JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 23, No. 8: 981~987, Aug. 2019

협대역 재머 대응과 파일럿 오버헤드 감소를 위한 새로운 SC-FDE 전송구조

주소영[1] · 최증원[2] · 김동현[2] · 정의림[3*]

A New SC-FDE Transmission Structure for Coping with Narrow Band Jammers and Reducing Pilot Overhead

So-Young Joo[1] · Jeung-Won Choi[2] · Dong-Hyun Kim[2] · Eui-Rim Jeong[3*]

[1]Graduate Student, Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158 Korea
[2]Senior Researcher, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186 Korea
[3*]Professor, Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158 Korea

요 약

본 논문에서는 파일럿으로 발생하는 파일럿 오버헤드를 감소시키면서 협대역 간섭신호 혹은 재머에 대응할 수 있는 새로운 SC-FDE (single carrier frequency domain equalization) 구조를 제안한다. 기존의 SC-FDE 구조는 협대역 재머가 존재할 때 시간영역 채널 추정이 어려워 수신기의 성능이 저하되는 단점이 있다. 또한 매 SC-FDE마다 채널추정을 위한 파일럿을 전송하여 스펙트럼 효율이 저하되는 문제도 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 제안된 구조는 시간영역 채널 추정 없이 곧바로 주파수 영역 채널 추정을 수행할 수 있도록 설계된다. 또한 파일럿 오버헤드를 감소시키기 위해서 두 개의 파일럿 사이에 여러 개의 SC-FDE 데이터 블록을 전송하고, 두 개의 파일럿을 이용한 선형 보간 채널 추정을 통해 각 데이터 블록에서의 채널 특성을 찾는다. 이렇게 구한 채널 추정값을 사용하여 주파수 영역 등화를 수행하면 협대역 재머가 있는 상황에서도 재머 제거와 함께 안정적인 등화가 가능하다. 제안하는 구조의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 확인한다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new SC-FDE (single carrier frequency domain equalization) structure to cope with narrow band interference signals or jammers and reduce pilot overhead. The conventional SC-FDE structure has a problem that the receiver performance degrades severely due to difficulty in time-domain channel estimation when narrow band jammers exist. In addition, the spectral efficiency is lowered by transmitting pilot at every SC-FDE block to estimate channel response. In order to overcome those problems, the proposed structure is devised to estimate frequency domain channel directly without time domain channel estimation. To reduce the pilot overhead, several data blocks are transmitted between two pilots. The channel estimate of each data block is found through linear interpolation of two channel estimates at two pilots. By performing frequency domain channel equalization using this channel estimate, the distortion by the channel is well compensated when narrow band jammers exist. The performance of the proposed structure is confirmed by computer simulation.

키워드 : 파일럿 오버헤드, 주파수 영역, 선형보간, 협대역 재머, 채널 추정

Keywords : pilot overhead, frequency domain, linear interpolation, narrow band jammer, channel estimation

Received 12 May 2019, **Revised** 27 May 2019, **Accepted** 17 June 2019

*** Corresponding Author** Eui-Rim Jeong (E-mail:erjeong@hanbat.ac.kr, Tel:+82-42-821-1752)
Professor, Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.8.981 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

다중경로 페이딩 환경에서 고속의 데이터를 전송하기 위해서는 수신기에서 채널 등화를 쉽게 수행할 수 있어야 한다. 이동통신 뿐만 아니라 군 전술통신 및 무인기와 지상국 간 통신에서도 채널 등화를 고려한 통신방식 설계가 이루어지고 있다. 이러한 점을 고려한 다양한 통신방식 중 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 SC-FDE(Single Carrier Frequency Domain Equalization)는 가장 널리 사용되고 있는 통신방식이다[1][2]. OFDM은 송신신호와 채널의 임펄스 응답의 순환 컨벌루션(convolution)이 되도록 하여 주파수 영역에서 간단한 등화기법으로 채널을 보상하는 방식이며 주파수를 분할하여 다중사용자 동시접속이 가능한 것이 장점이다[3]. 이러한 장점으로 OFDM은 IEEE802.11 무선 LAN과 같은 광대역 무선 통신시스템[4] 및 LTE 하향링크 전송 기술로 사용되고 있다. 그러나 OFDM은 높은 PAPR (Peak-to-average Ratio) 특성으로 인해 전력증폭기에 많은 부담을 주며 전력효율이 낮은 문제가 있다. 또한 반송파 주파수 오프셋으로 인한 ICI (Inter Channel Interference)가 발생하는 문제도 있다[5]. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방식 중 하나가 SC-FDE이다. SC-FDE는 OFDM과 비슷한 성능을 가지며 상대적으로 PAPR이 작고 다중 경로 페이딩 환경에서 역시 주파수 영역 등화가 가능하여 간단하게 채널왜곡을 보상할 수 있는 장점이 있다. 셀룰러 폰은 높은 전력효율이 중요하기 때문에 SC-FDE가 LTE 상향링크에 사용되고 있으며[6] 배터리로 동작하는 군 전술 무전기 및 군 드론 통신 등에도 적용이 되고 있다.

