JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 22, No. 5: 787~793, May 2018

협대역 간섭신호 대응을 위한 SC-FDE 전송 구조 설계

주소영[1] · 조성미[1] · 황찬호[2] · 정의림[1*]

Design of SC-FDE Transmission Structure to Cope with Narrow Band Interference

So-Young Joo[1] · Sung-Mi Jo[1] · Chan-Ho Hwang[2] · Eui-Rim Jeong[1*]

[1*]Department of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158 Korea
[2]Agency for Defense Development, Daejeon, 34186 Korea

요 약

본 논문은 협대역 간섭신호에 대응하기 위한 새로운 SC-FDE 구조를 제안한다. 기존의 SC-FDE구조는 협대역 간섭신호가 발생했을 시 채널 추정이 어려워지고, 그로 인해 데이터 복원이 어려운 상황이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 큰 전력의 협대역 간섭신호가 발생했을 때에도 주파수영역 채널추정이 가능한 새로운 SC-FDE 프레임 구조를 제안한다. 구체적으로 기존방식은 시간영역 채널추정을 먼저 수행한 후 푸리에변환을 통해 주파수 영역 채널을 추정하지만 본 논문은 곧바로 수신신호에서 주파수영역에서 채널추정이 가능하도록 새로운 SC-FDE의 구조를 제안하며 제안하는 구조의 성능 향상은 컴퓨터 모의실험을 통해 검증하였다. 모의실험 결과 재머의 크기가 수신신호의 크기와 동일한 환경에서 제안하는 방식은 재머가 없는 경우 대비 약 2 dB 이내의 손실로 수신이 가능하지만 기존의 방식은 통신이 불가능 하다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new single carrier – frequency domain equalization (SC-FDE) structure to cope with narrow band interference. In the conventional SC-FDE structure, when a high-power narrow band interference exists, channel estimation and data recovery is difficult. To relieve from this problem, this paper proposes a new SC-FDE frame structure to enable frequency-domain channel estimation in the environments that exist narrow band interference. Specifically, in the conventional method, the channel estimation is performed in time-domain first and from that, the frequency-domain channel is obtained by Fourier transform. In contrast, we proposed a new SC-FDE structure to enable frequency-domain channel estimation directly from received signals without time-domain channel estimation. The receiver performance improvement is verified through computer simulation. According to the results, the proposed technique can detect the signal with less than 2 dB loss compared with jammer-free environments, while the conventional method does not communicate with each other.

키워드 : SC-FDE, 채널추정, 협대역 간섭, 프레임 구조, 협대역 재머

Keyword : SC-FDE, channel estimation, narrow band interference, frame structure, narrow band jammer

Received 24 December 2017, **Revised** 3 January 2018, **Accepted** 20 January 2018

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

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.5.787 pISSN:2234-4772

ⓒ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 상용 및 군용 통신에서 널리 사용되는 전송방식은 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 SC-FDE (Single Carrier Frequency Domain Equalization)이다[1][2]. 두 방식 모두 다중 경로 지연이 존재하는 채널 환경에서 주파수 영역에서 채널등화를 수행할 수 있는 방식이다[2]. OFDM은 SC-FDE에 비해 높은 피크 대 평균 전력비 (PAPR : Peak-to Average Power Ratio)를 갖기 때문에 전력증폭기에 부담을 준다는 문제와 반송파 주파수 오프셋에 민감한 단점이 있으며[3] SC-FDE는 여러 사용자가 동시에 접속할 때 주파수를 나눠 다중 접속을 구현하면 OFDM처럼 PAPR이 증가하는 문제가 있다. 이러한 이유로 OFDM은 셀룰라 시스템의 하향링크로 사용되고 있고 SC-FDE는 상향링크로 사용되고 있다[4]. 뿐만 아니라 군 전술 통신에서도 SC-FDE 방식이 적합하다고 할 수 있다. 왜냐하면 군 통신에서는 대부분의 개인과 개인 사이의 통신이기 때문이다.

