

심볼 타이밍 오프셋에 강건한 ZP-OFDM 시스템에 관한 연구

A Study on the ZP-OFDM System Robust to Symbol Timing Offset

정재필*

Jae-Pil Chung*

요 약

본 논문에서는 ZP-OFDM(Zero Padding-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서의 심볼 타이밍 오프셋의 문제를 분석하고, 이러한 심볼 타이밍 오프셋 문제를 극복하기 위해 양방향 중첩-가산 기법을 사용하는 ZP-OFDM 시스템을 제안한다. 제안한 ZP-OFDM 시스템은 부정확한 심볼 타이밍 동기화로 인해 심각한 심볼 타이밍 오프셋이 발생하더라도 이전 ZP-OFDM 심볼과 현재 ZP-OFDM 심볼의 ZP 간격을 모두 사용하는 양방향 중첩-가산 기법을 통해 부반송파간의 직교성을 유지할 수 있으며 다른 ZP-OFDM 심볼로부터의 간섭을 줄일 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 ZP-OFDM 시스템이 기존의 ZP-OFDM 시스템 보다 우수함을 증명한다.

Abstract

In this paper, we analyze the STO (Symbol Timing Offset) problem in conventional ZP-OFDM (Zero Padding-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) systems and propose a robust ZP-OFDM system with bi-directional overlap-add scheme to overcome the problem. The proposed ZP-OFDM system is able to preserve the orthogonality between subcarriers and reduce the interference from other ZP-OFDM symbols due to the BOA scheme, which exploits both ZP intervals of the previous and the current ZP-OFDM symbols, even though serious STOs result from inaccurate symbol timing synchronization. Simulation results verify that the proposed ZP-OFDM system is superior to the conventional ZP-OFDM system.

Key words : Zero Padding, Cyclic Prefix, OFDM, Symbol Timing Offset, ISI

1. 서 론

최근 다수의 직교 부반송파를 사용하여 병렬로 전송하는 직교주파수분할다중화방식인 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)이 널리 사용되고 있다 [1-4]. 그 중에서 ZP(Zero Padding)-OFDM 시스템은 전형적인 CP(Cyclic Prefix)-OFDM 시스템의 대안으로써 제안되었으며, 이는 송신전력 절약 및 채널의 널 문제

제거 등을 제공해 줄 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 ZP-OFDM 시스템은 최근 WPAN(Wireless Personal Area Network) 기술로 부각되고 있는 근거리 초광대역 무선통신 시스템(UWB, Ultra-Wideband)인 MB(Multi-Band)-OFDM에 채택되어 사용되고 있으며, 이러한 방식은 HDTV, 프로젝터, 고음질 Hi-Fi, 디지털 카메라 등의 태내 정보가전기기에 주로 활용되고 있다[5-8].

일반적으로 ZP-OFDM 시스템은 반송파 주파수 오프

* 가천의과학대학교 정보공학부(School of Information Eng., Gachon University of Medicine & Science)

· 제1저자 (First Author) : 정재필(jpchung@gachon.ac.kr)

· 투고일자 : 2011년 11월 14일

· 심사(수정)일자 : 2011년 11월 14일 (수정일자 : 2011년 12월 27일)

· 게재일자 : 2011년 12월 30일

셋(Carrier Frequency Offset)이나 심볼 타이밍 오프셋(Symbol Timing Offset)과 같은 동기 에러에 민감한 단점이 있다[9]. 특히 DFT(Discrete Fourier Transform) 윈도우의 정확한 지점보다 앞서 심볼 타이밍 오프셋이 발생할 경우에 대한 영향 분석은 이루어졌으나 DFT 윈도우의 정확한 지점보다 뒤에 심볼 타이밍 오프셋의 영향이 발생할 경우에 대한 영향 분석은 미흡한 실정이며 이를 해결할 수 있는 새로운 ZP-OFDM 시스템에 대한 연구도 부족한 상태이다[10-11].

