

DFE를 사용하는 무선 OFDM 시스템의 채널 등화 기법

이정미, 최재호

전북대학교 전자정보공학부

The channel equalization for wireless OFDM system using DFE

Jung-mi Lee, Jae-ho Choi

Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University
wave@moak.chonbuk.ac.kr

요약

본 논문에서 제안한 OFDM 시스템은 대역 사용 효율을 높이기 위하여 순환 접두부를 두지 않고 심볼을 전송한다. 그로 인해 존재하는 채널간의 간섭과 심볼간의 간섭을 제거하기 위해 DFE를 사용한 등화 기법을 제안하고, 다중 경로가 존재하는 무선 채널 환경에서의 기존의 순환 접두부를 사용하는 OFDM 시스템과 제안한 시스템을 모의 실험을 통해 각 시스템의 성능을 비교 분석한다.

1. 서론

최근 들어, 무선통신에도 고속통신에 대한 요구가 증가하고 있다. 무선통신의 경우 유선통신과 달리 다중경로 페이딩 채널이기 때문에 고속 데이터 전송시 심볼간의 간섭으로 인하여 시스템의 성능을 저하된다.

일반적인 OFDM 시스템에서는 심볼간의 간섭과 채널간의 간섭을 제거하기 위해 채널의 지연 확산보다 긴 순환 접두부를 사용하는데, 보통의 경우 순환 접두부는 전체 심볼기간의 20%정도를 차지한다[1][2]. 특히, 고속 통신 시스템에서 이러한 순환 접두부를 사용하는 것은 대역 사용 효율 측면에서 비효율적이다.

본 논문에서는 이러한 순환 접두부를 사용하지 않는 대신 DFE(decision feedback equalizer)를 사용하여 심볼간의 간섭과 채널간의 간섭을 제거하는 OFDM 시스템을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 본 논문의 2장에서는 일반적인 OFDM 시스템에 대해 살펴본

다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 DFE를 사용한 시스템을 설명하고 4장에서는 일반적인 OFDM 시스템과 본 논문에서 제안한 시스템을 모의 실험을 통해 분석한다. 5장으로 논문의 결론을 맺는다.

II. OFDM 시스템

일반적인 OFDM 시스템은 그림 1과 같이 구성된다. 먼저 송신기에서 입력 데이터는 직병렬 변환기에 의해 병렬로 변환되어 IFFT(inverse fast fourier transform)를 통하여 변조되고 순환 접두부를 삽입후 D/A 변환기를 거쳐 채널을 통해 전송된다.

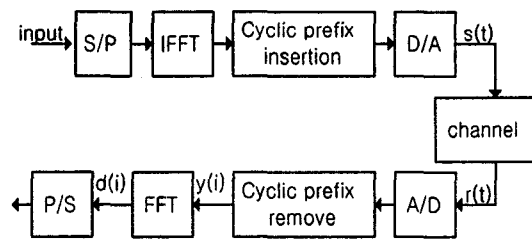


Figure 1. 일반적인 OFDM 시스템

수신기에서는 수신된 신호를 OFDM 심볼 지속기간동안 샘플링한 후 순환 접두부를 제거하고 FFT(fast fourier transform)로 복조시켜 전송된 데이터를 복원한다.

그림 1의 송신측에서 전송되는 기저대역 OFDM 전송신호는 아래와 같다.

$$s(t) = \sqrt{\frac{1}{LT}} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{l=0}^{L-1} d_l(i) v(t - iT) \cdot \exp(j2\pi \frac{l}{LT} t) \quad (1)$$

여기에서 L 은 부채널의 수이고, T 는 S/P 이전의 하나의 심볼 지속기간이며, T 는 하나의 OFDM 전송 심볼 지속기간으로 순환 접두부를 포함한다. $d_l(i)$ 은 l 번째 부채널의 i 번째 데이터이고, $v(t)$ 는 펄스정형함수이다. 이러한 송신 신호가 다중경로 페이딩 채널을 통과한 후의 수신측에서 수신된 기저대역 신호는

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m(t) s(t - \tau_m) + n(t) \quad (2)$$

이다.

$\alpha_m(t)$ 는 m 번째 경로의 페이딩 계수이고, τ_m 은 m 번째 경로의 지연확산이고 이 중 가장 값이 OFDM심볼 지속기간을 넘지 않는다고 가정한다.

$n(t)$ 는 분산이 σ^2 인 가우시안 잡음이다.

