

다중 경로 채널에서 개선된 적응 등화기를 채용한

OFDM/QPSK 시스템의 성능 분석

유기희*, 콧재민*, 안준배**, 강희조***, 조성준*

* 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과

** (주)아미텔 통신연구소 연구실

*** 동신대학교 전기전자공학과

Performance Analysis of OFDM/QPSK Systems with Improved Adaptive Equalizer in Multi-Path Channels

Ki-Hee Ryu*, Jae-Min Kwak*, Jun Bae Ahn**, Heau Jo Kang***, Sung-Joon Cho*

* Dept. of Telecomm. & Inform. Eng., Hankuk Aviation Univ.

** Dept. of Research Group 1, R&D Institute of Armitel Co., Ltd.

*** Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongshin Univ.

요약

본 논문에서는 단거리 M/W 전송장비에서 사용 가능한 10Mbps 급 OFDM/QPSK 시스템을 제안하였다. OFDM 변조 신호는 two-ray 다중경로 페이딩의 영향을 받는다. 채널 모델은 Rummier가 제안한 마이크로파 대역의 two-ray 채널 모델을 사용하였다. 수신단에서는 다중 경로 채널에 따른 성능 왜곡을 보상하기 위해 여분의 Training Sequence 또는 Pilot 심볼 없이 등화를 행할 수 있는 Blind 적응 등화기를 채택하였다. OFDM 시스템에 따른 두 가지의 등화기, Pre-FFT 적응 등화기와 주파수 적응 등화기 및 두 개의 등화기를 결합한 병행 적응 등화기를 각각 시스템에 도입하여 성좌도와 SER 성능 곡선을 통해 성능 개선 정도를 분석하였다.

분석결과로부터 주파수 적응 등화기와 Pre-FFT 적응 등화기의 각각의 특성을 확인할 수 있었으며, 또한 병행 적응 등화기의 도입에 따른 시스템 개선 정도를 확인할 수 있었다.

I. 서론

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식은 변·복조시 고속 푸리에 변환 (FFT :Fast Fourier Transform) 알고리즘을 사용하므로 회로의 규모를 작게 할 수 있다. 또한 OFDM은 스펙트럼 효율이 극대화된 다중 반송파 방식으로서 광대역 신호를 상호 직교성을 갖는 협대역의 부채널로 나누어서 전송하므로 전송되는 심볼 구간이 길어져 채널의 지연에 대한 영향을 덜 받게 되며 심볼간의 간섭을 줄일 수 있어 다중경로 성분에 의해 발생하는 ISI (Inter-Symbol Interference)의 영향을 완전히 제거 할 수 있다는 장점이 있으므로 최근 IEEE 802.11a 및 HIPERLAN/2, WLAN (Wireless LAN) 표준안에서도 OFDM 방식이 채택되었다¹⁾.

본 논문에서는 two-ray 다중 경로 채널에서 세가지 형태의 등화기를 채용하는 OFDM/QPSK 시스템의 SER 성능 분석한다. 세가지 형태의 등화기는 주파수 단일 탭 적응 등화기, Pre-FFT 11-탭 적응 등화기 및 두 개의 등화기를 결합한 병행 적응 등화기이다. 각

각의 등화기를 시스템에 적용하여 주파수 적응 등화기 특징과 Pre-FFT 적응 등화기 특징을 확인해 본다. 그리고 두 개의 등화기를 결합한 병행 적응 등화기 도입에 따른 시스템 개선 정도를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 제안하는 OFDM/QPSK 시스템 및 OFDM 변조기법과 다중경로 페이딩 모델에 대해 설명하고 수신 성능 개선 기법으로 사용되는 세가지 형태의 등화기에 대해서 자세히 살펴 본다. III장에서는 세가지 형태의 등화기를 채용하는 OFDM/QPSK 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 시스템 개선 정도 및 각각의 등화기의 특징에 대해서 알아 본다. IV장에서는 성능 분석 결과 및 각각의 적응 등화기의 특징을 토대로 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 제안하는 시스템 모델 및 변조기법

