

논문 2011-48TC-11-2

고속 이동 환경 하에서의 직교주파수분할다중화 및 주파수 영역 등화기를 사용한 단일반송파 시스템의 성능 평가

(Performance Comparison of Orthogonal Frequency Division Multiplexing and Single Carrier Transmission with Frequency Domain Equalizer in High Speed Mobile Environment)

서 강 운*, 윤 석 현**, 김 백 현***, 김 용 규***

(Kangwoon Seo, Seokhyun Yoon, Baekhyun KIM, and Yongkyu KIM)

요 약

ICT(Information & Communication Technology)기반의 차상제어시스템을 구축하기 위해서는 열차와 지상간의 통신 규격 정립이 필요하다. 본 논문은 이를 위한 선행 작업으로서 다중경로전송에서 발생할 수 있는 ISI(Inter Symbol Interference)문제를 해결하기 위한 기법들을 평가하고 OFDM이 최선의 선택이 될 수 있음을 보인다. ISI를 해결하기 위해서는 Single carrier 시스템을 사용시에는 등화기가 필요하고, 다른 기법으로는 OFDM 기법이 있는데, Single carrier를 사용하고 등화기를 사용할 경우 OFDM 대비 PAPR이 낮은 장점이 있으나 빔포밍, MIMO 공간다중화등의 다중안테나 전송이 어렵고, 높은 변조지수의 변조를 사용할 경우 BER적 측면에서 손해가 발생하게 된다. PAPR 관점에서 생각해 보면 차량과 지상의 통신에 있어서 중계기의 크기가 커도 문제가 되지 않으므로 OFDM의 PAPR문제가 크게 고려해야 할 사항이 아닐 것으로 판단된다.

Abstract

We need to establish standard for the ICT based on train control system. In order to solve the ISI problem, this paper evaluate the performance of OFDM and FDE system. We seem that OFDM system is better than FDE system. In order to solve ISI problem, SC System is needed a equalizer. And another method is OFDM System. If system is used SC with a equalizer, It is better than OFDM in terms of PAPR, but this system is not easy to use Multi-Antenna technique, i.e., beam-forming and MIMO-multiplexing. And If system is used high-order modulation, BER performance is worse than OFDM. If we think about in terms of PAPR problem, considerations are considered not significant because the size of relays is not considered in the communication between trains and ground.

Keywords : Single carrier, 등화기, OFDM, FDE

I. 서 론

ICT(Information & Communication Technology)기

* 학생회원, 단국대학교, ** 정회원, 단국대학교
(Dankook University)

*** 정회원, 한국철도기술연구원
(Korea Railroad Research Institute)

※ 본 논문은 철도기술연구원의 지원으로 수행되었음
(지원기간 2011.3~11월)

접수일자: 2011년8월30일, 수정완료일: 2011년11월14일

반의 차상제어시스템을 구축하기 위해서는 열차와 지상간의 통신 규격 정립이 필요하다. 본 논문은 이를 위한 선행 작업으로서 열차와 지상의 통신에 적합한 시스템을 고려하고자 한다. 열차의 경우 최대 300km/h의 속도로 철로 위를 이동하며, 유선통신환경을 구축할 수 없기에 열차와 지상은 무선통신을 사용할 수밖에 없는데, 무선통신환경에서 문제시되는 것 중 하나는 다중경로전파 전송으로 인한 ISI효과가 있다. 일반적으로 이를 해결하기 위해서 두가지 기법을 사용한다. 첫 번째로 Single carrier system을 사용하되, 수신단에서 등화기

를 사용하는 기법이고, 다른 하나는 OFDM system을 사용하는 것이다. 현재 Single carrier system의 경우 WLAN 802.11ad 및 WPAN (WiGig)규격에서 중점적으로 고려되고 있으며, OFDM 대비 PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 낮고, 이로 인해 전력효율이 낮은 RF증폭기를 사용할 수 있어 송신단의 비용이 적다는 장점이 있다. 하지만 빔포밍^[1], MIMO 공간다중화^{[2][3]} 등의 다중안테나 전송이 어렵고 무선환경에서 발생하는 ISI효과를 보상해 주기 위하여 수신단에서 등화기를 사용해야 한다는 단점이 존재한다. OFDM system의 경우 동일한 전송전력 환경 하에서 Single carrier system보다 좀더 좋은 성능을 갖으며 Single carrier system 대비 주파수 다이버시티 이득을 크게 얻을 수 있다. 또한 빔포밍, MIMO 공간다중화 등 다중안테나 전송에 용이하다. 하지만 PAPR이 높아 높은 효율의 전력증폭기가 필요한 단점이 존재한다.

