

고속 페이딩 환경에서 직교주파수분할다중화 시스템의 부반송파 간 간섭 제거 등화 기법

신 오 순*

An Inter-Carrier Interference Cancellation Scheme for OFDM Systems in a Fast Fading Channel

Oh-Soon Shin*

요 약

직교주파수분할다중화 시스템은 일반적으로 단일 반송파 전송 방식에 비해 다중 경로에 의한 주파수 선택적 페이딩에 강인한 반면 심볼의 길이가 길어짐에 따라 도플러 확산 효과 또는 송·수신기의 주파수 옵셋에 의한 고속 페이딩에 취약하다. 고속 페이딩은 심볼 내에서 채널의 변화를 야기하여 부반송파 간 직교성 손실을 일으킴으로써 부반송파 간 간섭을 유발한다. 본 논문은 이러한 고속 페이딩 환경에서 부반송파 간 간섭을 제거하기 위한 효과적인 등화 기법을 제안하고 DVB-T 시스템에서 성능을 검증한다.

Key Words : inter-carrier interference (ICI), orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), channel estimation, equalization

ABSTRACT

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems are generally robust to frequency-selective fading as compared with single-carrier transmission systems. However, as a result of an increased symbol duration, OFDM is vulnerable to fast fading due to Doppler spread and/or frequency offset. Specifically, fast fading

makes the channel vary significantly within the symbol duration, causing a loss of orthogonality between subcarriers and thus inter-carrier interference (ICI). In this letter, we propose a simple but effective equalization scheme to remove the ICI in OFDM systems under a fast fading channel. The performance of the proposed equalization scheme is evaluated in a DVB-T system.

I. 서 론

직교주파수분할다중화(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 전송 기술은 광대역 데이터 전송에 적합하여 디지털 방송, 무선랜, 이동통신 시스템 등에 다양하게 사용되고 있다. OFDM 기술은 부반송파(Subcarrier)를 통해 병렬로 데이터를 전송하는 다중반송파 전송 방식의 일종으로 단일 반송파 전송 방식에 비해 심볼이 길어져서 다중경로 페이딩에 강인한 특징을 갖는다. 부반송파의 대역폭을 충분히 작게 하면 주파수 선택적 페이딩 환경에서도 부반송파별 단일 탭 등화기를 통해 신호 복조가 가능하다. 한편, 부반송파 간의 직교성을 유지하기 위해서는 심볼 구간 내에서 채널의 변화가 없어야 하는데 도플러 확산 효과 또는 송·수신기의 주파수 옵셋에 의한 고속 페이딩으로 인해 직교성이 손실될 수 있다. OFDM 심볼의 길이는 부반송파 대역폭의 역수로 결정되므로 부반송파 대역폭이 작아지면 심볼 길이가 길어져서 고속 페이딩에 더 취약해진다. 이러한 이유로 고속 페이딩 환경에서는 부반송파 간의 직교성 손실로 인한 부반송파 간 간섭(Inter-Carrier Interference: ICI)을 제거하기 위해 시간 도메인 등화기(Equalizer)가 필요하다¹⁻⁴⁾.

본 논문은 고속 페이딩 환경에서 OFDM 시스템의 ICI 제거를 위한 효과적인 등화 기법을 제안한다. 제안 기법은 병렬적 간섭 제거를 기반으로 데이터 심볼 추정과 채널추정을 반복적으로 수행하여 간섭의 영향을 점진적으로 줄이는 방법이다. 유럽식 디지털 방송 시스템인 DVB-T 시스템에 제안 기법을 적용하여 고속 페이딩 환경에서 성능을 평가하여 기존 등화 기법에 비해 상당한 성능 이득을 얻을 수 있음을 검증한다.

※ 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호: 2017R1D1A1B03030436).

* First and Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, osshin@ssu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2017-09-249, Received September 14, 2017; Revised September 27, 2017; Accepted September 27, 2017

II. 시스템 모델

그림 1과 같이 부반송파 수가 N 인 OFDM 시스템 기반의 DVB-T^[5] 시스템을 고려한다. 채널코딩/디코딩, 인터리빙/디인터리빙 및 변복조 방식은 DVB-T 스펙을 따른다. IFFT 블록 입력에 해당하는 송신 심볼 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 가 시간 및 주파수 이중 선택적 페이딩 채널을 겪고 수신되면 수신기에서 FFT 출력 신호 \mathbf{y} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w}. \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 은 잡음 신호를 나타내고, $N \times N$ 채널행렬 \mathbf{H} 의 (m, k) 원소는 m 번째 부반송파 성분이 k 번째 부반송파에 주는 영향을 나타내는 채널 성분으로 다음과 같이 표현할 수 있다^[1].

$$[\mathbf{H}]_{m,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sum_{\ell=0}^{L-1} h[n, \ell] e^{-\frac{j2\pi k\ell}{N}} \right) e^{-\frac{j2\pi(m-k)n}{N}}, \quad (2)$$

$$0 \leq m, k \leq N-1.$$

식 (2)에서 $h[n, \ell]$ 은 n 번째 샘플링 순간 ℓ 번째 다중 경로의 채널 임펄스 응답을 나타내고 L 은 다중 경로의 수를 의미한다. 송신 심볼 \mathbf{x} 는 데이터 심볼과 파일럿 심볼로 구성되며 각각 해당 부반송파 인덱스의 집합을 I_D, I_P 로 정의한다. OFDM 수신기는 먼저 파일럿 심볼을 이용하여 채널행렬 \mathbf{H} 를 추정하고 이를 이용하여 ICI를 제거하는 등화를 수행함으로써 데이터 심볼을 검출한다.