따라서 본 논문에서는 기존의 ZP-OFDM 시스템에서 심볼 타이밍 오프셋에 의해 발생하는 영향에 대해 살펴보고, 심볼 타이밍 오프셋에 강건한 새로운 ZP-OFDM 시스템을 제안한다. 제안한 시스템은 양방향 중첩-가산 기법(Bi-directional Overlap-Add)을 통해 이전 ZP-OFDM 심볼과 현재 ZP-OFDM 심볼의 ZP 간격을 모두 사용함으로써 어떠한 심볼 타이밍 오프셋이 발생하더라도 부반송과간의 직교성을 유지하고 다른 ZP-OFDM 심볼로부터의 간섭을 줄일 수 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안한 ZP-OFDM 시스템을 블록다이어그램과 수식을 통해 설명하고, 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 분석하여 제안한 기법의 우수성을 검증하고, 마지막 4장에서 결론을 맺는다.

II. ZP-OFDM 시스템

기존의 ZP-OFDM 시스템과 제안한 ZP-OFDM 시스템의 송수신 블록다이어그램은 다음의 그림 1과 같다.

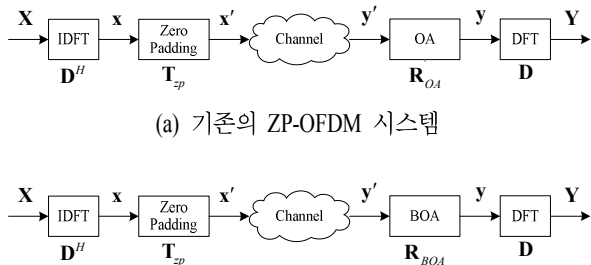


그림 1. ZP-OFDM 시스템 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of the proposed ZP-OFDM system.

제안한 ZP-OFDM 시스템은 다음과 같이 수식으로 표현될 수 있다. 먼저 주파수 영역에서의 송신 심볼 $X(k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$ 을 벡터 형태로 나타내면 아래와 같다.

$$\mathbf{X} = [X(0), X(1), \dots, X(N-1)]^T. \quad (1)$$

여기서, $[\cdot]^T$ 는 Transpose를 의미한다. 식 (2)와 같이 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform)를 통해 식 (1)을 시간 영역으로 변환하면 식 (3)의 벡터를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}^H \mathbf{X}. \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T. \quad (3)$$

여기서, \mathbf{D} 는 $N \times N$ DFT 행렬이며 각 원소는 다음의 식으로 결정된다.

$$[\mathbf{D}]_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j2\pi mn/N}. \quad (4)$$

N_{zp} 개의 0을 식 (3)의 벡터에 첨가하면 다음의 식과 같이 ZP-OFDM 심볼 벡터를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{T}_{zp} \mathbf{x}. \quad (5)$$

여기서, \mathbf{T}_{zp} 는 $N \times N$ 단위행렬 \mathbf{I}_N 과 $N_{zp} \times N$ 영행렬 $\mathbf{0}_{N_{zp} \times N}$ 로 구성되며 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{T}_{zp} = [\mathbf{I}_N^T \mathbf{0}_{N_{zp} \times N}^T]^T. \quad (6)$$

위 식 (5)에 나타낸 ZP-OFDM 심볼 벡터가 아래 식 (7)의 CIR(Channel Impulse Response)로 표현되는 다중경로 페이딩 채널을 통해 수신될 경우 심볼 벡터는 아래 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 다중경로 페이딩 채널은 한 ZP-OFDM 심볼 구간동안 일정하고 Zero-Padding 길이는 채널의 최대 시간지연보다 길다고 가정한다.

$$\mathbf{h} = [h(0), h(1), \dots, h(L-1)]^T. \quad (7)$$

여기서, $h(l)$ 은 l 번째 0이 아닌 복소 채널 이득으로 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 프로세서로서 Jakes 전력 스펙트럼을 갖는다. 또한 L 은 탭의 개수를 나타낸다.

$$y' = Mx' + n'. \quad (8)$$

여기서, n' 은 평균이 0이고 공분산 행렬이 $N_0 I_{N+N_{zp}}$ 인 가우시안 잡음 행렬을 나타내고, M 은 컨벌루션 행렬을 의미하며 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} h(0) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & h(0) & \ddots & \vdots \\ h(L-1) & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & h(L-1) & \ddots & h(0) \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & h(L-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

식 (8)에 기존의 중첩-가산 기법이 적용될 경우, 수신 심볼 벡터 $y = [y(0), y(1), \dots, y(N-1)]^T$ 는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = R_{OA} y' = Mx + n. \quad (10)$$