본 논문에서 고려하는 통신환경은 군에서 SC-FDE 전송방식으로 통신하는 상황이다. 군 통신에서 중요하게 고려해야 하는 사항은 수신 성능 강화뿐만 아니라 적의 인위적인 전파 공격에 대항할 수 있는 능력이다. 적에게 사용하는 주파수가 노출이 되면 큰 출력의 방해전파 즉, 재머를 이용한 전파공격이 가능하고[5] 이러한 상황에서도 안정적으로 통신할 수 있는 능력은 군 작전 수행을 위해 매우 중요하기 때문이다. OFDM이나 SC-FDE는 모두 주로 광대역 통신에 사용되며, OFDM의 경우 부반송파로 다중화 해서 정보를 전송하므로 협대역 재머에 의해 일부 부반송파가 영향을 받더라도 나머지 부반송파로는 제대로 정보를 전달할 수 있다. 하지만, SC-FDE 방식은 송신신호가 광대역 단일 반송파 신호이므로 협대역 재머 공격에 대해 상대적으로 취약한 것이 약점이다[6].

이와 같은 약점을 극복하기 위해 본 논문에서는 SC-FDE 방식으로 통신하는 상황에서 협대역 재머가 존재할 때에도 안정적인 수신이 가능하도록 새로운 전송 프레임 구조를 제안한다. 제안하는 방법은 재머 제거를 위해 특별한 알고리즘을 사용하는 것이 아니라 프레임 구조를 바꾸고 이에 따른 수신구조를 제시하는데 이 수신구조가 자연스럽게 협대역 재머 제거 기능을 수행하여 재머가 있든 없든 안정적인 수신을 돕는 것이 특징이다. 제안하는 방법을 조금 더 구체적으로 설명하면, 기존의 SC-FDE 프레임 구조에서는 파일럿을 이용하여 시간영역 채널을 추정한 후, 푸리에변환을 통해 주파수 영역 채널을 얻고 채널 등화를 수행하는데 제안하는 프레임 구조는 수신신호에서 시간영역 채널 추정 과정 없이 곧바로 주파수 영역 채널을 추정할 수 있도록 한다. 기존의 방법에서는 재머로 인해 시간영역 채널추정이 어렵고 이에 따라 주파수 영역 채널도 구하기 어려운 문제가 있는 반면, 제안하는 방식은 재머가 존재하더라도 수신기에서 주파수 영역 채널을 곧바로 구할 수 있는 장점이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과에 따르면 고출력 협대역 재머가 있을 때 기존 방식은 수신기 거의 불가능한 반면 제안하는 방식은 일부 성능 손실은 있지만 데이터 복원이 가능함을 보인다. 또한 SC-FDE와 직접 수열 대역확산 기술을 접목하는 경우 재머가 있을 때와 없을 때의 BER (bit error ratio) 성능이 거의 차이가 없음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 기존 SC-FDE 구조에 대해 기술하고 3절에서는 제안하는 프레임 구조에 대해 설명하며 수신기 구조에 대해서도 소개한다. 또한 제안하는 방식이 협대역 재머가 있을 때 어떻게 데이터 복원에 성공할 수 있는지 설명한다. 4절에서는 컴퓨터 모의실험 환경 및 결과를 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 기존 SC-FDE 구조 및 협대역 재머 환경에서의 문제

2.1. 기존 SC-FDE 구조

그림 1은 기존 SC-FDE의 전송구조를 보인다[7]. SC-FDE 신호는 단일 반송파 전송 시스템이므로 디지털 변조 방식을 통해서 전송할 데이터 심볼을 만든다. 한 개의 SC-FDE 블록으로 전송하는 데이터 심볼의 길이를 L_D라고 하자. 수신기에서 채널 추정 및 보상을 위해서는 파일럿 신호도 전송해야 하는데 파일럿의 길이는 L_P로 정의한다. 파일럿과 데이터 심볼의 길이는 N_{FFT}로 정의하는데 $N_{FFT} = L_P + L_D$이다. 수신기에서 주파수 영역 등화기를 사용하기 위해서는 수신신호가 채널 임펄스 응답과 송신 신호 사이의 순환 컨볼루션 형