본 논문에서는 SC-FDE로 통신하는 군 통신환경에서 악의적인 전파 공격이 발생할 때 이에 대응할 수 있는 새로운 통신방식을 설계한다. 전파 공격이 존재하는 환경에서도 안정적으로 통신할 수 있는 능력은 군 통신에서 매우 중요하다. SC-FDE는 OFDM에 비해 단일 반송파를 사용하기 때문에 협대역 재머에 취약하다[7]. 제안하는 SC-FDE 구조는 2개의 파일럿 사이에 여러 개의 SC-FDE 데이터 블록을 전송한다. 이 구조는 매 SC-FDE 블록에 파일럿을 전송하는 기존 구조에 비해 파일럿 오버헤드를 상당히 줄일 수 있다. 시간영역 채널 추정은 재머에 매우 민감하기 때문에 제안하는 SC-FDE 구조는 재머가 존재하는 환경에서도 시간영역 채널 추정 없이 곧바로 주파수 영역 채널 추정을 수행할 수 있는 전송구조를 제안한다. 또한 주파수 영역에서 추정된 채널을 이용하여 선형 보간 채널 추정을 통해 파일럿 사이의 각 데이터 블록들에서의 채널 특성을 찾는다. 이 기술을 통해 파일럿 오버헤드를 줄이면서도 이동환경에서 채널 추정 성능 열화를 줄일 수 있다. 제안하는 방식의 성능 검증은 컴퓨터 모의실험을 통해 수행한다. 모의실험 결과에 따르면 제안하는 구조는 협대역 재머가 존재하는 환경에서 적은 파일럿 오버헤드로도 기존 방식보다 수신성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 기존의 SC-FDE 송수신 구조에 대해 설명하고 3장에서 협대역 재머에 대응하며 파일럿 오버헤드를 줄여 통신할 수 있는 새로운 SC-FDE 전송구조 및 수신 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 제안하는 SC-FDE 구조에 대한 모의실험 환경 및 결과를 보인다.

Ⅱ. 기존 SC-FDE 구조 및 파일럿 오버헤드와 재머 존재 시 발생 문제

2.1. 기존 SC-FDE 구조

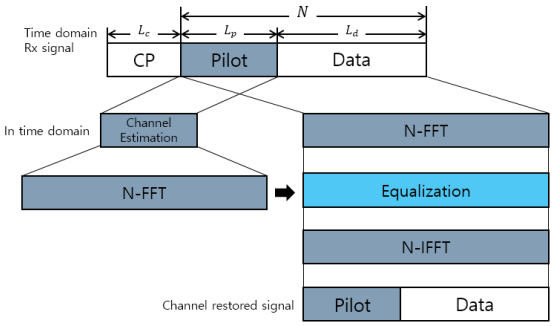

Fig. 1 Conventional SC-FDE structure

그림 1은 기존의 SC-FDE 전송 구조와 수신과정을 나타낸다. 하나의 SC-FDE 블록은 CP(Cyclic Prefix), 파일럿, 데이터로 구성되어 있다. SC-FDE는 단일반송파 전송 구조로 OFDM과 달리 송신기에 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 과정이 존재하지 않는다. CP의 길이는 L_c이며 데이터의 마지막 L_c개 심볼이다. 파일럿과 데이터의 길이는 각각 L_p, L_d 이다. 파일럿과 데이터 길이