여기서, R_{OA} 는 중첩-가산 행렬을 나타내며, 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{OA} = [I_N I_{N_{zp}}]. \quad (11)$$

여기서, $I_{N_{zp}}$ 는 단위행렬 I_N 에서 처음 N_{zp} 개의 열 벡터들로 이루어진 행렬을 나타낸다. 또한 식 (10)에서 $M = R_{OA} M'$ 는 시분변 환형 컨벌루션 행렬을 의미하며 각 원소는 $[M]_{m,n} = h(\langle m-n \rangle_N)$ 에 의해 결정 되고 $\langle \cdot \rangle_N$ 는 module-N 연산을 나타낸다. 끝으로 $n = R_{OA} n'$ 는 잡음 벡터를 나타낸다.

식 (10)의 수신 심볼 벡터를 DFT를 통해 주파수 영역의 수신 심볼 벡터로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$Y = Dy = DMD^H X + W = HX + W. \quad (12)$$

여기서, $H = \text{diag}\{H(0), H(1), \dots, H(N-1)\}$ 는 주파수 영역에서의 채널 벡터를 나타내며 각 원소는 식 (13)을 통해 결정된다. $\text{diag}\{x\}$ 는 벡터 x 를 원소로 갖는 대각행렬을 나타낸다.

$$H(k) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) e^{-j2\pi kl/N} \quad (13)$$

또한 식 (12)에서 W 는 주파수 영역 잡음 벡터를 나타낸다.

식 (12)의 $Y = [Y(0), Y(1), \dots, Y(N-1)]^T$ 는 동기가 완벽하여 심볼 타이밍 오프셋의 영향이 없는 이상적인 경우를 나타낸 것이며, 실제 환경에서는 심볼 타이밍 오프셋의 영향으로 성능 열화가 발생하게 된다[3]. 심볼 동기를 앞에서 잡을 경우 중첩-가산 기법에 의해 시간 영역 수신 벡터가 환형 천이된 형태가 되고 주파수 영역에서 위상에 변화가 발생하지만 심볼 타이밍 오프셋 보상기법이나 채널추정에 의해 쉽게 보상이 가능하다. 그러나 심볼 동기를 뒤에서 잡을 경우 심볼 타이밍 오프셋에 의해 심각한 ISI(Inter-Symbol Interference)와 ICI(Inter-Carrier Interference)가 발생하고 수신 성능이 급격히 저하된다. 따라서 이에 대한 경감 기법이 필요하다. 아래의 식 (14)는 이러한 심볼 타이밍 오프셋의 영향이 발생했을 때의 수신 심볼을 나타낸다.

$$Y(m) = \frac{N-\delta}{N} X(m) H(m) e^{j2\pi m\delta/N} + I_{m,k}(\delta) + \xi(\delta) + W(m). \quad (14)$$

여기서, δ 는 심볼 타이밍 오프셋을 나타내고, $\xi(\delta)$ 는 심볼 타이밍 오프셋에 의해 발생한 ISI를 나타내고, $I_{m,k}(\delta)$ 는 심볼 타이밍 오프셋에 의해 발생한 ICI를 나타내고 아래의 식과 같이 표현된다.

$$I_{m,k}(\delta) = \frac{1}{N} \sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} X(k) H(k) \cdot e^{j\pi(2k\delta + (\delta+1)(k-m))/N} \frac{\sin(-\pi\delta(k-m)/N)}{\sin(\pi(k-m)/N)}. \quad (15)$$

앞서 언급한 ICI는 부정확한 심볼 동기로 인해 현재 ZP-OFDM 심볼의 시간 영역 샘플들 중 일부가 포함되지 않아 발생하게 되고, ISI는 다음 ZP-OFDM 심볼의 시간 영역 샘플들이 포함되면서 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안한 ZP-OFDM 시스템은 양방향 중첩-가산 기법을 사용하며 다음의 식으로 표현된다.

$$y = R_{BOA} y'. \quad (16)$$

여기서, y' 은 수신 심볼 벡터를 나타내며, R_{BOA} 는 양방향 중첩-가산 행렬을 나타낸다. 이들은 각각

식 (17) 및 식 (18)에 의해 정의된다.

