H}_{n_0 m_0}^{(f), qp}$ 의 $(m_0 + 1, m_0 + 1)$ 성분으로 정의된다. \mathbf{r}_{m_0, n_0} 은 잔여 간섭 (residual interference) 벡터를 의미하며, 간섭 다중안테나 유효 채널 행렬을 활용하

여 나타내면 아래와 같다.

$$\mathbf{r}_{m_0, n_0} = \sum_{m=0, m \neq m_0}^{M-1} \left[\mathbf{H}_{n_0 m}^{(f)} \right]_{m_0 m}^{N_R N_T} \mathbf{a}_{m, n_0} + \sum_{i \neq n_0, m=0}^{M-1} \left[\mathbf{H}_{n_0 i}^{(f)} \right]_{m_0 m}^{N_R N_T} \mathbf{a}_{m, i} \quad (3)$$

III. 적응적 프로토타입 필터 세트 적용

식 (2)와 (3)에서 확인할 수 있듯이, 다중안테나 FBMC-QAM 시스템의 비트 오류율 (bit error rate; BER) 성능은 잔여 간섭에 의해 제한된다. 잔여 간섭에 의한 영향을 분석하기 위해 신호대간섭비 (signal-to-interference ratio; SIR)를 정의하면 다음과 같다.

$$SIR = \frac{\left\| \left[\mathbf{H}_{n_0 m_0}^{(f)} \right]_{m_0 m_0}^{N_R N_T} \mathbf{a}_{m_0, n_0} \right\|^2}{\left\| \mathbf{r}_{m_0, n_0} \right\|^2} \quad (4)$$

식 (4)를 활용하여 [4]와 [5]에서 제시된 프로토타입 필터 세트 중 성능이 낮은 프로토타입 필터의 평균 SIR을 AWGN 채널에서 구하면 약 68dB, 16dB, extended vehicular A (EVA) 채널에서 구하면 약 12dB, 15dB이다. 이 결과를 통해 [4]에서 제시된 프로토타입 필터 세트는 직교화 특성을 완벽하게 만족하도록 설계하였지만, 주파수 집중 특성이 나쁘기 때문에 AWGN 채널과 같이 지연 프로파일 (delay profile)이 없는 환경에 적합하다는 것을 알 수 있다. 반면, [5]에서 제시된 프로토타입 필터 세트는 직교화 특성을 일정 부분 포기하면서 주파수 집중 특성을 개선했기 때문에 주파수 선택적 특성이 강한 다중경로 페이딩 채널에 유리하다.

따라서 다중안테나 FBMC-QAM 시스템의 비트 오류율 성능을 개선하기 위해 채널의 주파수 선택적 특성에 따라 프로토타입 필터 세트를 적응적으로 적용하는 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은 채널의 주파수 선택적 특성을 desired 다중안테나 유효 채널의 최대 이득과 최소 이득의 비율로 정의한 파라미터 ρ 로 추정하며, ρ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{\max \left\| \left[\mathbf{H}_{nm}^{(f)} \right]_{nm}^{N_R N_T} \right\|^2}{\min \left\| \left[\mathbf{H}_{nm}^{(f)} \right]_{nm}^{N_R N_T} \right\|^2} \quad (5)$$

이때, 채널의 주파수 선택적 특성이 강할수록 파라미터 ρ 는 큰 값을 갖는다. 따라서 ρ 가 임계값보다 작을 경우에는 직교화 특성이 좋은 프로토타입 필터를, 반대의 경우에는 주파수 집중 특성이 좋은 프로토타입 필터를 번갈아 사용하도록 제안 알고리즘 설계하여 최적의 비트 오류율 성능을 얻도록 한다.

IV. 모의실험

제안 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해 모의실험을 수행하였다. 송신 안테나와 수신 안테나 개수는 2개, 부반송파의 개수는 128개, 변조는 16-QAM, zero-forcing (ZF) 단일 톤 (per-tone) 수신기, [4]와 [5]의 저자가 제시한 oversampling 인수 $N = 4$ 인 프로토타입 필터 세트를 사용하였으며, 채널은 레일리 (Rayleigh) 페이딩 채널과 ETU 채널을 랜덤하게 발생시켰다.

그림 1은 비트 오류율 성능을 비트에너지대잡음비 (energy per bit to noise spectral density ratio; E_b/N_0)에 따라 나타낸 것으로 임계값은 1.5를 사용하였다. 실험 결과를 통해 제안 알고리즘이 BER 10^{-2} 기준 약 2dB의 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 제안 알고리즘이 적응적으로 프로토타입 필터 세트를 활용하여 각 프로토타입 필터 세트의 장점을 효과적으로 활용할 수 있기 때문이다.

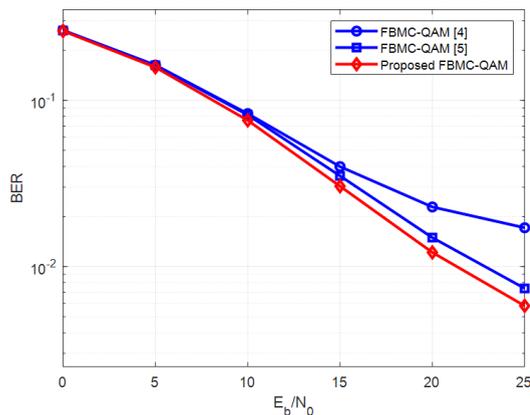


그림 1. BER 성능 비교
Fig. 1. Comparison of BER performances

V. 결론

본 논문은 다중안테나 FBMC-QAM 시스템에서 유효 채널 이득을 활용하여 적응적으로 프로토타입 필터 세트를 적용하는 알고리즘을 제안하였다. 모의실험을 통해 채널 환경에 적합한 프로토타입 필터 세트를 번갈아 사용함으로써 제안 알고리즘이 비트 오류율 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] H. Bogucka, P. Kryszkiewicz, and A. Pliks, "Dynamic spectrum aggregation for future 5G communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 5, pp. 35-43, May 2015. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7105639>)
- [2] S. Jang, D. Na, and K. Choi, "Intensive performance comparison between OFDM-Based and FBMC-Based uplink systems for 5th-and-beyond generation," *J. KICS*, vol. 44, no. 5, pp. 814-828, May 2019. (<https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.5.814>)
- [3] C. Kim, Y. H. Yun, K. Kim, and J.-Y. Seol, "Introduction to QAM-FBMC: From waveform optimization to system design," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 66-73, Nov. 2016. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600384CM>)
- [4] H. Nam, M. Choi, S. Han, C. Kim, S. Choi, and D. Hong, "A new filterbank multicarrier system with two prototype filters for QAM symbols transmission and reception," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 9, pp. 5998-6009, Sep. 2016. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2575839>)
- [5] Y.-H. Cho, C. Kim, K. Kim, Y. H. Yun, Z. Ho, and J.-Y. Seol, "Channel estimation performance of OQAM/FBMC and QAM/FBMC systems," in *Proc. IEEE ISWCS*, pp. 551-555, Brussels, Belgium, Aug. 2015. (<https://doi.org/10.1109/ISWCS.2015.7454405>)