본 논문에서는 두 시스템을 차상제어 시스템 환경에 적용하여 본 후 둘 중 어느 시스템이 더 적합한지 판별하여 보고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 차상제어시스템을 위한 통신환경에 대하여 기술하였고, III장에서는 모의실험환경 및 그 결과에 대하여 논하였으며, 마지막 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

1. 차상제어시스템의 전송 환경

본 논문에서 타겟으로 잡은 것은 열차와 지상의 통신 시스템의 구성이다. 이를 위하여 우선 열차와 지상의 전송 환경부터 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 열차는 최대 300km/h의 속도로 철로 위를 달린다. 그렇기에 설계하고자 하는 통신시스템은 이동성을 지원해 주어야만 한다. 주파수의 경우 차상제어시스템을 위하여 별도로 할당된 부분이 없기에 공용 주파수를 사용할 수밖에 없



그림 1. WLAN 전송 프레임 구조
Fig. 1. WLAN Frame Structure.

다. 이로 인해 사용해야 하는 주파수는 2.4GHz 대역이나 5GHz대역을 사용할 수밖에 없다. 2.4GHz 대역의 주파수를 사용하고60km/h의 속도로 이동할 때 최대 도플러 주파수는 139Hz가 되게 된다. 최고속도 300km/h의 환경에서는 795Hz까지 되게 된다. 결국 높은 도플러 주파수를 보상해 주기 위한 채널 추정 알고리즘이 필요하게 된다. 본 논문에서는 차상제어시스템을 위한 통신 규격으로서 IEEE802.11a의 무선랜 환경을 기반으로 열차와 같은 고속 이동체에 데이터 서비스를 지원하기 위해 추가적인 설계요소들을 추가하여 수신단의 이동성을 지원해 주는 방식으로 설계 하고자 한다. 일례로 IEEE802.11p의 경우 근거리 무선통신을 지원하는 IEEE802.11a/ RA(Road Access) 기술을 기반으로 하여 차량이 고속으로 이동하는 환경에서 차량간 멀티미디어 서비스를 제공하는 것이 목표이다. 또한 채널 환경이 무선 환경이기 때문에 발생하는 ISI(Inter Symbol Interference)를 해결해 주어야만 한다. ISI문제를 해결하기 위하여 Single carrier 시스템을 사용하면서 수신기에 등화기를 추가하는 방법과 OFDM system을 사용하는 기법이 있다.

IEEE WLAN에서 사용하는 물리계층의 전송 frame 구조는 그림 1.과 같다. 앞의 네 개의 block은 Preamble 단으로 각각 한 개의 OFDM 심볼로 구성된 short preamble, 2개의 OFDM 심볼로 구성된 long preamble, 그리고 한 개의 OFDM 심볼로 구성된 signaling block 이 있다. 그 이후에는 N개 block만큼의 데이터가 전송 되게 된다.

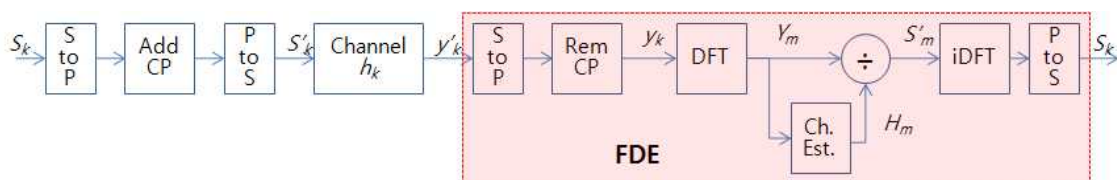


그림 2. SC-FDE의 구조
Fig. 2. SC-FDE Structure.