$$y' = [y'(\delta - N_f), y'(\delta - N_f + 1), \dots, y'(\delta + N + N_b - 1)]^T. \quad (7)$$

$$R = [I_{N_a} \ I_N \ I_{N_b}]. \quad (18)$$

여기서, I_{N_a} 는 단위행렬 I_N 에서 마지막 N_a 개의 열 벡터들로 이루어진 행렬을 나타내고, I_N 는 단위행렬 I_N 에서 처음 N_b 개의 열벡터들로 이루어진 행렬을 나타낸다. 또한 N_a 는 이전 ZP-OFDM 심볼의 Zero Padding 부분에서 선택된 샘플의 개수를 나타내고 N_b 는 현재 ZP-OFDM 심볼의 Zero Padding 부분에서 선택된 샘플의 개수를 나타낸다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 제안한 ZP-OFDM 시스템의 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한다. 시뮬레이션을 위해 부반송파 개수가 256개, Zero-Padding 개수가 32개인 ZP-OFDM 시스템을 가정한다. 변조방식은 BPSK를 사용하였으며, 다중경로 페이딩은 12개의 탭으로 구성된 지수적으로 감소하는 전력 지연 프로파일을 고려하였다. 심볼 동기를 위한 프리앰블은 두 개의 동일한 부분으로 구성되고 각각은 $N/2$ 개의 샘플을 갖는다[4]. 또한 심볼 동기는 자기 상관기법을 사용한다.

그림 2는 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 30dB에서의 심볼 타이밍 오프셋(δ)의 pdf(probability density function)를 나타내고 대부분 뒤쪽에서 많이 발생함을 알 수 있다. 이를 통해 ISI와 ICI에 의한 성능열화가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

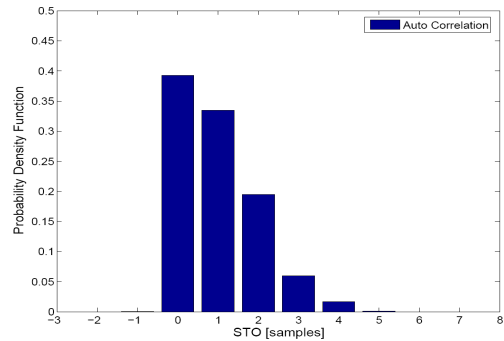


그림 2. 심볼 타이밍 오프셋의 pdf 분석(SNR 30dB)
Fig. 2. pdf of the STO(Symbol Timing Offset)(SNR 30dB).

그림 3은 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널에서 심볼 타이밍 오프셋에 따른 BER 성능을 나타낸다. 제안한 ZP-OFDM 시스템(Prop)이 동일한 심볼 타이밍 오프셋의 영향에 대해 기존의 ZP-OFDM 시스템(Conv)에 비해 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

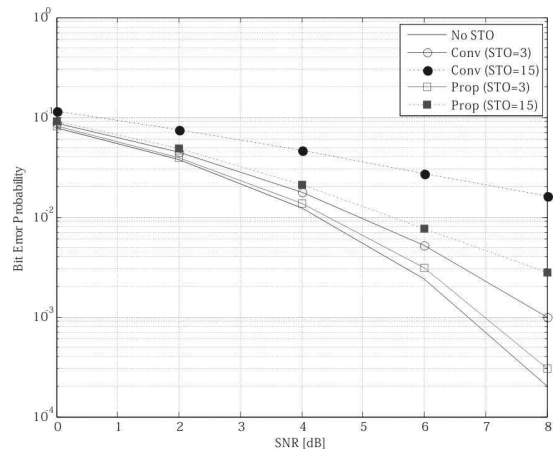


그림 3. AWGN 채널에서의 BER 성능
Fig. 3. BER performance in AWGN channel.

그림 4는 다중경로 페이딩 채널에서 심볼 타이밍 오프셋에 따른 BER 성능을 나타낸다. 기존의 ZP-OFDM 시스템은 성능이 포화되는 양상을 나타내고 있으나 제안한 ZP-OFDM 시스템은 심볼 타이밍 오프셋 영향에 대해 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 특히 심볼 타이밍 오프셋이 15일 경우(STO=15)의 그래프를 살펴보면 BER=10⁻²에서 제안한 시스템이 기존 시스템에 비해 약 5dB이상의 SNR 이득을 나타냄을 확인할 수 있다.