태가 되어야 하므로 CP (cyclic prefix)를 맨 앞에 삽입한다. CP는 데이터 블록의 맨 마지막 L_{CP}개의 심볼이다. CP의 길이는 채널의 임펄스 응답의 길이와 같거나 크게 설정해야 한다. 또한 N_{FFT}도 너무 크지 않아야 하는데 주파수 영역 등화기가 동작하기 위해서는 길이 N_{FFT} 시간 구간에서 채널이 변하지 않아야하기 때문이다. 따라서 이동속도와 반송파 주파수의 함수로 주어지는 도플러 효과를 고려하여 N_{FFT} 크기를 결정해야 하며, 파일럿 길이 L_P도 원하는 채널 추정 성능을 얻을 수 있도록 설정한다.

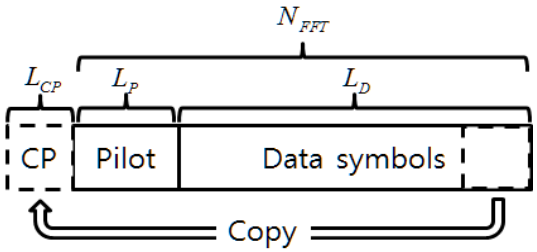

Fig. 1 Structure of conventional SC-FDE transmit signal

수신기에서는 먼저 CP를 제거하고 파일럿을 이용하여 채널 추정을 수행한다. CP를 제거한 송신신호를 $x(n), n=0,...,N_{FFT}-1$이라고 정의하고 이의 수신신호를 $y(n), n=0,...,N_{FFT}-1$이라고 정의하자. 또한 채널을 인과적이라 가정하고 길이를 L_h라고 가정하며 전송 블록 내에서는 고정된 값이라고 가정한다. 이 경우 채널 임펄스 응답을 $h(n), n=0,...,L_h-1$라고하면 수신신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{l=0}^{L_h-1} h(l)x(n-l)+\eta(n) \\ &= \boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{h}+\eta(n) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{x}(n)=[x(n),x(n-1),...,x(n-L_h-1)]^T$$
$$\boldsymbol{h}=[h(0),h(1),...,h(L_h-1)]^T$$

$\eta(n)$은 가우시안 잡음을 나타내며, CP에 의해 $x(-1)=x(N_{FFT}), x(-2)=x(N_{FFT}-1), ...$이다.

(1)과 같이 주어진 기존 SC-FDE 구조의 수신신호 모델에서 채널추정은 먼저 시간영역 채널 추정을 수행하고 이를 DFT (discrete Fourier transform)하여 주파수 영역 채널을 추정한다. 수신신호에서 $y(n), n=0,...,L_p-1$은 파일럿 구간이고 이 신호만 추출하면 다음과 같은 수식를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(L_P-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^T(0) \\ \boldsymbol{x}^T(1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}^T(L_P-1) \end{bmatrix} \boldsymbol{h} + \begin{bmatrix} \eta(0) \\ \eta(1) \\ \vdots \\ \eta(L_P-1) \end{bmatrix}$$

또는

$$\boldsymbol{y}_P = \boldsymbol{X}_P\boldsymbol{h}+\boldsymbol{\eta} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{y}_P = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(L_P-1) \end{bmatrix}, \boldsymbol{X}_P = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^T(0) \\ \boldsymbol{x}^T(1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}^T(L_P-1) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta(0) \\ \eta(1) \\ \vdots \\ \eta(L_P-1) \end{bmatrix}$$

(2)에서 채널 $\boldsymbol{h}$를 추정하기 위해 최소 자승기법을 도입하면, 시간영역 채널의 최소 자승 추정치 $\hat{\boldsymbol{h}}$는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\boldsymbol{h}} = \left(\boldsymbol{X}_P^H\boldsymbol{X}_P\right)^{-1}\boldsymbol{X}_P^H\boldsymbol{y}_P \quad (3)$$

주파수 영역 채널은 $\hat{\boldsymbol{h}}$의 DFT를 통해 얻는다.

$$\hat{H}_C(k) = \sum_{n=0}^{L_h-1} \hat{h}(n)\exp\left(-j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}\right), k=0,...,N_{FFT}-1 \quad (4)$$