2. Single carrier system

Single Carrier system은 빠른 주기의 신호를 전송하는 기법이다. 하지만 무선 환경 채널에서는 ISI효과로 인해 신호의 distortion이 발생하게 된다. 이를 보상하여 주기 위하여 등화기를 사용한다. 널리 알려진 등화기로서 필터를 이용함으로써 등화 이후에 나오는 에러를 최소화 해주도록 필터계수를 계산하는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 등화기^[4] 주파수 도메인에서 채널 효과를 보상하여 주는 FDE(Frequency Domain Equalizer)^[5], 한번 등화한 후의 값을 확인하여 결과값을 feedback 후 재 등화하는 기법인 DFE(Dicision Feedback Equalizer)^[6]등이 있다. MMSE 등화기법의 경우 필터를 이용하게 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있지만 채널이 deep-null에 빠졌을 경우 제대로 보상해주지 못한다는 단점이 존재한다. DFE 경우 등화를 수행한 이후 등화된 결과를 이용하여 반복하여 다시 등화를 수행하는 기법을 이용하여 성능을 높이는 방법이다. BER적 측면에서 성능이 우수한 장점이 있으나 복잡도가 증가하게 되는 단점이 있다. 본 논문에서는 복잡도가 비교적 간단하면서 성능이 우수한 FDE를 사용하고자 한다.

무선채널의 경우 수신신호 y_k 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k = h_k * s_k + n_k \tag{1}$$

여기서 h_k 는 전송 채널을 discrete로 표현한 것으로 k 번째로 수신된 신호의 채널 gain을 의미한다. s_k 는 전송신호를 의미하고, n_k 는 수신단에서 타는 noise 값이다. FDE의 구조는 그림 2.과 같이 표현할 수 있다. 송신단에서는 CP를 추가한 후에 전송하게 된다. 수신단에서는 송신단에서 제거하여 주었던 CP를 제거하고, DFT과정을 거친 후에 주파수도메인으로 옮겨서 수신된 신호 Y_M 을 추정된 채널 값 H_M 으로 나눠주게 된다. 수식 (2)부터 수식 (4) 까지는 FDE기법을 보여준다. 우선 신호 y_k 를 받은 후 송신단에서 추가하였던 CP를 제거하여 주게 된다. 이후 DFT과정을 통해 y_k 를 주파수도메인으로 옮기게 되면 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y_m = H_m \cdot S_m + N_m \tag{2}$$

수식 (2)에서 Y_m 은 y_k 를 DFT취한 값이고, 마찬가지로

표 1. FDE 설계 파라미터

Table 1. FDE parameter.

Band Width	10 MHz
RMS Delay Spread	0.3 us
Max Delay Spread	1.5 us
Roll Off factor	0.25
Symbol Rate	8 Msps
FFT Size	64
Guard Interval	16

지로 H_m, S_m, N_m 은 각각 h_k, s_k, n_k 를 DFT취한 값이다. 전송프레임의 첫 번째 블록은 채널을 추정하는데 이용되는 preamble을 전송하게 되는데, 이는 송-수신단 모두 알고 있는 신호이다. 식 (3)은 preamble을 이용하여 수신단에서 채널을 추정하는 기법을 보여준다.

$$H'_m = \frac{Y_m}{S_m} = \frac{H_m \cdot S_m + N_m}{S_m} \tag{3}$$

전송프레임의 첫 번째 블록의 알고 있는 신호 S_m 으로 수신 신호를 주파수 도메인에서 나눠주게 되면 전송 채널 H_m 을 추정할 수 있게 된다. 결국 식 (4)와 같이 추정된 H_m 을 이용하여 수신된 신호 Y_m 에서 S'_m 을 계산할 수 있다.

$$S'_m = \frac{Y_m}{H_m} = \frac{H_m \cdot S_m + N_m}{H_m} \tag{4}$$

FDE의 경우 복잡도가 그리 높지 않고, 채널이 deep null에 빠졌을 때도 보상할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 다루고자 하는 시스템은 10MHz의 대역폭과 최대 RMS delay가 0.3us정도 되는 시스템으로 IEEE802.11p시스템을 기본 토대로 하여 설계할 것이기 때문에 표 1.과 같이 FDE 시스템의 파라미터를 설계하였다. 전송단의 Raised Cosine Filter에서의 Roll off 값을 0.25로 하였기 때문에 실제 전송되는 심볼의 심볼레이트 R_G 는 8MHz로 하였고, Guard Interval은 CP의 길이가 16 심볼이기 때문에 2us가 된다. FDE의 FFT 사이즈는 IEEE802.11p와 같은 64로 하였다.

