

Rayleigh Fading 환경에서 LMS 기반 적응형 등화를 이용한 M-QAM/OFDM 시스템의 성능 분석

오영우*, 김동민*, 최우열*

*조선대학교 컴퓨터공학과

snlyoungwoo@gmail.com, ydjs34@gmail.com, wyc@chosun.ac.kr

I. 서론

최근 5G 기술의 기반이 되는 직교 주파수 분할 다중화 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 시스템의 효율 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, OFDM 방식은 inphase-quadrature(I/Q) 불균형 성분으로 인해 부반송파의 직교성을 유지하기 어려우므로, 시스템의 성능이 저하된다는 문제점을 가지고 있다 [1]. 또한, fading 환경에서의 OFDM은 symbol 사이에 지연 확산보다 긴 guard interval을 삽입함으로써 부호 간 간섭(Inter-symbol interference, ISI)을 제거할 수 있으나, 지연 정도에 따라 ISI를 모두 제거할 수 없으므로 이를 효과적으로 제거하기 위한 등화 사용이 요구된다 [2]. 따라서, 본 논문에서는 Rayleigh fading 환경에서의 최소 평균 제곱 (Least mean squares, LMS) 기반 적응형 등화를 적용한 OFDM 시스템을 구현하고, 성능을 평가 및 분석한다.

II. 본론

1. M-QAM/OFDM 설계 및 구현

그림 1은 본 연구에 활용되는 M-QAM/OFDM 시스템 모델을 나타낸다. 입력된 비트들은 encoding/interleaving 과정을 통해 부호화된 후 symbol 단위로 변조된다. N개의 symbol을 병렬화하여 하나의 OFDM symbol을 구성한 뒤, inverse fast fourier transform(IFFT) 연산을 거쳐 시간 축으로 변환된다. 그리고 cyclic prefix(CP)가 삽입되어 Rayleigh fading 채널로 전송된다. 수신된 신호를 효과적으로 보상하기 위해 최소 제곱 (Least square, LS) 기반의 채널 추정과 [3]에서 활용된 LMS 기반의 적응형 등화를 수행하며, 변조 과정의 역순으로 수신된 신호를 복조한다. 최종적으로 수신된 신호는 constellation diagram과 error vector magnitude(EVM) 등과 같은 지표를 통해 평가된다.

2. LS 채널 추정 기법

본 연구에서는 OFDM 시스템에서 pilot을 삽입하는 채널 추정 방법 중 일반적으로 사용되는 LS 기법을 활용하며, 다중 반송파를 사용하여 병렬로 신호를 전송하는 OFDM 방식을 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_p(k) = T_p(k)H_p(k) + N_p(k) \quad (1)$$

$T_p(k)$, $R_p(k)$ 는 각각 전송 신호와 수신 신호를 의미하고, $N_p(k)$ 는 잡음, $H_p(k)$ 는 채널 주파수 도메인 응답을 의미한다. 이때,

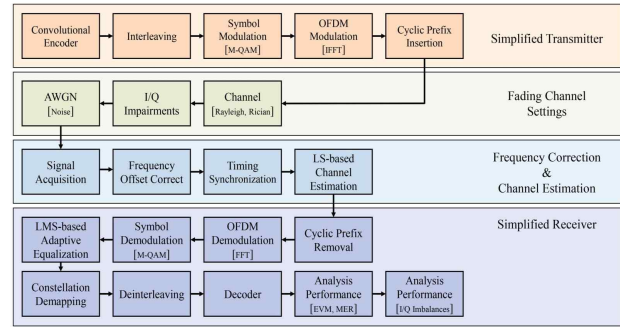


그림 1. M-QAM/OFDM 시스템 블록 다이어그램

LS 채널 추정 방식을 수식 (1)에 적용하면 채널 추정값은 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{H}_p(k) = R_p(k)/T_p(k) \quad (2)$$

위의 수식을 통해, 입력에 대한 출력값의 비율을 활용함으로써 비교적 낮은 복잡도를 지닌 오차 값 추정이 가능하다.