수신신호에서 채널보상은 주파수 영역에서 수행하는데 이를 위해 주파수 영역 수신신호를 구하고,

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} y(n)\exp(-j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}), \ k=0,...,N_{FFT}-1 \quad (5)$$

채널을 나눠서 보상한다. 이때 $Y(k)$를 $\hat{H}_C(k)$로 나눠도 되지만, 낮은 SNR (signal to noise ratio) 영역에서 성능 개선을 위해 MMSE (minimum mean square error) 등화를 수행한다.

$$\hat{X}_C(k) = \frac{Y(k)\hat{H}_C^*(k)}{|\hat{H}_C(k)|^2+\sigma_\eta^2} \quad (6)$$

MMSE 등화를 위해서는 잡음의 분산을 추정해야 하지만 본 논문에서는 이를 알고 있다고 가정한다. 마지막으로 채널 보상이 된 시간 영역 수신신호는 IDFT (inverse discrete Fourier transform)을 통해 다음과 같이 얻는다.

$$\hat{x}_C(n) = \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} \hat{X}_C(k)\exp(j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}), \ n=0,...,N_{FFT}-1 \quad (7)$$

2.2. 협대역 재머 환경에서 기존 SC-FDE 구조의 문제

앞서 설명한 바와 같이 기존 SC-FDE 구조의 수신기에서는 주파수 영역 채널을 구하기 위해 먼저 시간영역 채널을 추정해야 한다. 협대역 재머가 존재하는 경우 수신신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y(n) = \boldsymbol{x}^T(n)\boldsymbol{h} + I(n) + \eta(n) \quad (8)$$

$I(n)$은 협대역 재머를 나타낸다. 시간영역 채널 추정 협대역 재머가 있는 경우 SINR (signal to interference plus noise ratio)이 0 dB 혹은 그 이하가 될 수도 있다. 이 경우 훈련신호가 아주 길지 않으면 시간영역 채널 추정을 정상적으로 수행할 수 없다[8]. 이에 따라 주파수 영역 채널도 제대로 구할 수 없으며 채널 등화를 정상적으로 수행할 수 없다.

주파수 영역에서 바라보면 협대역 재머는 신호 전체 대역폭 중에 일부분에만 영향을 미치게 된다. 즉, 협대역 재머가 위치한 주파수는 널링을 통해 제거하고 나머지 주파수에서 채널을 제대로 추정할 수만 있다면 채널 등화도 가능할 것이다. 이 방법을 성공시키기 위해서는 협대역 재머가 있는 상황에서도 주파수 영역 채널을 제대로 추정할 수 있는 방안을 마련해야 한다. 제안하는 기법은 시간영역 채널 추정을 통하지 않고 곧바로 주파수 영역 채널을 구할 수 있도록 프레임 구조를 변경한다.

Ⅲ. 제안하는 SC-FDE 구조

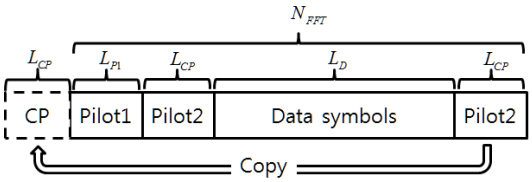

Fig. 2 Structure of proposed SC-FDE transmit signal

그림 2는 제안하는 SC-FDE 전송구조를 보인다. 그림 1의 기존 구조에 비해 큰 차이점은 기존 구조에서는 한 그룹의 파일럿이 존재했지만 제안구조에서는 이를 세 개의 그룹으로 쪼갰다는 것이다. 그리고 데이터 심볼 앞뒤로 동일한 pilot2 신호를 사용한다. 그리고 pilot2의 길이는 정확히 CP의 길이와 동일하다. 이와 같은 구조에서 CP는 앞 쪽 pilot1 + pilot2 블록의 CP도 되고 전체 블록 pilot1+pilot2+data+pilot2의 CP도 된다는 점이다. 즉, 하나의 CP는 짧은 길이의 앞 쪽 파일럿의 CP도 되면서 전체 길이의 신호의 CP도 된다는 점이다. 그리고 CP는 pilot2와 동일하게 된다.