3. OFDM System

Single carrier system이 빠른 주기의 신호를 전송하는데 반해 OFDM^[7]기법의 경우 긴 주기의 신호 여러 개를 중첩하여 전송시키는 기법이다. OFDM 시스템의

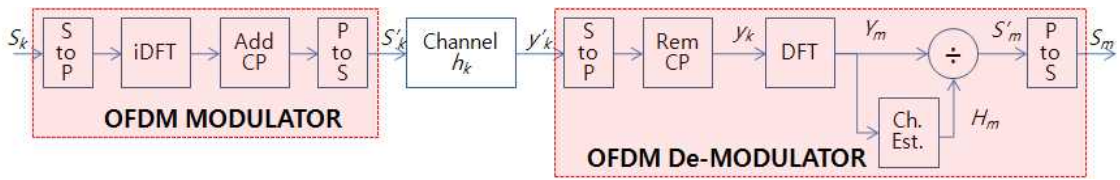


그림 3. OFDM 시스템 구조
Fig. 3. OFDM System Structure.

경우 빠른 주기의 송신 신호를 느린 주기의 복수개의 스트림으로 변환하여 주게 된다. 식 (5)는 빠른 주기의 송신신호를 느린 주기의 신호로 변환해주는 것을 보여 준다.

$$s_k = \sum_{m=0}^{N-1} S_m \cdot e^{j \frac{2\pi m}{N} k} \quad (5)$$

m번째 심볼 S_m 은 복소수 $e^{j \frac{2\pi m}{N} k}$ 에 의해 변조되고, 각 변조된 심볼의 주파수는 $\frac{2\pi m}{N}$ [rad]가 된다. 변조된 심볼 s_k 를 sub carrier라고 하는데, 각 sub carrier는 전체 대역폭을 균등하게 나누어 사용하게 된다. 결국 각 서브캐리어 사이는 대역폭/N이 되게 된다. 최종적으로 송신단에서는 CP를 붙여 전송하게 된다. 수신단에서는 신호를 받은 이후에 먼저 CP를 제거하여 준 후 신호를 주파수 도메인으로 옮기기 위해 DFT를 취하게 된다. 주파수 도메인에서 수신신호 y_m 은 식 (2)와 같이 표현할 수 있고, SC-FDE 기법과 같이 식 (3), 식 (4)과정을 통하여 채널에 대한 보상을 하여 주게 된다.

Single Carrier system의 경우 무선채널 환경의 영향으로 신호의 스펙트럼이 왜곡되는데 이를 보상하여 주기 위하여 등화기를 사용하였다. 하지만 OFDM의 경우 무선채널의 영향은 같게 받으나 각각의 전송스트림을 보면 단지 수신파워가 서로 다르게 들어오는 것처럼 보일 뿐 추가적인 등화를 할 필요가 없게 된다.

OFDM은 FDM과 유사하나, 각 스트림간 간섭이 발생하지 않게 하기 위하여 Guard band를 두는 FDM과는 달리, OFDM의 경우 Sinc 함수가 주기의 정수배에서는 값이 0이라는 점을 이용하여 신호의 주기를 맞춰 각 송신신호들의 타이밍에 다른 신호들은 0이 되도록 하였다. 이로 인해 Guard band가 필요하지 않아 FDM에 비해 주파수 효율성이 우수하다. OFDM은 전체 주파수 대역을 N개로 나눈 후 N개의 band를 각 sub-carrier들이 사용하게 된다. 그림 3.은 OFDM

표 2. OFDM 설계 파라미터
Table 2. OFDM parameter.

RMS delay spread	0.3 us
Band width	10 MHz
Guard interval	1.6 us
T_{FFT}	6.4 us
FFT size	64
Sampling rate	10Msps
Sub-carrier spacing	156.25 kHz
#of useful sub-carrier	52 (4 pilot)
Occupying BW	8.125 MHz

system의 구조를 보여준다. OFDM 시스템의 구조는 SC-FDE와 흡사하나, FDE와는 달리 DFT 블록이 송신기에 들어와 있으며, 수신기에서는 한번의 DFT연산만 취하면 된다는 이점이 있다.

IEEE802.11p가 대상으로 하는 대역폭이 10MHz이기 때문에 본 논문에서 설계코자 하는 시스템과 거의 유사할 것이라고 본다. 표 2.는 IEEE802.11p에서 사용하는 OFDM 파라미터를 보여준다. 대역폭이 10MHz이고 RMS delay spread가 0.3us 이기 때문에 CP의 길이는 1.5 us 이상 되어야 하므로 16 심볼로 하였고 송수신단의 FFT 크기는 64로 하였다. 64개의 심볼 중 52개의 심볼만 데이터를 실고 나머지 12개의 심볼은 null 심볼로 설정되어 있다. 각 심볼마다 156.25 kHz를 차지하고, 사용되는 심볼 수가 52개이기 때문에 차지하는 대역폭은 8.125MHz가 된다.