의 합은 N ($N = L_p + L_d$) 이다. N은 수신기에서의 FFT (Fast Fourier Transform) 크기이다. 수신기에서는 파일럿을 이용하여 먼저 시간영역 채널추정을 수행한다. 추정된 채널의 임펄스 응답은 주파수 영역 채널 추정 및 등화에 사용한다. 채널을 통과하여 수신된 수신신호를 $y(n), n=0, ..., N-1$이라고 하고 채널의 임펄스 응답을 $h(n)$, 송신 파일럿 신호를 $s(n)$이라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(n) = \boldsymbol{s}^T(n)\boldsymbol{h} + z(n) \tag{1}$$

$\boldsymbol{h}$ 는 채널의 임펄스 응답 벡터이며 ($\boldsymbol{h} = [h(0), h(1), ..., h(L_h-1)]^T$), L_h는 채널의 임펄스 응답의 길이를 의미한다. $z(n)$는 가우시안 잡음을 나타내고 $\boldsymbol{s}(n)$는 송신 파일럿 벡터로 $\boldsymbol{s}(n) = [s(n), s(n-1), ..., s(n-L_h-1)]^T$이다. 주파수 영역 등화를 위해서는 주파수 영역 채널이 필요하나 이를 위해 먼저 시간영역 채널 추정을 수행한다. 시간영역 채널의 FFT를 통해 주파수 영역 채널을 찾을 수 있다. 시간영역 채널 추정은 최소자승 기법을 통해 수행한다.

$$\hat{\boldsymbol{h}} = (\boldsymbol{S}^H\boldsymbol{S})^{-1}\boldsymbol{S}^H\boldsymbol{y} \tag{2}$$

식 (2)에서 $\boldsymbol{S} = [\boldsymbol{s}(0), \boldsymbol{s}(1), ..., \boldsymbol{s}(L_p-1)]^T$이고 $\boldsymbol{y} = [y(0), y(1), ..., y(L_p-1)]^T$ 이다. 추정한 시간영역 채널 $\hat{\boldsymbol{h}}$의 N 포인트 FFT를 통해 주파수 영역 채널 $\hat{H}(k)$, $k=0,...,N-1$ 를 얻는다. 채널을 보상하는 등화는 낮은 SNR (Signal to Noise Ratio) 영역에서 성능을 향상하기 위해 MMSE (Minimum Mean Square Error) 등화를 수행한다. 등화 수식은 다음과 같다.

$$\hat{X}(k) = \frac{\hat{H}^*(k)}{|\hat{H}(k)|^2 + \sigma_z^2} Y(k),\ k=0, ..., N-1 \tag{3}$$

여기서 σ_z^2은 잡음의 분산, $Y(k)$는 주파수 영역 수신 신호이다. 등화가 수행된 $\hat{X}(k)$는 IFFT를 통해 시간영역 신호로 변환된다.

2.2. 협대역 재밍 환경에서 기존 방식의 문제점

군 작전 중에는 통신에 사용되고 있는 주파수가 적에게 노출될 수 있다. 적은 악의적인 목적으로 해당 주파수에 전파공격, 즉 재머공격을 가할 수 있다. SC-FDE 통신이 재머 공격을 받을 경우, 시간영역 신호의 낮은 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio) 때문에 시간영역 채널 추정이 제대로 수행될 수 없고 이에 따라 등화도 역시 제대로 수행될 수 없어 통신이 어려워진다.

또한 보편적인 SC-FDE 전송 구조에서는 이동환경에서 채널추정을 위해 매 SC-FDE 블록마다 파일럿을 삽입하며, 이 때문에 파일럿 오버헤드가 큰 문제도 있다. 파일럿 오버헤드는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{pilot overhead} = \frac{L_p}{L_p + L_d} \tag{4}$$

긴 파일럿이 사용되면 채널 추정 성능은 향상되겠지만 파일럿 오버헤드가 증가한다. 파일럿 오버헤드는 SC-FDE 전송 스펙트럼 효율을 감소시키므로 파일럿 오버헤드를 줄이면서도 채널 추정성능을 높일 수 있는 방법이 요구된다. 본 논문에서는 파일럿을 매 SC-FDE 블록에서 전송하는 대신 가끔 전송하고, 파일럿과 파일럿 전송 사이에 여러개의 SC-FDE 데이터 블록을 전송함으로써 파일럿 오버헤드를 감소시킬 수 있는 새로운 SC-FDE 구조를 제시하고 이에 따른 수신기에서의 채널추정 방안을 제안한다.