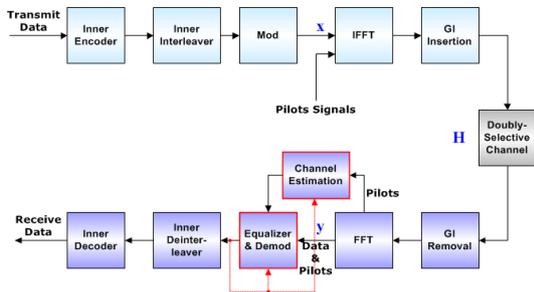


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

III. 제안 등화 기법

기존에 제안된 대표적인 등화 기법으로 병렬 간섭 제거(Parallel Interference Cancellation: PIC) 기법과

직렬 선형 등화(Serial Linear Equalizer: SLE) 기법이 있다. PIC는 단일 탭 Minimum Mean Square Error (MMSE) 기법으로 데이터 심볼을 대략적으로 추정 후 아래와 같이 ICI를 제거한다^[2].

$$\mathbf{x}'_k = \begin{cases} x_k, & k \in I_P \\ [\mathbf{H}]_{k,k}^* y_k (|[\mathbf{H}]_{k,k}|^2 + \gamma^{-1})^{-1}, & k \in I_D \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}' + \sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{H}]_{k,k} \mathbf{x}'_k. \quad (4)$$

PIC는 구현이 비교적 간단하나 ICI가 큰 경우 \mathbf{x}' 과 원래 심볼 \mathbf{x} 의 차이가 커서 성능이 나쁘다.

SLE는 Banded Assumption¹⁾을 이용하여 k 번째 부반송파에 실린 데이터 심볼 추정을 위해 채널행렬 \mathbf{H} 의 (k, k) 원소를 중심으로 행과 열 각각 $\pm B$ 원소만으로 이루어진 블록 채널행렬을 구성하고 이를 이용하여 MMSE 추정을 하는 방식이다^[1]. SLE는 일반적으로 PIC보다 복잡도가 크지만 가장 영향이 큰 주변 ICI를 효과적으로 제거할 수 있다.

PIC와 SLE 등화 기법은 수신기가 채널행렬을 알고 있다는 가정 하에 수행된다. 실제 환경에서는 채널행렬을 추정해야 하고 채널추정의 정확도는 ICI 제거 성능에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 채널추정과 ICI 제거를 위한 등화기를 결합한 수신기 구조를 제안한다. 제안한 구조는 그림 2와 같이 채널추정과 송신 심볼 추정을 반복적으로 수행한다. 송신 심볼 추정을 위한 ICI 제거를 위해서는 복잡도가 낮은 식 (4)의 PIC를 이용하고 채널추정은 파일럿 심볼 기반의 선형 근사화 기법을 이용한다^[3]. 파일럿 부반송파에 대한 채널추정 결과를 보간을 통해 전체 부반송파에 대한

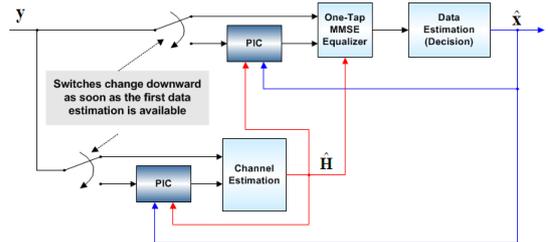


그림 2. PIC 기반 반복적 데이터 심볼 추정 및 채널추정 결합 등화 기법
Fig. 2. Iterative data symbol estimation and channel estimation based on PIC

1) $|m-k| > B$ 에 대해 $[\mathbf{H}]_{m,k} = 0$ 으로 가정하고 ICI의 영향을 인접한 $2B$ 개의 부반송파로 제한함을 의미한다.