수신신호에서 CP를 제거한 후 pilot1+pilot2 블록을 선택한다. CP에 의해 수신 pilot1+pilot2블록은 채널의 임펄스 응답과 파일럿 (Pilot1+Pilot2) 사이의 순환 컨볼루션으로 나타나기 때문에 곧바로 FFT를 통해 주파수 영역 채널을 구할 수 있다. 기존 방안에서와 동일하게 길이 N_{FFT}의 송신신호를 $x(n)$, 수신신호를 $y(n)$으로 정의하자. 채널 추정을 위해 수신신호에서 CP를 제거한 후 먼저 주파수 영역 파일럿 신호 (pilot1 + pilot2) $Y_P(k)$를 구한다.

$$Y_P(k) = \sum_{n=0}^{L_{P1}+L_{P2}-1} y(n)\exp\left(-j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}\right), k = 0,\ldots,N_{FFT}-1 \quad (9)$$

$Y_P(k)$는 채널에 의해 왜곡된 주파수 영역 수신 파일럿 신호를 나타낸다. 채널 추정을 위해 송신 파일럿 신호의 이상적인 주파수 특성을 구한다.

$$X_P(k) = \sum_{n=0}^{L_{P1}+L_{P2}-1} x(n)\exp\left(-j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}\right), k = 0,\ldots,N_{FFT}-1 \quad (10)$$

N_{FFT} 개의 주파수 영역 채널은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{H}_P(k) = \frac{Y_P(k)X_P^*(k)}{|X_P(k)|^2 + \sigma_\eta^2}, k = 0,\ldots,N_{FFT}-1 \quad (11)$$

주파수 영역 채널 보상을 위해 기존 방식과 동일하게 주파수 영역 수신신호를 구하고,

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N_{FFT}-1} y(n)\exp(-j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}),\ k = 0,\ldots,N_{FFT}-1$$

$\hat{H}_P(k)$로 나눠서 채널을 보상한다.

$$\hat{X}_P(k) = \frac{Y(k)\hat{H}_P^*(k)}{|\hat{H}_P(k)|^2 + \sigma_\eta^2} \quad (12)$$

마지막으로 채널 보상이 된 시간 영역 수신신호는 IDFT를 통해 다음과 같이 얻는다.

$$\hat{x}_P(n) = \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} \hat{X}_P(k)\exp(j2\pi\frac{nk}{N_{FFT}}),\ n = 0,\ldots,N_{FFT}-1 \quad (13)$$

제안하는 방식의 특징을 다시 설명하면 다음과 같다. 제안구조에서는 프레임 구조를 수정하여 CP가 파일럿의 CP도 되면서 전체 전송블록의 CP도 되도록 설계하여 Pilot1+Pilot2의 FFT를 통해 주파수 영역 채널추정을 곧바로 수행할 수 있도록 하여 협대역 재머가 존재해도 주파수 영역 채널 추정을 수행할 수 있도록 하였다. 이 구조는 협대역 재머가 존재하여 SINR이 나쁜 환경에서

도 주파수 영역 채널을 구할 수 있고 등화도 가능하다. 특히, 협대역 재머가 있을 때 주파수 영역 채널을 구하면 협대역 재머가 위치한 주파수에서 큰 값이 관찰될 것이다. 하지만 주파수 영역 등화는 수신신호를 채널로 나누는 과정이기 때문에 등화를 수행한 후 자연스럽게 재머가 위치한 신호의 크기가 줄어드는 효과를 얻을 수 있다. 즉, 재머 제거를 위해 추가적인 신호처리를 수행하지 않더라도 자연스럽게 재머 위치의 널링 효과도 얻을 수 있다. 일반적으로 재머 제거를 위해서는 재머 인식과 제거의 두 단계를 수행해야 하지만 제안 구조에서는 재머의 유무와 상관없이 동작이 가능하다는 것이 장점이다.