2.1 OFDM 변조 기법

본 논문에서의 OFDM/QPSK 변조 과정은 QPSK Mapping 과정에서 변조된 신호를 직 병렬 변환기를 사용하여 N개의 심볼열을 병렬로 변환시킨다. 각각의 병렬 심볼에는 부반송파가 곱해지고 주파수축

상에서는 간섭이 미치지 않도록 중첩하여 배치시킨다. 이와 같은 처리과정은 IFFT 처리과정 결과와 동일하다. 단, 본 논문에서 다루고 있는 채널에서는 지연시간이 아주 작으므로 별도의 보호구간 (Cyclic Extention)을 삽입하지 않았으며 보호구간이 필요한 windowing 대신 제로(zero) 삽입도 불필요한 디지털 필터를 사용하였다.

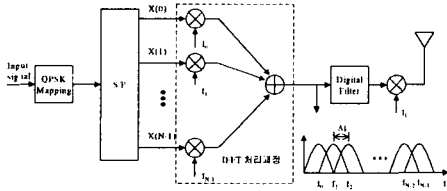


그림 1. OFDM/QPSK 송신부

IFFT 처리과정 후단의 OFDM/QPSK 송신신호는 다음 식과 같다.

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{j2\pi \frac{k}{T} t} \quad (1)$$

단 N : OFDM 시스템의 부 반송파 수,
T : OFDM 심볼 구간, x_k : QPSK 심볼 신호.

본 논문에서는 Windowing 대신에 디지털 필터를 사용하여 Symbol Wave Shaping을 하므로 Zero Insertion을 사용할 필요가 없으며, 특히 제로 삽입을 하지 않으므로 IFFT의 point 수를 높이지 않아도 되는 장점이 있다^[2].

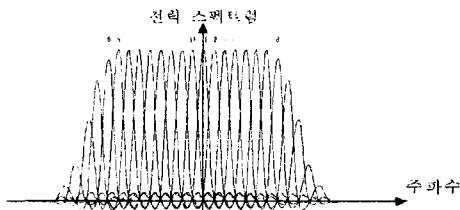


그림 2. 디지털 필터 출력 신호의 주파수 스펙트럼

그림 2는 16 point IFFT가 적용된 출력 신호가 디지털 필터를 통과한 후의 스펙트럼을 분석한 것이다.

디지털 필터를 통과한 송신 신호는 two-ray 다중 경로 채널과 AWGN 잡음의 영향을 받아 수신되어 FFT 처리과정을 통해 복호된다. 수신 신호의 FFT 처리과정은 다음과 같다.

$$y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} r(t) e^{j2\pi \frac{k}{T} t} + n_k \quad (2)$$

여기서 $r(t)$ 는 채널을 통과하여 수신된 신호이

고 n_k 는 AWGN 잡음이 FFT 블록단을 거친 후의 신호를 나타내고 있다.

2.2 다중경로 페이딩 모델

본 논문에서는 채널 모델로 마이크로파 대역의 two-ray 채널 모델을 사용하였다. 이러한 마이크로파 대역의 채널에 대해서는 Rummler가 제안한 채널 모델이 주로 사용되고 있다.

Rummler의 two-ray 채널모델에 대한 주파수 응답은 다음과 같이 주어진다^{[3][4]}.

$$H(w) = a[1 - be^{-j(w-w_0)\tau}] \quad (3)$$

이때, $a = 1 + \alpha$ 이고 $b = -\beta/(1 + \alpha)$ 이다.

식 (3)을 이용하여 전력 스펙트럼을 구하면 다음과 같다.

$$|H(w)|^2 = a^2[1 + b^2 - 2bcos[(w-w_0)\tau]] \quad (4)$$

식 (4)를 dB 단위로 다시 표현하면 다음 식과 같다.

$$A(f) = 10 \log_{10} |H(f)|^2 \quad (5)$$

실험적으로 증명된 τ 값은 $\tau \approx 1/(6B)$ 의 수식적 관계를 가지고 있다는 것이 알려져 있다^[2]. 예를 들어서 전형적으로 대역폭 B가 25MHz인 경우 τ 는 약 6.3[nsec]의 값을 갖는데 본 논문의 경우 대역폭 B가 10MHz이므로 τ 는 약 16[nsec]의 값을 갖게 된다.