III. 모의실험

1. 모의실험 환경

기본적으로 차상제어시스템에 적합한 환경을 구축하기 위하여 통신이 이루어지는 환경 및 구조를 규정할 필요가 있다. 열차는 고정된 철로를 이동하므로 철로 주변에 주기적으로 중계기를 설치하면 효과적으로 열차와 지상 간에 통신이 가능하게 된다. 이 때 coverage

표 3. 모의실험에 사용된 채널 환경
Table 3. Channel environment used in the simulation.

Path	Delay [us]	Gain [dB]
1	0	0
2	0.2	-2.5
3	0.4	-5
4	0.6	-7.5
5	0.8	-10
6	1.0	-12.5
7	1.2	-15
8	1.4	-17.5

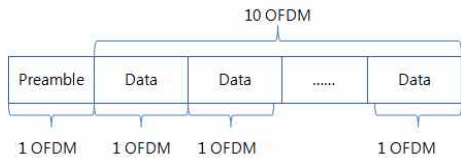


그림 4. 전송 프레임 구조
Fig. 4. Transmit Frame Structure.

와 열차의 이동속도에 따른 채널 환경 모델링 및 이에 따른 적절한 송-수신기 설계가 필요하다. 본 논문에서는 송수신기 구성 중 다중경로 전송에 대한 보상 성능을 다루므로 채널 환경의 경우 임의로 exponential 환경으로 가정하였고, RMS delay의 경우 약 0.3us로 두었다. 표 3은 가정한 무선 채널 환경을 보여준다. RMS delay가 0.3us이기 때문에, MAX Delay Spread는 그 다섯배인 1.5us정도가 되며 대역폭과 RMS Delay를 고려하면 IEEE802.11p의 OFDM 전송 파라미터를 그대로 사용할 수 있다. 2.4GHz대역의 주파수를 사용한다고 가정하였고, 이상적인 환경이라고 할 수 있는 속도 10km/h일 때의 BER 성능 및 속도 30km/h, 60km/h, 150km/h 일 때의 BER 성능을 비교하였다. 그림 4는 모의실험에서 사용한 전송프레임 구조를 보여준다. 전송 프레임은 총 11블럭으로 구성되며, 한 블럭의 길이는 하나의 OFDM 심볼로 이루어져 있으며, 64개의 데이터 심볼과 16개의 CP 심볼로 이루어져 있다. 첫 번째 블럭의 경우 Preamble로서 채널추정을 하는데 사용되

게 된다. 결국 한 프레임은 11 OFDM 심볼로 이루어져 있으므로 프레임의 길이는 5.632 ms가 된다.

그림 5는 모의실험에서 사용한 전체 송수신 시스템을 나타낸다. 채널 인코더로서 code rate $\frac{1}{2}$ 의 convolutional encoder를 사용하였고, random interleaver를 사용하였으며, interleaver depth는 한 frame 길이와 같게 설정하였다. symbol mapping은 QPSK와 16-QAM 두 가지 경우에 대하여 모의실험을 수행하였다.

2. 모의실험 결과

그림 6은 표 3의 채널환경에서 열차의 속도가 10km/h이고, 수신단에서 완벽하게 채널추정을 하였다고 가정할 때의 SC-FDE와 OFDM의 bit error rate(BER)성능을 보여준다. 중심 주파수가 2.4GHz이고, 10km/h의 속도를 가정하였기 때문에 최대 도플러 주파수는 22.2Hz이다. 최대 도플러 주파수가 22.2Hz이므로 coherence time은 약 45ms정도가 된다. 모의 실험에서 사용하는 전송 구조에서 수신기는 1 프레임마다 채널 추정을 하기 때문에 매 5.632ms 마다 512us 동안 채널 추정을 하게 된다. 그림 6의 결과를 보면 4-QAM 변조

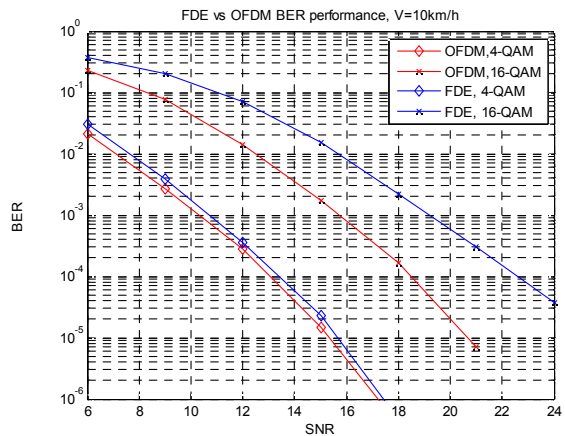


그림 6. 10km/h의 환경에서의 모의실험 결과
Fig. 6. Simulation result (velocity = 10km/h).