3. LMS 기반의 적응형 등화

본 논문에서는 I/Q 불균형과 symbol 간 간섭 제거를 위해 [3]에서 활용한 LMS 기반의 적응형 등화 알고리즘을 적용하여, Rayleigh fading 환경 간 발생하는 여러 방해 요인을 제거하고 왜곡된 신호를 효과적으로 보상하는 적응형 등화기를 설계 및 구현한다.

LMS 기반 적응형 등화 알고리즘은 수식 (3)-(5)와 같은 절차를 통해 수행되며, 수식에 사용된 S 는 스텝 크기, $I(n)$ 은 입력 신호, $W(n)$ 은 가중치 벡터, $F(n)$ 은 필터의 출력값, $E(n)$ 은 추정된 오류, 이상적 응답을 $R(n)$ 으로 정의한다. [3]에 따르면 필터 출력은 벡터 전치와 입력 벡터의 행렬 곱과 동치 관계가 성립하므로 아래 수식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(n) = W^T(n)I(n) \quad (3)$$

이후, 이상적인 응답과 필터의 출력 오차를 기반으로 평균 제곱 오차를 점진적으로 줄이는 작업을 수식 (4)와 같이 정의하고, 수식(5)과 같은 필터 계수 업데이트 과정을 통해, 수신된 s symbol 간 오차 값을 최소화할 수 있다 [3].

$$E(n) = R(n) - F(n) \quad (4)$$

$$W(n+1) = W(n) + 2SE^*(n)I(n) \quad (5)$$

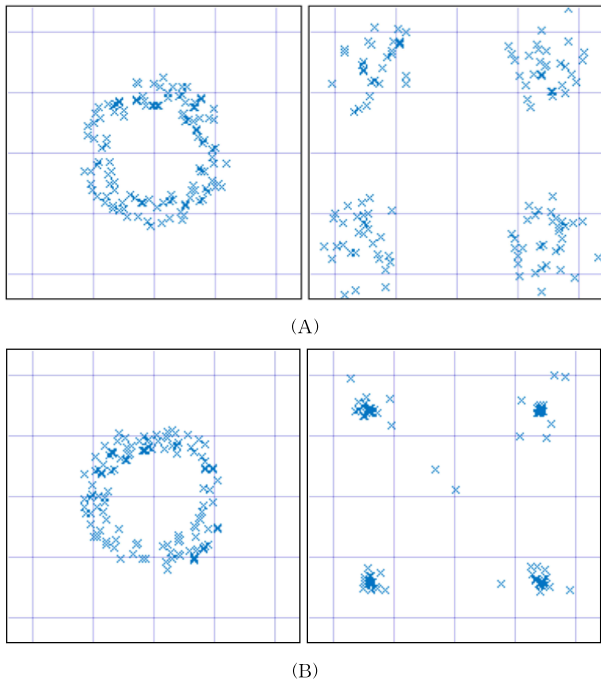


그림 2. LS 채널 추정과 LMS 적응형 등화에 따른 수신 신호 비교
(A) LS 채널 추정, (B) LMS 적응형 등화

4. 시뮬레이션 결과 분석

본 연구는 LabVIEW Communications 개발 환경을 이용하여, Rayleigh fading channel에서의 LMS 기반 적응형 등화를 적용한 M-QAM/OFDM 시스템을 구현하고 I/Q 불균형 및 symbol 간 간섭 제거의 성능을 비교·분석한다. 시뮬레이션 결과에 앞서, 연구에 사용된 채널 모델은 Rayleigh fading 환경으로, 각 채널 탭은 Gans 모델을 이용하여 설계하였다. 1개의 OFDM symbol을 구성하는 부반송파의 개수는 255, IFFT/FFT의 크기는 256으로 설정하였으며, symbol에 할당되는 송·수신 신호는 M-ary 체계의 QAM 변·복조 방식으로 처리하였다.