그림 3은 감쇠계수가 0.9인 경우에 스펙트럼을 확인한 시뮬레이션 결과이다.

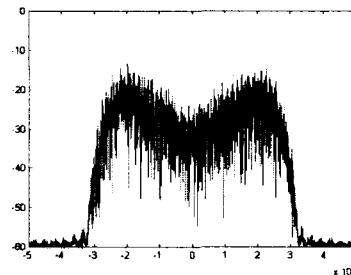


그림 3. 스펙트럼 채널 응답 (감쇠계수 = 0.9)

2.3 개선된 적응 등화기

본 논문에서는 two-ray 다중 경로 페이딩 환경에서의 시스템 성능 개선 방법으로 주파수 단일 탭 적응 등화기, Pre-FFT 11탭 적응 등화기 및 병행 적응 등화기를 도입하였다^{[6]-[7]}.

그림 4에서는 단일 탭 등화기를 채용한 OFDM 시스템을 나타내고 있고, 수신신호 $y_m(n)$ 를 복조한 심볼은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m(k) = FFT\{y_m(n)\}e^{-j2\pi kn/N} \quad (6)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} y_m(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

여기서, m 은 심볼의 인덱스, n 은 시간영역 샘플 신호의 인덱스, k 는 주파수 영역에서의 부 반송파의 인덱스를 나타낸다. 식 (6)은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m(k) = X_m(k)H_m(k) + D_m(k) \quad (7)$$

이때, $H_m(k)$ 는 채널의 주파수 응답이고 $D_m(k)$ 는 가우스 잡음을 나타낸다. Detector 후단의 신호를 $\hat{X}_m(k)$ 라고 할 때 등화기의 추정오차를 다음과 같이 나타내면,

$$\varepsilon_m(k) = X_m(k) - \hat{X}_m(k) \quad (8)$$

제곱평균을 최소로 하는 등화기의 계수는 식 (9)과 같은 반복 알고리즘으로 구할 수 있다.

$$C_{m+1}(k) = C_m(k) + \Delta\varepsilon_m(k) Y_m^*(k) \quad (9)$$

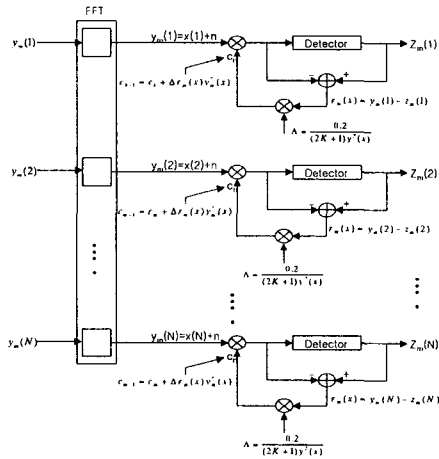


그림 4. OFDM 시스템에 적용한 단일 탭 적응 등화기

Pre-FFT 적응 등화기의 구조는 주파수 등화기와 동일한 계수 업데이트 하지만 차이점은 피드백 부분에 IFFT 블록을 가지고 있고 각각의 부반송파에서 등화기 계수 업데이트가 이루어지지 않고 한꺼번에 계수 업데이트가 이루어진다.

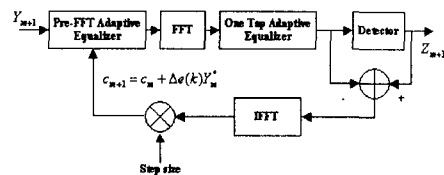


그림 5. OFDM 시스템에 적용한 병행 적응 등화기

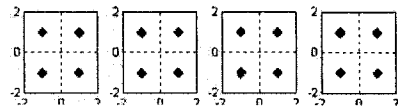
그림 5는 주파수 단일 탭 적응 등화기와 Pre-FFT 적응 등화기를 결합한 병행 적응 등화기를 나타내고 있다. FFT 블록단 후단에 있는 단일 탭 적응 등화기가 없는 경우는 Pre-FFT 적응 등화기만을 도입한 OFDM 시스템을 나타낸다.