Ⅲ. 제안하는 SC-FDE 구조

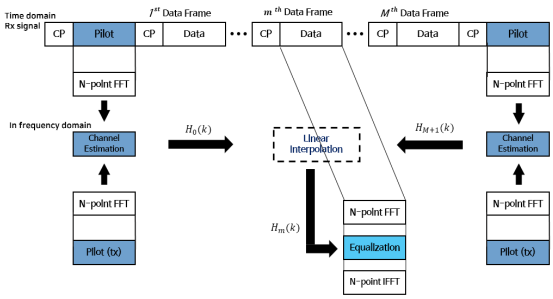

Fig. 2 Proposed SC-FDE structure

그림 2는 제안하는 SC-FDE 구조를 보인다. 제안하는 구조는 파일럿을 가끔 전송하며 파일럿과 파일럿 사이에 여러 SC-FDE 데이터 블록을 전송한다. 제안하는 구조는 재머가 있을 때에도 시간영역 채널 추정의 도움을

받지 않고 주파수 영역 채널추정을 곧바로 수행할 수 있도록 파일럿을 위한 CP가 삽입된다. 파일럿의 길이는 L_p라고 하고 CP의 길이는 L_{cp}라고 한다. 이로 인해 데이터 블록뿐만 아니라 채널 추정에서도 FFT를 통한 주파수 영역 채널 추정을 가능하게 한다. 데이터 블록은 길이 L_{cp}의 CP와 길이 N의 데이터로 이루어진다. 데이터 블록에는 파일럿이 포함되지 않으므로 제안하는 구조는 파일럿 전송 비율이 기존 구조보다 훨씬 낮다. 하지만 파일럿을 가끔 전송하면 이동환경에서 시변 채널을 정확하게 추정하는데 문제가 생길 수 있다. 하지만 이 문제를 선형 보간법으로 해결한다. 각 파일럿에서 채널 추정을 수행하고 파일럿과 파일럿 사이의 채널은 선형 보간법을 이용하여 추정한다. 선형 보간법이 완벽한 보간법이 아니므로 고속 무선 환경에서 추정성능이 저하될 수 있지만 시뮬레이션 결과에 따르면 100 km/h 이상의 이동속도에서도 채널추정 성능의 저하가 없었다.

채널 추정 과정을 자세히 설명하면 다음과 같다. 먼저 협대역 재머가 존재하는 환경에서 수신된 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(n) = \boldsymbol{s}^T(n)\boldsymbol{h} + I(n) + z(n) \tag{5}$$

여기서 $I(n)$은 협대역 재머를 나타낸다. 수신된 파일럿 신호에서 CP는 제거하고 FFT를 수행하여 주파수 영역 파일럿 신호를 구한다.

$$Y(k) = FFT\{y(L_{cp}), y(L_{cp}+1), ..., y(L_{cp}+L_p-1)\} \tag{6}$$

송신 파일럿의 주파수 영역 특성은 다음과 같이 구한다. 파일럿 패턴은 수신기에서도 알 수 있으므로 수신기에서도 주파수 특성을 구할 수 있다.

$$X(k) = FFT\{x(L_{cp}), y(L_{cp}+1), ..., y(L_{cp}+L_p-1)\} \tag{7}$$

주파수 채널 추정 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{H}(k) = Y(k)/X(k),\ k = 0, ..., N-1 \tag{8}$$

이렇게 두 파일럿 신호로부터 각각 주파수 영역 채널을 추정한다. 파일럿 사이의 데이터 블록에서 채널을 추정하기 위해 선형 보간을 이용하여 채널 추정을 수행한다. 즉, 두 파일럿 사이의 무선채널은 시간에 따라 선형으로 변한다고 가정한다. 두 개의 파일럿 사이에 M개의 데이터 블록이 있다고 가정하자. 데이터의 앞쪽 파일럿을 0번째 블록이라고 하고 뒤쪽 파일럿을 M+1번째 블록이라고 한다. m번째 ($1 \le m \le M$) 데이터 블록의 $(k+1)$ 번째 주파수 영역 채널 특성을 $\hat{H}_m(k)$ $(0 \le k \le N-1)$라고 표현한다. 첫 번째 파일럿과 두 번째 파일럿에서의 채널 추정 값은 각각 $\hat{H}_0(k)$와 $\hat{H}_{M+1}(k)$라고 표현한다. m번째 데이터 블록의 채널은 다음과 같이 선형보간법으로 구한다.