수신된 신호를 샘플링 한 후, 순환 접두부를 제거하면 N_s 개의 샘플을 얻게되는데, 이때, OFDM 심볼 지속기간 동안은 페이딩 계수와 위상 왜곡이 변하지 않는다고 가정하고 수식을 벡터와 행렬로 표현하면 다음과 같다. i 번째 OFDM 데이터 심볼이 $\mathbf{d}(i) = [d_0(i) \ d_1(i) \ \dots \ d_{L-1}(i)]^T$ 이고, j 번째 수신 심볼이 $\mathbf{y}(j) = [y_0(j) \ y_1(j) \ \dots \ y_{N_s-2}(j) \ y_{N_s-1}(j)]^T$ 이면, 수신측의 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(i) &= \mathbf{H}^{(0)}(i) \cdot \mathbf{F} \mathbf{d}(i) \\ &+ \mathbf{H}^{(1)}(i) \cdot \mathbf{F} \mathbf{d}(i-1) + \mathbf{n}(i) \quad (3) \\ &= \mathbf{E}^{(0)}(i) \mathbf{d}(i) + \mathbf{E}^{(1)}(i) \mathbf{d}(i-1) + \mathbf{n}(i) \end{aligned}$$

\mathbf{F} 는 IFFT 행렬이고, i 번째 OFDM 심볼이 겪는 다중경로 페이딩 채널 $\mathbf{H}^{(i)}(i)$ 일 때, $\mathbf{E}^{(i)}(i) = \mathbf{H}^{(i)}(i) \cdot \mathbf{F}$ 이고, $\mathbf{E}^{(i)}(i)_{n,k}$ 의 n 번째 행 k 번째 열 요소는 다음과 같다.

$$E^{(i)}(i)_{n,k} = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m(i) v(pT' + gT_s + nT_s - \tau_m) \cdot \frac{\exp(j2\pi nk/(N_s/L) + j\theta_m)}{\sqrt{L(N_s/L)}} \quad (4)$$

$$0 \leq n \leq N_s - 1, \quad 0 \leq k \leq L - 1, \quad p = 0, 1$$

이때, θ_m 은 $[0, 2\pi)$ 사이의 균일 분포를 갖는 m 번째 경로의 위상 왜곡이고, gT_s 는 순환 접두부의 길이이며, (3)식의 \cdot 연산은 행렬간의 곱셈 연산이 아닌 행렬의 각각의 요소간의 곱셈이다.

$\mathbf{n}(i) = [n_0(i) \ n_1(i) \ \dots \ n_{N_s-1}(i)]^T$ 는 가우시안 잡음이다.

일반적인 OFDM 수신신호의 경우 순환 접두부를 사용하여 심볼간의 간섭과 채널간의 간섭을 제거하므로 $\mathbf{H}^{(1)}(i) = \mathbf{0}$ 이 되고, FFT를 거치면, $\hat{\mathbf{d}}(i) = [\hat{d}_0(i) \ \hat{d}_1(i) \ \dots \ \hat{d}_{L-1}(i)]^T$

$$\hat{d}_l(i) = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m(i) \exp(-j\theta_m) d_l(i) + n'_l(i) \quad (5)$$

이다. 이때, $n'_l(i)$ 는 FFT를 통과한 가우시안 잡음이다. 순환 접두부를 사용하는 경우 페이딩 왜곡 $\alpha_m(i)$ 이나 위상 왜곡 θ_m 을 보상하는 등화기를 사용하면 시스템의 성능이 더욱 향상된다[3].

III. DFE를 사용하는 OFDM 시스템

이 장에서는 기존의 OFDM 시스템과 달리 순환 접두부를 사용하지 않고 DFE를 사용하여 심볼간의 간섭과 채널간의 간섭을 제거하는 OFDM 시스템을 설명한다. 제안한 시스템의 경우 순환 접두부를 사용하지 않으므로 식(1)과 식(4)를 식(6)과 식(7)로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{\frac{1}{LT}} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{l=0}^{L-1} d_l(i) v(t - iLT) \cdot \exp(j2\pi \frac{l}{LT} t) \quad (6)$$

$$E^{(i)}(i)_{n,k} = \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m(i) v(pLT + nT_s - \tau_m) \cdot \frac{\exp(j2\pi nk/(N_s/L) + j\theta_m)}{\sqrt{L(N_s/L)}} \quad (7)$$

이때, 한 개의 OFDM 심볼을 전송할 때 걸리는 시간을 기준으로 순환 접두부를 사용하는 시스템과 DFE를 사용한 시스템을 비교해 보면 데이터 전송 효율은 다음과 같다.

$$\frac{LT}{T} = \frac{LT}{LT + gT_s} \quad (8)$$

일반적으로 순환 접두부의 길이가 OFDM심볼 지속기간의 20%를 차지하므로 (8)식은 약 0.8의 값을 가진다. 즉 같은 양의 데이터를 보낼 때 순

환 접두부를 사용하지 않는다면 데이터 전송효율을 상대적으로 20% 높일 수 있다.