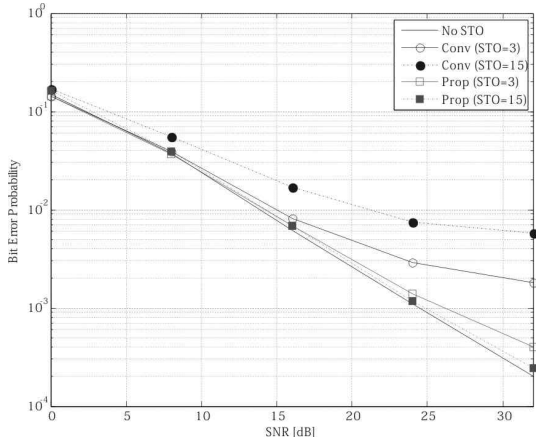


그림 4. 다중경로 페이딩 채널에서 BER 성능
Fig. 4. BER performance in multipath fading channel.

IV. 결 론

본 논문에서는 심볼 타이밍 옵셋의 pdf 분석을 통해 기존 ZP-OFDM 시스템에서는 심볼 타이밍 옵셋에 의해 ISI와 ICI가 발생할 확률이 높음을 확인하였고, 이를 극복하기 위해 양방향 중첩-가산 기법을 사용하는 새로운 ZP-OFDM 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템을 AWGN 채널과 다중경로 페이딩 채널에서 심볼 타이밍 옵셋에 따라 시뮬레이션 해본 결과, 기존의 ZP-OFDM 시스템에 비해 우수한 BER 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correcting", *IEEE Trans. commun.* vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, Oct. 1994

[2] B. Muquet, Z. Wang, G. B. Giannakis, M. de Courville, and P. Duhamel, "Cyclic prefixing or zero padding for wireless multicarrier transmissions ?", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 50, no. 12, pp. 2136-2148, Dec. 2002.

[3] J. Wang, J. Song, Z.-X. Yang, L. Yang, and J. Wang, "Frames theoretic analysis of zero-padding OFDM over deep fading wireless channels," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 52, no. 2, pp. 252-260, June. 2006.

[4] P. D.Papadimitrion, C. N. Georghiades, "Zero- padded

OFDM with improved performance over multipath channels", *CCNC 2004*, pp. 323326, Dec. 2004

[5] 강희조, "임펄스 간섭과 광대역 무선통신 채널에서 터보 부호를 적용한 OFDM/FHMA 하이브리드 시스템의 성능", *한국향행학회논문지*, Vol. 10, No. 3, pp. 213-218, Oct., 2006

[6] M. Sattorov, H. J. Kang, "A Study on Huffman Coding to Improve Performance of OFDM", *한국정보기술학회논문지*, Vol. 7, No. 6, pp. 115-119, Dec., 2009

[7] J. Wang, J. Song, L. Yang, "A Novel Equalization Scheme for ZP-OFDM System Over Deep Fading Channels," *IEEE Trans, Broadcasting*, vol. 56, no. 2, June 2010.

[8] M. Ghosh, "Improved Equalization For Coded, Zero-Padded OFDM (ZP-OFDM) Systems", *IEEE ICC2007*, pp. 4263-4268, 2007

[9] C. R. N. Athaudage and R. R. V. Angiras, "Sensitivity of FFT-equalized zero-padded OFDM systems to time and frequency synchronization errors," in *Proc. IEEE PIMRC2005*, vol. 2, pp. 730-734, Sept. 2005.

[10] L. Zhao, A. Men, "ZP-OFDM Broadcasting Systems with Insufficient Guard Interval", *IEEE Proceeding*, pp. 727-731, 2008

[11] T. M. Schmidle and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.

정 재 필 (鄭在弼)



1985년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 8월 : 단국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2000년 8월 : 한국향공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)
 1989년 8월~1990년 12월 : (주)동양전자통신 중앙연구소

연구원

1990년 12월~1992년 3월 : (주)케피코 기술연구소 연구원
 1994년 2월~현재 : 가천의과학대학교 정보공학부 교수
 관심분야 : 이동통신, 신호처리, WBAN