Ⅳ. 컴퓨터 모의실험 환경 및 결과

4.1. 모의실험 환경

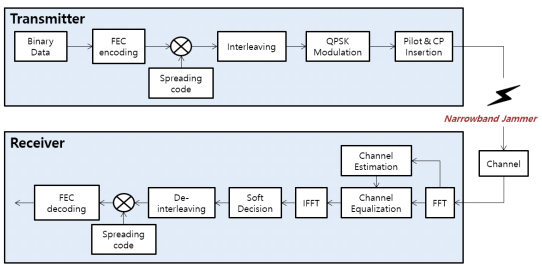

Fig. 3 Block diagram of transceiver for proposed SC-FDE

제안하는 SC-FDE의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였다[9][10]. 그림 3은 모의실험에 사용한 SC-FDE 송수신 시스템의 블록도를 나타낸다. 송신기에서는 무작위 이진데이터를 생성한 후 FEC (forward error correction) 인코딩을 수행한다. 그 후 PN (pseudo noise) 코드를 곱하여 직접수열 대역확산을 수행하고 군집 에러 방지를 위해 데이터 순서를 섞어주는 인터리빙(Interleaving)을 수행한다. 이후 QPSK 변조후, 블록간 간섭 방지 및 주파수 영역 등화를 위해 CP와 파일럿 신호를 붙여 송신한다. 송신된 데이터는 통신 채널을 거쳐 수신되며, 특히 협대역 재머가 존재할 때는 재밍 신호도 함께 더해져 수신된다.

수신기에서는 앞 쪽 수신 파일럿을 이용하여 주파수 영역 채널을 추정하고 등화를 수행한다. 다음에는 LLR (log likelihood ratio)을 구하고, 디인터리빙, 역확산, FEC 디코딩 순으로 송신 데이터를 복원한다.

시뮬레이션에 사용한 상세 파라미터는 다음과 같다. 전송 메시지로 384 bits의 이진데이터를 사용하였고 채널코드는 코드율 1/2의 LDPC (Low-density Parity-check) 코드를 사용하였다 [11]. 확산이득은 1, 4에 대하여 진행하였으며 각각의 확산이득에 대해 32 x 24, 64 x 48의 행렬 인터리빙을 수행하였다. 변조방식으로는 QPSK를 사용하였으며 CP길이는 32 심볼 ($L_{cp}=32$), 총 파일럿의 길이는 128 symbols로 설정하였다 ($L_{p1}+2L_{CP}=128$). 협대역 재머는 1개를 고려하였으며 JSR (Jammer to Signal Ratio)은 0 dB로 고정하였다. 즉, 재머와 수신신호의 전력이 동일한 환경이다. 통신채널은 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 및 페이딩 채널을 고려하였고 N_{FFT} = 512 이다. 심볼 속도는 2M symbol/s 이다.

4.2. 협대역 재머가 존재할 때 주파수 영역 채널 추정 결과

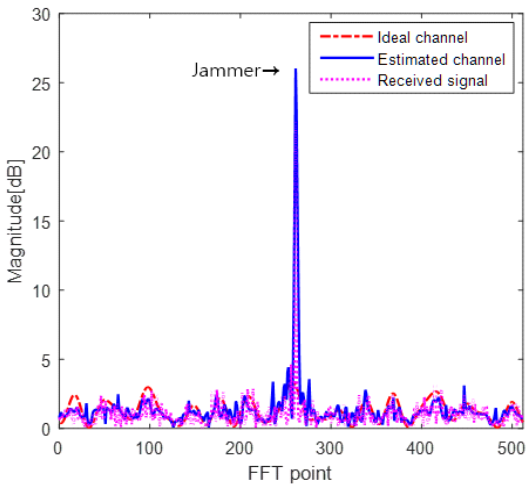

Fig. 4 Frequency domain channel estimate in proposed SC-FDE structure when jammer exists

그림 4는 페이딩 채널에서 협대역 재머가 존재할 때 이상적인 채널 주파수 응답과 주파수 영역 채널추정 값을 나타낸다. 빨간색 점선, 파란색 실선, 분홍색 잔점선은 각각 이상적인 채널의 주파수 응답, 추정된 채널, 수신 신호를 나타낸다. 모의실험 결과에 따르면 제안하는 SC-FDE구조에서의 파란 실선의 채널추정 결과와 점선

의 이상적 재머의 특성과 일치하는 것을 확인할 수 있어 재머가 정확하게 추정되고 있으며 재머를 제외한 주파수에서 실선의 추정값과 점선의 실제 채널 값을 비교하면 두 값이 일치하여 채널추정도 잘 수행하고 있음을 확인할 수 있다.