Pre-FFT 적응 등화기와 병행 적응 등화기에서 등화기 계수는 주파수 축상의 적응 등화기와 같은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

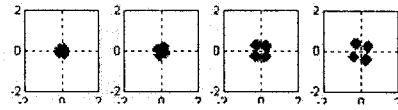
III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 고려하는 OFDM/QPSK 시스템은 신호 대역폭은 10[MHz]이고 부 반송파 수는 16이다. 시뮬레이션에서 페이딩 감쇠계수는 0.9인 열악한 환경을 설정한다.

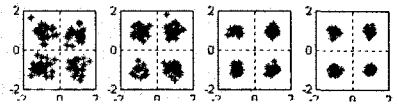
성능 개선 기법으로는 앞에서 제시한 세가지 형태의 적응 등화기를 적용한다.



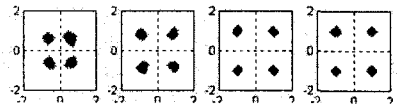
(a) 페이딩이 존재하지 않는 경우의 성좌도



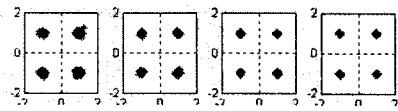
(b) 등화기를 적용하지 않은 경우의 성좌도



(c) 주파수 단일 탭 적응 등화기를 적용한 성좌도



(d) Pre-FFT 11 탭 적응 등화기를 적용한 성좌도



(d) 병행 적응 등화기를 적용한 성좌도

그림 6. 등화기 도입에 따른 OFDM/QPSK 시스템 성좌도

그림 6은 감쇠계수가 0.9인 two-ray 채널에서 E_s/N_0 가 30 dB인 경우에서 성좌도를 나타낸 것이다. 각각의 그림의 첫번째 성좌도는 notch 주파수에 있는 성좌도이며 두 번째, 세 번째, 네 번째 성좌도는 notch 주파수에서 일정 간격 만큼씩 멀어짐에 따라 나타낸 성좌도이다. 주파수 단일 탭 적응 등화기의 특징은 그림 6-(c)에서 확인할 수 있듯이 신호의 퍼짐정도가 높지만 진폭 왜곡은 Pre-FFT 적응 등화에 비해 높게 등화된다. 이에 비해

Pre-FFT 11탭 적응 등화기는 그림 6-(d)에서 확인할 수 있듯이 신호의 퍼짐정도는 낮지만, 진폭 왜곡은 주파수 등화에 비해 낮게 등화된다. 그림 6-(e)에서는 주파수 등화와 Pre-FFT 등화기의 특징이 결합된 병행등화의 성과를 나타내고 있다.

그림 7은 two-ray 다중 경로 채널 환경에서 주파수 단일 탭 적응 등화기와 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기를 채용한 경우에 오율 성능을 나타내고 있다. 성능 분석 결과 주파수 단일 탭 적응 등화기는 18 dB 이하의 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기에 비해서 높은 성능 개선 능력을 가지고 있으나 18 dB 이상의 경우에는 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기가 높은 성능 개선이 이루어진다. 왜냐하면, 본 논문에서 제안하는 등화기는 Blind 등화기이므로 Detector 후단의 신호와 수신된 신호와 차의 값으로 등화기 계수를 결정하게 된다. 만약 E_s/N_0 가 낮은 경우에는 Detector 후단의 신호가 잘못된 심볼로 결정되어 Decision 에러가 발생하게 된다. 그러므로 등화기 계수는 잘못된 결과를 만들어 에러가 발생할 수 있다. 주파수 단일 탭 적응 등화기는 부반송파마다 각각의 등화기 계수 업데이트가 이루어지게 된다. 만약 Decision 에러가 발생하게 되어 맞지 않는 계수 업데이트가 이루어지면, Decision 에러가 발생한 부반송파만이 에러가 발생한다. 그렇지만 Pre-FFT 11-탭 적응 등화기는 Decision 에러가 발생하게 된다면 부반송파 모두가 에러가 발생할 수도 있으므로 비교적 낮은 dB에서는 주파수 적응 등화기가 Pre-FFT 11-탭 등화기에 비해 크게 성능을 개선 시킨다.