일반적인 DFE는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.[4]

$$\hat{I}(k) = \sum_{a=-K_1}^0 C_a u(k+a) - \sum_{b=1}^{K_2} C_b \hat{I}(k-b) \quad (9)$$

$\hat{I}(k)$ 는 등화기의 출력 데이터, $u(k)$ 는 등화기의 입력 데이터, $\hat{I}(k)$ 는 이전에 수신되어 결정된 데이터이고, feedforward(FF) 필터는 K_1+1 개의 탭과 탭계수 C_a 를 가지며, feedback(FB) 필터는 K_2 개의 탭과 탭 계수 C_b 를 가진다. 탭 계수 C_a, C_b 를 결정하는 알고리즘은 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 MMSE(minimum mean square error)를 이용하여 탭 계수를 결정한다[4]. 제안한 OFDM시스템과 DFE의 구조는 그림 2와 그림 3에 나타났다. 제안한 시스템은 일반적인 OFDM 시스템과 유사하나, 순환 접두부를 삽입하고 제거하는 부분이 없고 대신 FFT를 통과한 후에 채널간의 간섭과 심볼간의 간섭을 제거하는 DFE가 추가되어 있다.[5]

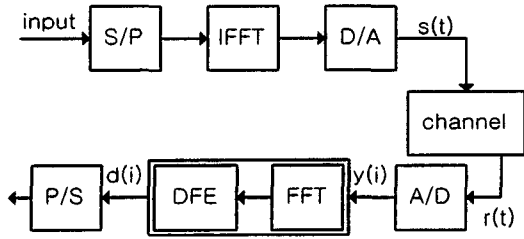


Figure 2. 제안한 OFDM 시스템

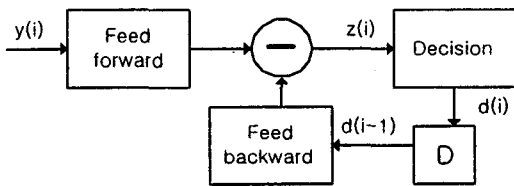


Figure 3. DFE의 구조

DFE의 구조를 보면 수신신호는FF 필터를 통과하며 다중 경로 채널 왜곡의 보상이 이루어지고 FB 필터를 이용하여 심볼간의 간섭을 제거한다. 최대 지연확산이 OFDM 심볼 지속기간보다 작다고 가정하였으므로 전에 수신된 한 개의 OFDM 심볼을 참조하는 것만으로도 심볼간의 간섭을 제거할 수 있으므로 1-탭 DFE를 사용한

다. 이때, DFE의 입력 데이터는 FFT 복조 전의 신호이기 때문에 엄밀하게 말하면, DFE부분은 그림 2의 회색 상자 부분이다. 이전에 수신된 심볼이 전송한 심볼과 일치 하다고 가정하면, 결정 변수 $z(i)$ 는 다음과 같다.

$$z(i) = C_0 y(i) - C_1 d(i-1) \quad (10)$$

그리고 FF 필터의 탭 계수와 FB 필터의 탭 계수는 아래와 같다.

$$C_0 = E(i)^{(0)H} (E(i)^{(0)} E(i)^{(0)H} + \sigma^2 I)^{-1},$$

$$C_1 = C_0 E(i)^{(1)} \text{ 이다.}$$

IV. 시스템 성능 평가

본 논문에서는 순환 접두부를 사용한 OFDM 시스템과 DFE를 사용한 OFDM 시스템을 각각의 실험을 통하여 비교 분석하였다.

채널의 페이딩 계수와 위상 왜곡은 OFDM 심볼 100개가 전송되는 기간동안에는 변하지 않는다고 가정한다. 또한 페이딩 계수는 레이리 분포를 따르고 위상 왜곡은 $[0, 2\pi]$ 사이의 균일 분포를 따른다.

순환 접두부를 사용한 OFDM 시스템은 채널을 보상해주는 1탭 등화기를 사용하였으며, 그 변수들은 표 1과 같다.