$$\hat{H}_m(k) = \left(\left|\hat{H}_0(k)\right| + \frac{m\left(\left|\hat{H}_{M+1}(k)\right| - \left|\hat{H}_0(k)\right|\right)}{M+1} \right) \exp\left\{ j\left(\angle \hat{H}_0(k) + \frac{m(\angle \hat{H}_{M+1}(k) - \angle \hat{H}_0(k))}{M+1} \right) \right\} \tag{9}$$

제안하는 구조의 파일럿 오버헤드는 다음과 같다.

$$\text{pilot overhead} = \frac{L_p}{L_p + MN} \tag{10}$$

제안하는 SC-FDE 전송구조는 기존구조보다 파일럿 오버헤드를 대략 $1/M$로 줄일 수 있다.

제안하는 SC-FDE 구조로 통신하는 경우 협대역 재머가 존재하면 상황을 고려하자. 특정 주파수에 협대역 재머가 존재하는 경우 해당 주파수에서 채널 추정 값은 큰 값이 관찰될 것이다. 왜냐하면 해당 주파수의 $Y(k)$에서 큰 값이 관찰될 것이기 때문이다. 이 경우 해당 $\hat{H}(k)$도 큰 값이 나타날 것이, 등화를 수행하기 위해 수신신호를 추정한 채널로 나누면 재머가 존재하는 주파수의 신호는 자연스럽게 크기가 줄어든다. 일반적으로 재머가 위치한 주파수를 알면 그 위치를 0으로 만드는 것이 가장 좋은 방법인데 제안하는 구조는 등화 과정에서 자연스럽게 0으로 만드는 널링효과가 발생한다. 따라서 제안하는 SC-FDE 구조는 재머의 주파수를 추정할 필요 없이 등화의 과정에서 재머의 영향이 줄어드는 효과가 나타난다. 재머의 존재유무를 따로 추정할 필요가 없는 것은 제안구조의 큰 장점이다.

Ⅳ. 모의실험 결과

4.1. 모의실험 환경

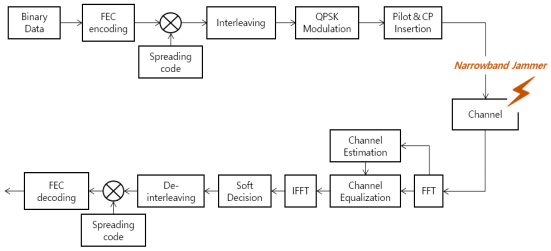

Fig. 3 Simulation block diagram

제안하는 SC-FDE 구조의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 검증하였다. 그림 3은 모의실험에 사용된 송신기와 수신기의 블록도를 나타낸다. 송신기는 이진 데이터를 생성하고 에러 정정을 위해 FEC(forward error correction) 인코딩을 수행한다. 그 다음 무선 채널 환경에서 발생하기 쉬운 군집에러를 방지하기 위해 데이터의 순서를 일정단위로 재배열 시키는 인터리빙(Interleaving)을 수행한다. 그 후 QPSK 변조를 수행하고 블록 간에 발생하는 간섭을 방지하고 주파수 영역 등화를 수행하기 위해 CP와 파일럿을 삽입하여 송신한다. 송신된 신호는 채널을 통과하여 수신되는데, 협대역 재머가 존재할 경우 송신신호에 협대역 재머가 더해져 수신된다. 수신기는 주파수 영역 채널 추정 및 등화를 수행하기 위해 수신신호의 두 개의 파일럿을 FFT 하여 주파수 영역 채널을 구한다. 그 후 채널 등화를 수행한다. 채널 보상된 신호는 IFFT가 수행되고 Soft decision, 디인터리빙, 역확산, FEC 디코딩을 순차적으로 진행하여 데이터를 복원한다.

Table. 1 Simulation environments

CP length	32
Pilot length L_p, FFT size N	512
Channel code	LDPC, R=1/2
Number of jammer	1
JSR	0 dB

표 1은 모의실험에 사용한 자세한 파라미터를 나타낸다. CP 길이는 심볼 (L_c=32), 파일럿 길이 및 FFT 크기는 512($L_p = N = 512$)이다. 채널코드는 코드율이 1/2인 LDPC(Low-density Parity-check)[8] 코드를 사용하였다. 협대역 재머가 존재하는 환경을 위해 1개의 협대역 재머를 고려하였으며 JSR(Jammer to Signal Ratio)은 0 dB로 고정하였다.