그림 8은 본 논문에서 제안하는 개선된 등화기 구조를 갖는 병행 적응 등화기를 채용한 경우 Pre-FFT 등화기와 주파수 등화기에 비해 보다 높은 성능 개선 능력을 가짐을 나타내고 있다.

감쇄 계수가 0.9인 two-ray 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 OFDM/QPSK 시스템에 병행 적응 등화기를 채용하면, E_s/N_0 가 18 dB에서 데이터 통신이 가능한 $SER = 10^{-5}$ 을 달성한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 two-ray 다중 경로 채널에서 발생하는 성능 감쇄를 보상하기 위해 세가지 형태의 적응 등화기를 다루었다. 그 결과 주파수 단일 탭 적응 등화기는 Per-FFT 적응 등화기에 비해 다소 낮은 dB에서 높은 성능 보상능력을 갖는다. 반면에 높은 dB에서는 Pre-FFT 적응 등화기가 보다 높은 성능 보상 능력을 갖는다.

본 논문에서 제안하는 병행 적응 등화기는 복잡한 구조를 가지는 것이 단점이지만 기존의 등화기 보다 큰 성능 개선 능력을 가지고 있다.

참고문헌

[1] S. Hara, M. Mouri, M. Okada, and N. Morinaga, "Transmission performance analysis of multicarrier modulation in

frequency selective fast Rayleigh fading channel," *Wireless Personal Commun.*, vol. 2, pp. 335-356, Jan.-Feb. 1996.

[2] 안준배, 광재민, 유기희, 조성준 "다중경로 채널에서 STM-0급 OFDM/64QAM 시스템의 성능분석", 2001년도 하계종합학술발표회 논문집(상), pp601-604, 한국통신학회

[3] W. D. Rummmler, "A new selective fading model: application to propagation data," *Bell System Technical J.*, no. 5, pp. 1037-1071. May-June 1979.

[4] W. D. Rummmler, "More on the multipath fading channel model," *IEEE Trans. Communications*, Com-29, no. 3, pp. 346-352, Mar. 1981.

[5] Jack Kurzweil, *An Introduction to Digital Communication*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.

[6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, New York : McGraw-Hill, 3rd ed., 1995.

[7] S. Armour, A. Nix and D. Bull, "Performance Analysis of a Pre-FFT Equalizer Design for DVB-T," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, August 1999.

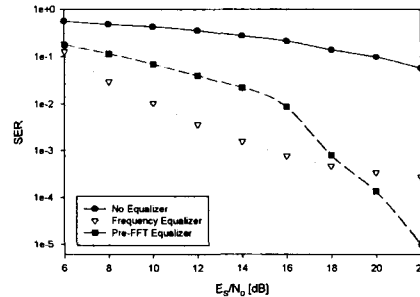


그림 7. two-ray 다중 경로 채널 환경에서 등화기를 채용한 OFDM/QPSK 오율 성능 I

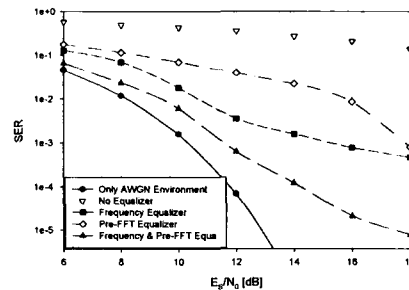


그림 8. two-ray 다중 경로 채널 환경에서 등화기를 채용한 OFDM/QPSK 오율 성능 II