Table 1. 시스템 변수들

부채널의 수(L)	16, 32
부호화 기법	8-PSK, QPSK
다중 경로 수(M)	4
다중 경로 지연확산	0μs, 0.02μs, 0.05μs, 0.1μs
데이터 기간(T)	0.05μs
샘플링 간격(T _s)	0.05μs
순환 접두부를 제거한 샘플수 (N _s)	16, 32
펄스 정형 함수(v(t))	raised cosine 함수, rolloff factor : 0.2
OFDM 심볼 수	50,000

DFE를 사용한 OFDM 시스템은 순환 접두부를 사용한 시스템과 같고 단지 샘플링 간격을 $0.05\mu s / 2$ 로 하여, 샘플 수(N_s)를 각각 32와 64를 취하였다.

그림 4는 부채널의 수가 16이고 8-PSK 변조 방식을 사용한 경우이다. 그림 5는 부채널의 수가 16이고 QPSK 변조 방식을 사용한 경우이다. 그림 6은 부채널 수가 32이고 QPSK 변조 방식을 사용하였다. 각각의 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 제안한 시스템이 순환 접두부를 사용한 시스템보다 2-3dB 정도 성능이 우수함을 알 수 있다.

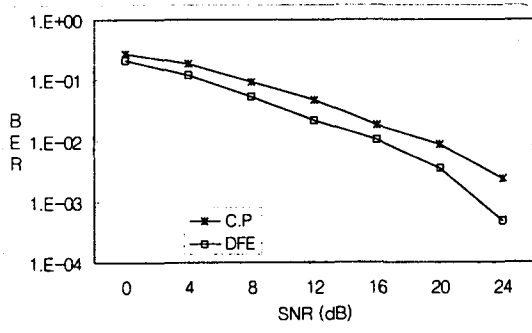


Figure 4. 16-부채널 8-PSK

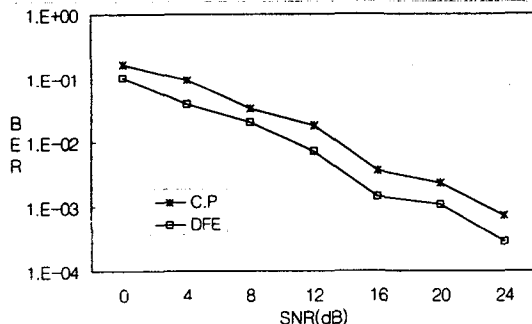


Figure 5. 16-부채널, QPSK

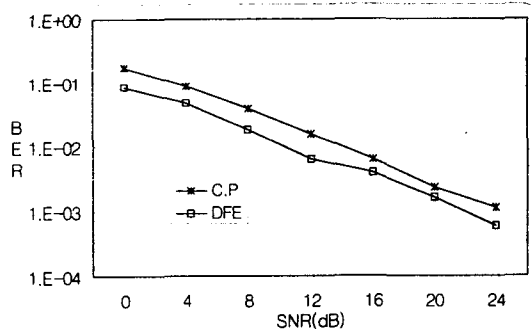


Figure 6. 32-부채널, QPSK

V. 결론

다중경로 페이딩이 존재하는 무선채널 환경에서 OFDM은 여러 개의 부채널로 데이터를 전송하는 병렬 전송방식으로 심볼 지속기간이 증가하여 채널의 지연확산에 강한 특징을 가지고 있다. 하지만 채널간의 간섭과 심볼간의 간섭을 제거하기 위하여 사용하는 순환 접두부는 시스템이 비효율적인 중복성을 가지게 한다. 본 논문에서는 대역 사용 효율을 높이기 위해 순환 접두부를 사용하지 않고 DFE를 사용하여 채널간의 간섭 및 심볼간의 간섭을 제거하는 시스템을 제안하였고 모의실험을 통하여 그 성능을 증명하였다.

Acknowledgements

본 논문은 정보통신부 연구지원에 의한 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] H. Sari, G. Karam, and Jeanclaude, "An Analysis of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing For Mobile Radio Applications," Proc. IEEE 44th VTC, 1994, vol 3, pp.1635 - 1639.
- [2] Richard Van Nee, Ramjee Prasad, *OFDM For Wireless Multimedia Communications*. Artech House Publishers, 2000.
- [3] Hongku Kang, Wooncheol Hwang and Kiseon Kim, "Performance Analysis of the OFDM System with One Tap Equalizer against the Two-ray Multipath Channel," Proc. of the 1999 IEEE Region 10 Conference - Vol 1, 45-48.
- [4] John G. Proakis, *Digital Communication*, third edition, McGraw-Hill, 1995.
- [5] Yi Sun, Lang Tong, "Channel Equalization for Wireless OFDM Systems with ICI and ISI," Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Communications - Vol 1, 182-186