4.2. 모의실험 결과

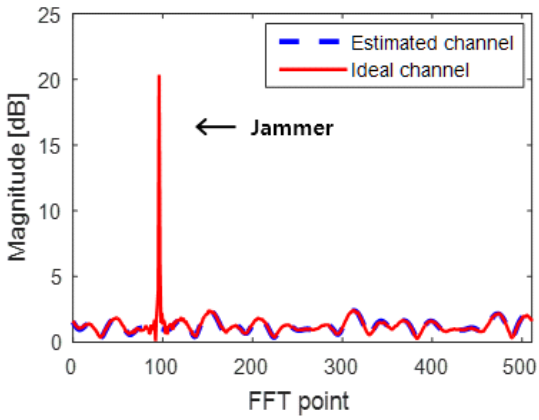

Fig. 4 Proposed SC-FDE estimaed channel and ideal channel in Frequency domain

그림 4는 주파수 영역에서 이상적인 채널과 협대역 재머가 존재할 때 추정된 채널을 나타낸다. 파란 점선은 추정된 채널을 나타내고 빨간 실선은 이상적인 채널을 나타낸다. 재머의 위치 및 크기를 포함하여 이상적인 채널과 추정 채널이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

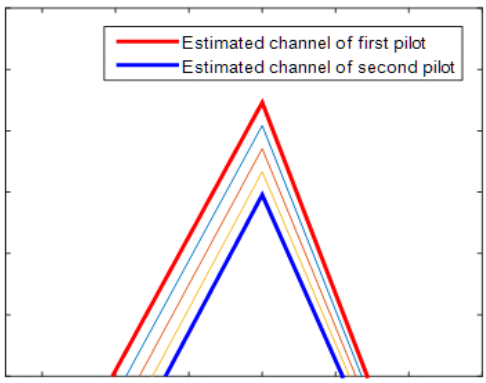

Fig. 5 Linear interpolation channel estimation in frequency domain

그림 5는 M=3 인 경우 추정된 채널, 즉 2개의 파일럿 사이에 3개의 데이터 블록이 존재하는 경우 각 주파수에서 채널 추정값을 보인다. 512 개의 FFT 포인트 중 편의를 위해 협대역 재머가 존재하는 주파수 범위만을 보이고 있다. 선형 보간법 때문에 두 파일럿의 채널 추정값을 이용하여 등간격으로 등분하여 데이터 블록의 채널을 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