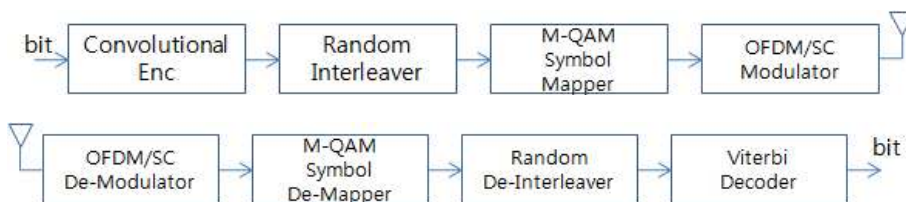


그림 5. 모의실험에서 사용한 통신 시스템
Fig. 5. The Whole Communication System.

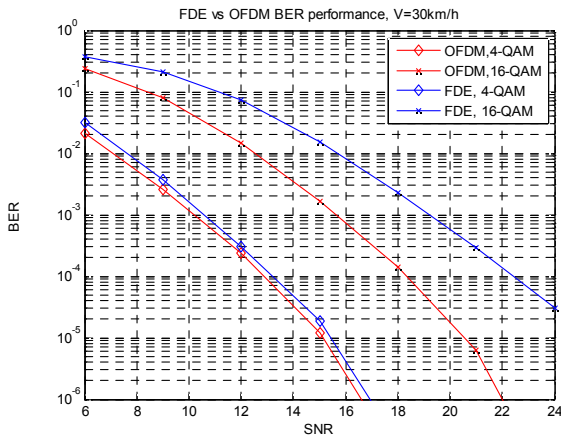


그림 7. 30km/h의 환경에서의 모의실험 결과
Fig. 7. Simulation result(velocity = 30km/h).

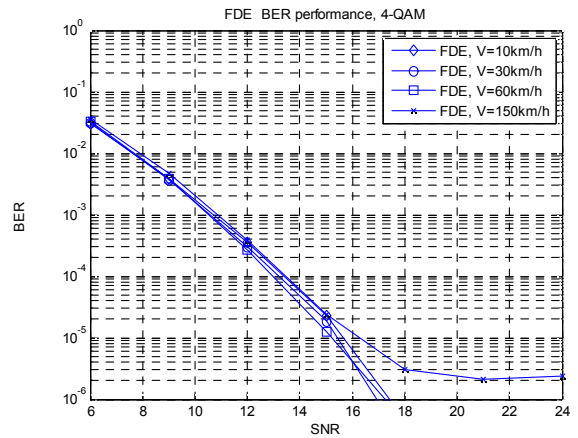


그림 9. 이동속도변화에 대한 FDE BER 성능(4-QAM)
Fig. 9. FDE BER Performance for various speed. (4QAM)

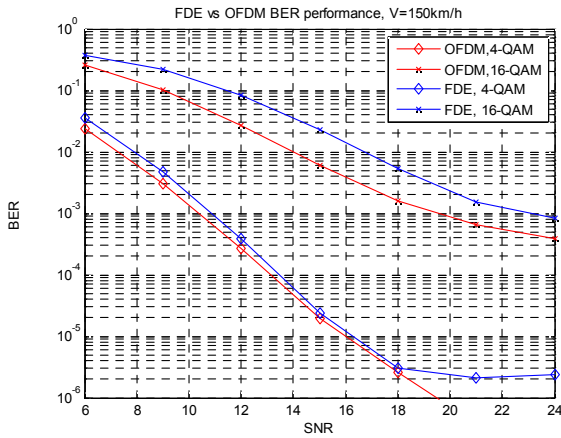


그림 8. 150km/h의 환경에서의 모의실험 결과
Fig. 8. Simulation result(velocity = 150km/h).