그림 2는 I/Q 불균형 및 왜곡을 보상하기 위해 LS 채널 추정 기법이 적용된 수신 신호, 그리고 LMS 기반 적응형 등화를 통해 보상된 신호를 나타낸다. LS 채널 추정 기법의 경우 I/Q 불균형 요소를 일정 수준 제거하였지만, symbol이 기존 위치에서 벗어나 발생하는 symbol scattering이 나타난다. 반면, LMS 기반 적응형 등화기가 적용된 수신 신호는 I/Q 불균형 요소와 ISI 제거에 큰 효과를 보임과 동시에 symbol 군집이 잘 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 3은 LMS 기반의 적응형 등화 적용 여부에 따른 OFDM 시스템의 오차 벡터 크기 성능을 보여준다. 이때, EVM(%)은 위상 노이즈 및 비선형 오류 등을 포함한 실제 전송된 신호와 이상적인 기준 신호 사이의 차이를 나타내며, 디지털 변조 및 신호의 품질을 측정할 수 있는 지표로 활용된다. 수신된 symbol과 이상적인 symbol 간 비교를 통해 점진적으로 오차 값을 줄여나가는 LMS 적응형 등화 방식은 LS 채널 추정 기법 대비 평균 143.9%의 오차 벡터 크기의 감소세를 보였으며, 신호 품질이 비교적 떨어지는 E_b/N_0 구간에서도 약 109%~209%의 향상된 성능을 확인하였다.

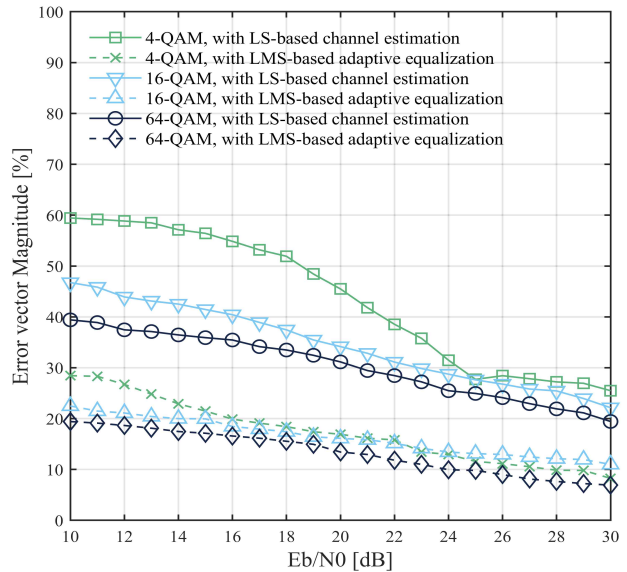


그림 3. Rayleigh fading channel에서 적응형 등화 적용 유무에 따른 OFDM 시스템의 오차 벡터 크기 성능 분석 결과

III. 결론

본 논문에서는 Rayleigh fading 채널에서 발생하는 I/Q 불균형 및 부호 간 간섭을 최소화하기 위한 연구를 수행하였다. 실험 결과를 통해, LMS 기반 적응형 등화가 적용된 M-QAM/OFDM 시스템은 성능저하에 영향을 주는 I/Q 불균형 및 부호 간 간섭 제거에 탁월한 효과를 보였으며, 오차 벡터 크기와 같은 신호 품질 측면에서도 향상된 성능을 보임을 확인하였다. 추후 후속 연구에서는 SDR 기반의 NI-USRP와 LabVIEW Communications를 활용하여 테스트베드를 구성하고, 실제 무선 감쇠 환경에서의 MIMO-OFDM 시스템을 구현하여 성능을 비교 및 분석하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학지원사업의 연구결과로 수행되었음. (2017-0-00137)

참 고 문 헌

- [1] Y. Ravalika and G. Swetha, "Implementation of Non-Linear Adaptive Equalizer for MIMO-OFDM in Wireless Communication", in *Proc. ICECA*, pp. 532-537, Coimbatore, India, Nov. 2020.
- [2] Z. Sarah and A. Noura, "Analysis of cyclic prefix length effect on ISI limitation in OFDM system over a Rayleigh-fading multipath", *Electrical and Computer Engineering J.*, vol. 11, No. 4, pp. 3114-3122, Aug. 2021.
- [3] 오영우, 최우열, "심볼 간 간섭 보상을 위한 적응형 등화기 및 TDMA 기반 다중 홉 릴레이 네트워크 설계 및 구현", *한국통신학회 논문지(J-KICS)*, vol. 46, no. 6, pp. 974-982, 2021년 6월.