4.3. BER 모의실험 결과

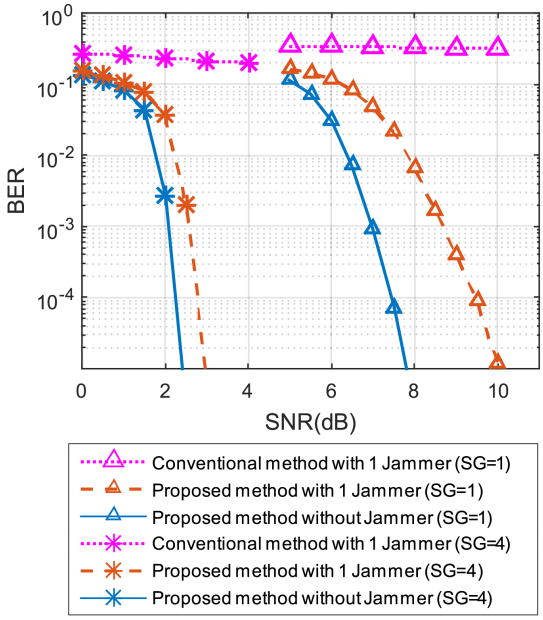

Fig. 5 BER Simulation results for AWGN channels

그림5는 AWGN 환경에서 재머의 유무 및 확산이득에 따라 제안하는 구조와 기존의 SC-FDE구조의 BER 성능을 나타낸다. 본 모의실험에서 JSR (jammer to signal ratio)는 0dB를 가정하였다. 시간영역 채널추정에 기반한 기존 방식은 SNR이 높아도 재머에 의해 제대로 데이터 복원이 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있고, 제안하는 SC-FDE구조는 재머가 존재하지 않을 때 보다는 약 2 dB 가량 성능이 저하되지만 기존의 SC-FDE구조와 비교했을 때 BER 성능이 많이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또한 확산이득이 1에서 4로 증가하면 따라 재머가 없을 때에 비해 손실이 약 0.5dB 로 줄어드는 것을 알 수 있다.

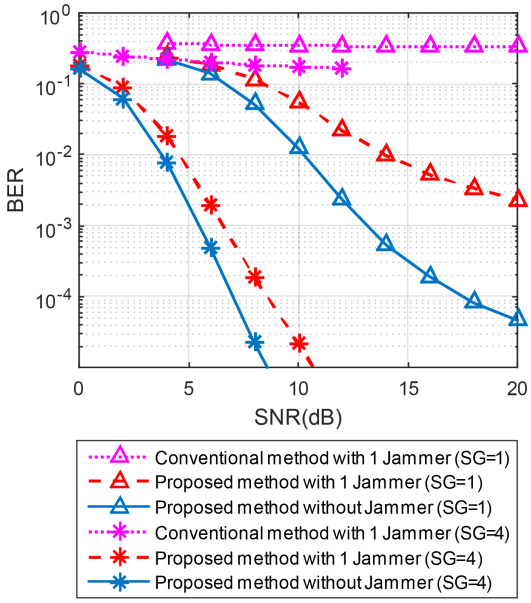

Fig. 6 BER Simulation results for Fading channels

그림 6은 페이딩 채널환경에서 확산이득 및 재머의 유무에 따른 제안하는 SC-FDE 구조의 BER 성능을 나타낸다. JNR = 0 dB이다 .페이딩 채널 모델은 다음과 같다. 7-path 모델을 사용하였으며 각 다중경로 별 전력은 [0.73, 0.031, 0.034, 0.051, 0.061, 0.042, 0.051], 다중경로 지연은 [0, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0, 9.6]μs이다. 각 경로는 Rayleigh 분포를 따르며 이동속도는 60 km/h로 가정하였다 [12]. 모의실험 결과에 따르면 기존의 방식은 여전히 제대로 데이터 복원을 수행하지 못하며, 재머가 있을 때와 없을 때 제안방식을 BER=1E-3을 기준으로 관찰하면, 확산이득이 1일 때와 4일 때, 성능열화가 각각 10 dB, 2 dB로 관찰되었다.