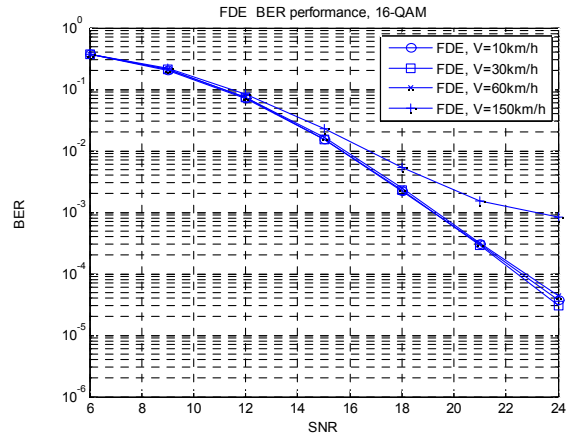


그림 10. 이동속도변화에 대한 FDE BER 성능(16QAM)
Fig. 10. FDE BER Performance for various speed. (16QAM)

를 사용하였을 때 OFDM 시스템은 13dB SNR에서 10^{-4} BER을 만족하나 FDE는 수신 SNR이 13.5dB 이상이 되어야만 10^{-4} BER을 얻게 된다. 16-QAM의 경우 OFDM 시스템은 18.5dB SNR에서 10^{-4} BER을 만족하지만 FDE 시스템은 22.5dB SNR에서 10^{-4} BER을 만족시키는 것으로 보여 4-QAM 변조를 사용하였을 때보다 BER 성능 격차가 더 나는 것을 볼 수 있다.

그림 7.은 수신기의 이동속도가 30km/h일때의 BER 성능을 보여준다. 속도가 30km/h이므로 최대 도플러 주파수는 수신기의 이동속도가 10km/h일때의 세배인 66.6H 가 되게 되고, coherence time은 약 15ms 정도가 되게 된다. 시스템이 5.632ms 마다 채널 추정을 행하기 때문에 수신기의 속도가 올라갔음에도 채널 추정에는 문제가 없고, 결국 수신기의속도가 10km/h일때와 거의 같은 BER 성능을 내게 된다.

그림 8.은 수신기의 속도가 150km/h일 때의 BER 성능을 보여준다. 수신기의 이동속도가 150km/h 이므로 최대 도플러 주파수는 333.3Hz가 되게 되고, coherence time은 약 3ms 정도가 된다. 시스템이 5.632ms 마다 채널추정을 실시하는데, coherence time이 이 시간보다 짧아 결국 한 프레임 내에서 채널이 변하여 성능열화가 발생하는 것을 볼 수 있다.

그림 9와 10은 각각 FDE 시스템에서 4-QAM, 16-QAM 변조를 사용하였을 때 속도에 따른 BER 성능 열화 정도를 보여 준다. 4-QAM 변조일 때, 속도가 60km/h 이하일때는 한 프레임이 전송되는 동안 채널이 변하지 않아 10^{-6} BER을 얻기 위해서는 약 17dB SNR 이 필요하지만 속도가 150km/h일 때는 프레임 주기보다 coherence time이 짧아 성능열화가 발생하여 10^{-6}

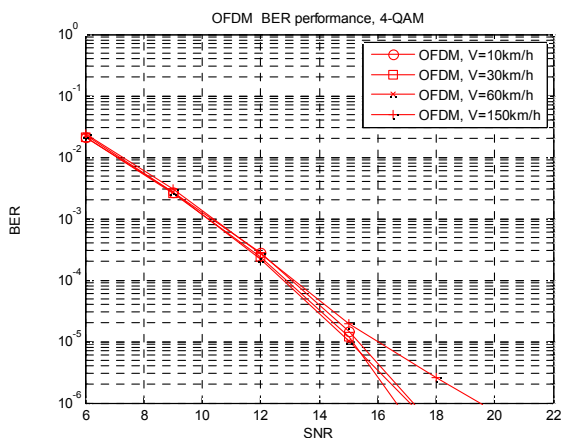


그림 11. 속도에 변화에 대한 OFDM BER 성능(4QAM)
 Fig. 11. OFDM BER Performance for various speed. (4QAM)

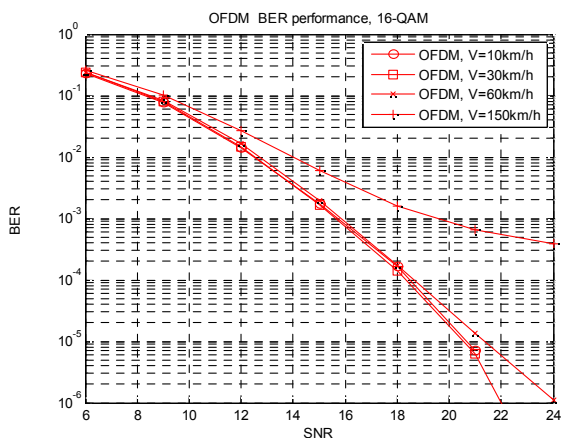


그림 12. 속도에 변화에 대한 OFDM BER 성능(16QAM)
 Fig. 12. OFDM BER Performance for various speed. (16QAM)

BER을 얻기 힘든 것을 볼 수 있다. 이는 16-QAM 변조일 때 더 확연히 드러난다.