채널정보 $\mathbf{v}_n = [v_n[0], v_n[1], \dots, v_n[N-1]]$ 을 생성하고 이를 이용하여 다음과 같이 시간축 상의 선형 근사화를 통해 n 번째 OFDM 심볼에 대한 채널행렬 \mathbf{H}_n 을 도출한다^[3].

$$\mathbf{H}_n = \text{diag}(\mathbf{v}_n) + \boldsymbol{\Theta} \text{diag}(\mathbf{v}'_n). \quad (5)$$

식 (5)에서 행렬 $\boldsymbol{\Theta}$ 와 \mathbf{v}'_n 의 k 번째 요소 $v'_n[k]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} 0 & \zeta_1 & \dots & \zeta_{N-1} \\ \zeta_{-1} & 0 & \dots & \zeta_{N-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \zeta_{1-N} & \zeta_{2-N} & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$$\zeta_k = -\frac{1}{2} - j \left(2 \tan \left(\frac{\pi k}{N} \right) \right)^{-1},$$

$$v'_n[k] = \frac{v_{n+1}[k] - v_{n-1}[k]}{N + N_G}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1.$$

식 (5)의 채널추정치를 이용하여 먼저 단일 탭 MMSE 등화 후 송신 심볼을 추정한다. 추정한 심볼을 이용하여 데이터 심볼과 파일럿 심볼 각각에 대해 [그림 2]와 같이 PIC를 이용하여 ICI 제거 후 다시 채널추정과 데이터 심볼 추정을 한다. 이러한 과정을 반복함으로써 채널추정 및 데이터 심볼 추정의 정확도를 점진적으로 향상시킬 수 있다.

IV. 모의실험 결과

그림 3은 도플러 주파수 $f_d = 40$ Hz인 경우 여러 가지 등화 기법의 비트오류율(Bit Error Rate: BER) 성능을 보여준다. 전체 대역폭 8 MHz, 부반송파의 수 $N = 8192$ 등 DVB-T 시스템 파라미터^[5]를 사용하였고, 변조 기법은 64-QAM, 코드율은 2/3를 적용하고 Viterbi 디코딩을 수행하였다. 채널모델은 다중 경로의 수 $L = 6$ 인 COST 207 Typical Urban (TU)-6 모델을 가정하였다. 채널추정은 모든 기법 공통으로 식 (5)의 방법을 이용하였다. 먼저 SLE는 $B = 3$ 인 경우는 식 (3)-(4)의 PIC보다 성능이 약간 떨어지나 $B = 7$ 인 경우는 PIC보다 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 제안한 기법을 적용하여 Iteration의 수, 즉 데이터 심볼과 파일럿 심볼 각각에 대한 PIC 반복 수행의 횟수를 늘리면 상당한 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 3에는 표시하지 않았지만 3회 이

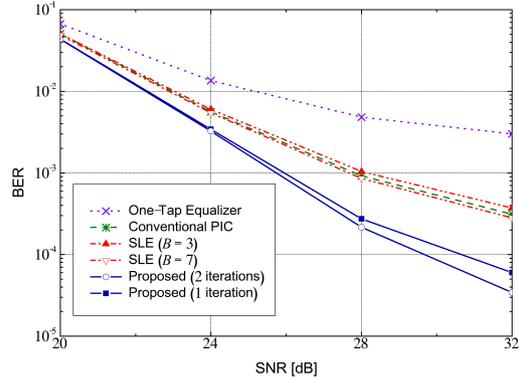


그림 3. 기존 및 제안 등화 기법의 BER 성능 비교
Fig. 3. BER performance of previous and proposed equalization schemes

상으로 Iteration 수를 늘려도 성능 이득은 미미하였다. 이는 2회의 Iteration으로 충분한 성능 이득을 얻을 수 있음을 의미한다. 한편, 도플러 주파수를 변화시키면서 모의실험을 수행하여 Target BER^[5] 2×10^{-4} 을 달성할 수 있는 최대 도플러 주파수를 구하면 PIC와 $B = 7$ 인 SLE의 경우 약 48 Hz이나 Iteration 수가 2인 제안 기법은 약 58 Hz로 향상됨을 확인하였다.

V. 결론

본 논문은 병렬 간섭 제거를 기반으로 데이터 심볼 추정과 채널추정을 반복적으로 수행함으로써 고속 페이딩 채널에서 OFDM 부반송파 간의 간섭을 제거하는 등화 기법을 제안하였다. DVB-T 시스템에서 제안 기법의 성능을 검증하였다.

References

- [1] V. Fischer, A. Kurpiers, and D. Karsunke, "ICI reduction method for OFDM systems," in *Proc. Int. OFDM-Workshop*, Sept. 2003.
- [2] P. Schniter, "Low-complexity equalization of OFDM in doubly selective channels," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 52, no. 4, pp. 1002-1011, Apr. 2004.
- [3] K. Schmidt, C. Gunter, and A. Rothermel, "Improving the mobility of DVB handheld devices with inter-carrier interference compensation," in *Proc. IEEE Int. Symp. Consumer Electron.*, pp. 182-187, Sept. 2004.

- [4] K. Kim, K. Kim, H.-R. You, and H. Park, "A low complexity ICI cancellation method for high mobility OFDM systems," in *Proc. KICS Fall Conf.*, pp. 304-307, Nov. 2006.
- [5] ETSI, *Digital video broadcasting (DVB); Frame structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*, EN 300 744, V1.6.1, Jan. 2009.