모의실험 결과를 통해 제안방식은 JNR = 0 dB의 협대역 재머가 있을 때나 없을 때나 특별한 신호처리를 수행하지 않아도 AWGN 채널 기준 약 2 dB 이내의 손실로 수신이 가능함을 알 수 있으며 특히 확산이득을 4로 사용하는 경우 AWGN 채널 기준 1 dB 이내로 성능열화를 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다. 페이딩 채널에서 제안하는 방식은 SNR이 충분히 확보되면 통신이 가능하지만 기존방식은 통신이 어려움을 확인하였다.

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 새로운 SC-FDE 전송구조와 수신기 구조를 제안하였다. 제안방식은 시간영역 채널추정을 통하지 않고 곧바로 주파수영역 채널을 추정할 수 있도록 설계 되었으며 협대역 재머 혹은 간섭이 있는 환경에서도 채널 추정이 가능함을 확인하였다. 따라서, 군통신 시스템이나 자율 주행차 혹은 드론처럼 통신의 신뢰성이 안전과 직결되는 시스템에서 제안하는 방식을 적용함으로써 간섭이나 재머 존재 시에도 통신을 할 수 있다.

References

[1] A. Czylwik, “Comparison between adaptive OFDM and single carrier modulation with frequency domain equalization,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 865 – 869, May 1997.

[2] T. Hwang and Y. Li, "A bandwidth efficient block transmission with frequency-domain equalization.", *IEEE 6th CAS Symposium Emerging Technologies*, vol. 2, pp.433-436, June 2004.

[3] P. Yang, Y. Xiao, and Y. L. Guan, “Single-carrier SM-MIMO: A promising design for broadband large-scale antenna systems,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1687 – 1716, Feb. 2016.

[4] H. S. Eshwaraiah, and A. Chockalingam, "SC-FDMA for multiuser communication on the downlink," *2013 Fifth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, pp. 1-7, Feb. 2013.

[5] H. Zhu, C. Fang, Y. Liu, C. Chen, M. Li, and X Shen, “You can jam but you cannot hide: defecding against jamming attacks for geo-location database driven spectrum sharing,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 10, pp. 2723-2737, Oct. 2016.

[6] C. Shahriar et al., “PHY-layer resiliency in OFDM communications: A tutorial,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 292 – 314, Mar. 2015.

[7] D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, and B. Eidson, “Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems,” *IEEE Commun. Magazine*, vol.40, no.4, pp.58 – 66, Apr. 2002.

[8] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th edition, New Jersey, Prentice Hall, 2002.

[9] M. Bansal and L. Shricastava, "Performance Analysis of Wireless Mobile Adhoc Network with Different Types of Antennas," *HSST, ISSN : 2508-9080*, vol.3, no.1, pp. 33-44, Mar. 2017.

[10] E. -R. Jeong, H. H. Won, K. J. Yang, and B. S. Ahn, “A new multi-beam MVDR technique for removing interference signals in array antenna based GPS receivers, ” *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 491-498, Mar. 2017.

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

[12] J. Berger, “L-Band Channel Modeling,” *IEEE/AIAA Integrated Communication, Navigation, & Surveillance Conference*, Altimore, MD, pp. 1-3, May 2006.

주소영(So-Young Joo)

한밭대학교 정보통신공학과 학사 (2017)
한밭대학교 정보통신공학과 석사과정 (현재)
※관심분야 : 디지털신호처리, 임베디드시스템

조성미(Sung-Mi Jo)

한밭대학교 정보통신공학과 학사 (2016)
한밭대학교 정보통신공학과 석사 (2018)
스카이랩스 연구원 (현재)
※관심분야 : 디지털신호처리, 통신시스템설계

황찬호(Chan-Ho Hwang)

한국해양대학교 전파공학과 학사 (2013)
한국해양대학교 전파공학과 석사 (2015)
국방과학연구소 연구원 (현재)
※관심분야 : 디지털 통신, 신호처리

정의림(Eui-Rim Jeong)

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