그림 11과 12는 OFDM 시스템에서 4-QAM, 16-QAM 변조를 사용했을 때의 속도에 따른 BER 성능 열화 정도를 보여준다. OFDM 시스템과 FDE 시스템의 전송 프레임 구조가 동일하기 때문에 FDE 시스템과 동일하게 150km/h 일 때 성능열화가 발생하는 것을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 ICT 기반 차상제어시스템 구축을 위한 선행 작업으로서 무선 채널 환경에서 발생할 수 있는 ISI현상을 보상하기 위한 기법들에 대하여 평가하였

다. SC-FDE 기법의 경우 다른 선형 등화기에 비하여 복잡도가 적당하면서 좋은 성능을 내는 반면 OFDM 시스템의 경우 PAPR의 문제가 있지만 복잡도는 FDE와 흡사하고 BER 성능 면에서는 FDE보다 우수함을 보였다. 특히 변조 지수가 높은 시스템에서는 FDE 와 OFDM시스템의 성능차이가 확연히 보임을 증명하였다. 최근의 통신의 경우 통신 속도를 높이기 위하여 변조지수를 높여 사용하는데 FDE 시스템의 경우 성능 열화가 더 크기 때문에 시스템으로 채택하기에는 부적절함을 보였다. 열차와 지상간의 통신시스템에서 송-수신기의 크기는 크게 제약이 없기 때문에 PAPR문제는 크게 고려하지 않아도 될 사항으로 생각되며, 결국 SC-FDE 시스템보다는 OFDM 시스템이 좀 더 효율적이다.

열차의 속도가 150km/h이상일 때 BER 성능이 떨어지는 것으로 미루어 고속 이동 환경을 지원하기 위해서는 추가적인 채널추정 기법이나 좀 더 효율적인 전송 프레임 구조를 설계할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] LAL C. GODARA, "Application of antenna arrays to mobile communications. Part II: Beam-forming and direction-of-Arrival Considerations", Proc. IEEE 1997.
- [2] Q H. Spencer, A.L. Swindlehurst, M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 52, pp. 461-471, Feb 2004.
- [3] H. Bolcskei, D. Gesbert, "On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems", IEEE Trans. Communications, Vol. 50, pp. 225-234, Feb 2002.
- [4] P Mosen, "MMSE equalization of interference on fading diversity channel", IEEE Trans. Communication, Jan 1984.
- [5] D Falconer, SL Ariyavisitakul, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems", IEEE Trans. Communication, Apr 2002.
- [6] C.A Belfiore, Park J.H, "Decision Feedback equalization", IEEE , Aug 1979.
- [7] 조용수, 김재권, 양원영, "MIMO-OFDM 무선통신과 MATLAB", 홍릉과학출판사, p.157-202, 2008.

— 저 자 소 개 —



서 강 운(학생회원)
2010년 단국대학교 전자전기
공학부 학사.
2011년 현재 단국대학교
전자공학과 석사과정
<주관심분야 : 통신, MIMO, 다중
안테나>



윤 석 현(정회원)
1992년 성균관대학교 전자공학과
학사.
1996년 성균관대학교 전자공학과
석사.
2003년 New Jersey Inst. of Tech.
Electrical & Computer
Eng. 박사.

현재 단국대학교 전자전기공학부 부교수
<주관심분야 : 무선통신, MIMO, OFDM>



김 백 현(정회원)
1994년 인하대학교 전자공학과
학사졸업.
1996년 인하대학교 전자공학과
석사졸업.
2003년 인하대학교 전자공학과
박사 졸업.

2003년~현재 한국철도기술연구원 수요응답형
교통연구단 선임연구원
<주관심분야 : 통신, 신호처리, 제어>



김 용 규(정회원)
1987년 단국대학교 전자공학과 석
사졸업.
1993년 프랑스 Institute National
Polytechnique de Lorraine
제어공학 DEA 및 1997년
동대학원 Ph.D 졸업

1997년~현재 한국철도기술연구원 무선통신열차
제어연구단장
<주관심분야 : 통신, 신호처리, 제어>