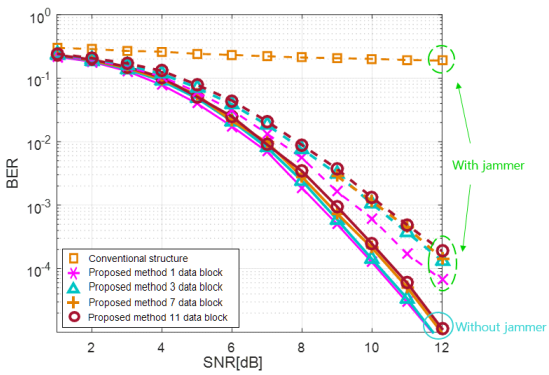

Fig. 6 BER simulation result

그림 6은 이동속도가 100[km/h] 일 때의 페이딩 환경에서 협대역 재머의 유무 및 데이터 블록의 수 M에 따른 BER(Bit Error Ratio) 성능을 보인다. 협대역 재머가 존재할 때 기존의 SC-FDE 구조의 성능도 같이 나타내었다. 페이딩 채널 모델은 7-path Rayleigh 모델이며 각 다중경로 별 전력은 [0.73, 0.031, 0.034, 0.051, 0.061, 0.042, 0.051] 이고, 다중 경로 지연은 [0, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0, 9.6] μs 이다. 모의실험 결과에 따르면 협대역 재머가 존재할 때 기존의 SC-FDE 구조의 성능이 크게 저하되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 제안하는 SC-FDE 구조는 협대역 재머가 존재할 때 기존의 구조보다 성능이 월등하게 향상됨을 보인다. 협대역 재머가 존재하지 않을 때보다 약 2 dB 정도 성능이 떨어지지만, 기존 구조는 거의 통신할 수 없음을 고려하면 상대적으로 우수한 성능을 보인다. 이와 같은 모의실험 결과는 제안된 SC-FDE 구조가 협대역 재머가 존재하는 경우에도 통신을 가능하게 할 뿐만 아니라 파일럿 오버헤드를 줄여 통신 신뢰성과 주파수 효율을 모두 높일 수 있음을 보인다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 새로운 SC-FDE 구조를 제안했다. 제안된 방법은 여러 데이터 블록 사이에 한번 씩 파일럿을 전송함으로써 파일럿 오버헤드를 줄일 수 있었다. 또한, 시간영역 채널 추정 없이 주파수 채널 추정을 수행할 수 있도록 프레임 구조를 제안하였으며, 선형 보간법을 이용하여 데이터 블록에서의 채널을 추정함으로써 협대역 재머 또는 간섭 신호가 존재하는 환경에서기존 구조보다 우수한 BER 성능을 보였다. 파일럿 오버헤드 역시 기존 방식보다 줄일 수 있었다. 따라서 제안하는 SC-FDE 구조는 군사 통신 시스템이나 무인 항공기와 같은 안전이 중요시되는 시스템에 적용될 수 있을 것이다.

References

[1] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems*, 1st edition, Boston, Artech House Publishers, 2004.

[2] F. Pancaldi, G. Vitetta, R. Kalbasi, N. Al-Dhahir, M. Uysal, and H. Mheidat, “Single-carrier frequency domain equalization,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, no. 5, pp. 37 - 56, Sep. 2008.

[3] Z. Wang and G. B. Giannakis, “Wireless multicarrier communications: where Fourier meets Shannon,” *IEEE Signal Process. Mag.* ,vol.17, no. 3, pp. 29 - 48, May 2000.

[4] R.Abdelrahman, A. Mustafa and A.Osman, “A Comparison between IEEE 802.11a, b, g, n and ac Standards,” *IOSR Journal of Computer Engineering*, vol. 17, no 5, pp. 26-29, Oct. 2015.

[5] G. Karam and H. Sari, “Analysis of predistortion, equalization, and ISI cancellation techniques in digital radio systems with nonlinear transmit amplifiers,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 12, pp. 1245 - 1253, Dec. 1989.

[6] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. AbuMahfouz, “A survey on 5G networks for the internet of things: Communication technologies and challenges,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619 - 3647, Dec. 2017.

[7] C. Shahriar, M. La Pan, M. Lichtman, T. C. Clancy, R. McGwier, R. Tandon, S. Sodagari and J. H. Reed, “PHY-Layer Resiliency in OFDM Communications: A Tutorial,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.17, no. 1, pp. 292-314, Mar. 2015.

[8] J. Li, K. Liu, S. Lin, and K. Abdel-Ghaffar, “Algebraic quasi-cyclic LDPC codes: Construction, low error-floor, large girth and a reducedcomplexity decoding scheme,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 8, pp. 2626 – 2637, Aug. 2014.

주소영(So-Young Joo)

한밭대학교 정보통신공학과 학사 (2017)
한밭대학교 정보통신공학과 석사 (2019)
※ 관심분야 : 디지털신호처리, 임베디드시스템

최증원(Jeung-Won Choi)

충남대학교 계산통계학과 학사 (1989)
충남대학교 계산통계학과(전산학) 석사 (1993)
충남대학교 전산학과 박사 (1997)
국방과학연구소 수석연구원 (현재)
과학기술연합대학원대학교 부교수 (현재)
※ 관심분야 : 전술통신, 위성통신, 인지무선통신, 바이오통신, 정보융합

김동현(Dong-Hyun Kim)

연세대학교 전기전자공학부 학사 (2009)
연세대학교 전기전자공학부 석사 (2011)
국방과학연구소 선임연구원 (현재)
※ 관심분야 : 전술통신, 영상전송시스템, 데이터링크

정의림(Eui-Rim Jeong)

한국과학기술원 전기및전자공학과 학사 (1995)
한국과학기술원 전기및전자공학과 석사 (1997)
한국과학기술원 전자전산학과 박사 (2001)
한밭대학교 정보통신공학과 교수 (현재)
※ 관심분야 : 통신신호처리, 통신시스템설계