

논문 2012-49-9-16

OMP 알고리즘을 이용한 OFDM 시스템의 시간 영역 등화기

(A Time-Domain Equalization of OFDM Systems Using the OMP Algorithm)

문우식*, 임성빈*

(Woosik Moon and Sungbin Im)

요약

본 논문에서는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서 OMP (Orthogonal Matching Pursuit) 알고리즘을 이용한 시간 영역 등화를 제안한다. OFDM 시스템은 보호구간을 삽입하여 다중 경로 페이딩에 강한 특성을 보이지만, 도플러 환경에서는 부반송파간의 직교성이 유지되지 않아 채널간의 간섭이 발생한다. 대표적인 시간 영역 등화 방법으로 LS (Least Squares) 알고리즘이 있지만 채널 길이가 길어질수록 잡음에 의한 오차가 커지는 단점이 있다. 다중 경로 페이딩은 서로 다른 지연을 갖는 신호의 합으로 볼 수 있고, 시간 영역에서 성긴 (sparse) 특성이 있다고 할 수 있다. CS (Compressive Sensing) 알고리즘 중 하나인 OMP (Orthogonal Matching Pursuit) 알고리즘은 성긴 채널에서 중요한 요소만을 선택하여 채널을 복원함으로써 잡음의 영향을 줄일 수 있다. 모의실험에서는 여러 가지 채널 환경에서 OMP 알고리즘의 채널 등화 성능을 다른 등화 방법과 비교하여 평가하였다.

Abstract

In this paper, we introduce the time-domain equalizer in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems using orthogonal matching pursuit (OMP) algorithm. Since OFDM system inserts guard intervals, it shows robust performance against multi-path fading. However, in Doppler channel, inter-carrier interference (ICI) occurs because an orthogonality of sub-carriers does not maintain. A least squares (LS) algorithm is common method of time-domain equalizer, but if a channel length is longer, the performance deteriorates by noise. The multi-path fading is a summation of the different delay signal. And that has sparse properties in time-domain. Because the OMP algorithm of the compressive sensing (CS) algorithm restores the channel by choosing the important elements of sparse channel, it can reduce the influence of noise. We simulate the performance of time-domain equalizer in OFDM system with various channel environments using OMP algorithm compared with other equalization method.

Keywords : OFDM, time-domain equalization, OMP, CS

I. 서론

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 여러 개의 부반송파를 이용해

신호를 전송하는 방식으로, 주파수 효율성이 높고, 고속 전송에 유리하다. 그리고 채널의 최대 지연보다 긴 보호구간을 삽입함으로써 다중 경로 페이딩에 강하다.

WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)와 LTE (Long Term Evolution) 같이 OFDM을 이용한 차세대 이동 통신 서비스는 커버리지가 넓고, 높은 주파수 대역과 고속 통신, 빠른 이동체가 있는 환경을 고려하고 있으며, 주파수 효율을 위해 심벌길어도 점차 길어지고 있다. 한 심벌 안에서 채널이

* 정희원, 숭실대학교 정보통신전자공학부
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 이 논문은 2011년도 중소기업청의 지원을 받아 수행된 연구임 (S1072399).

접수일자: 2011년6월29일, 수정완료일: 2012년8월31일

변하면 OFDM 부반송파간에 직교성이 유지되지 않아, 인접 부반송파에 영향을 미치는 ICI (Inter-Carrier Interference)가 발생한다. 이런 환경에서 ZF (Zero Forcing) 방법에 의한 주파수 영역 단일 탭 등화기 같이 간단한 채널 등화 방법으로는 좋은 성능을 얻을 수 없다^[1]. 그래서 더 높은 채널 해상도를 얻을 수 있는 시간 영역 등화를 고려할 수 있다. 대표적인 시간 영역 등화 방법으로는 LS (Least Squares) 방법이 있다. 그러나 LS 방법은 채널의 길이가 길어질수록 잡음에 의한 채널 추정 오차가 커지는 단점이 있다.

참고 문헌 [2~3]에서는 CS (Compressive Sensing) 을 채널 추정에 적용하는 문제를 논의하고 있다. CS는 신호처리에 대한 새로운 패러다임을 제시하여 요즘 주목 받고 있는 기술로 신호가 성긴 (sparse) 특성을 가지고 있다면 Nyquist 표본화 주파수보다 낮은 주파수로 표본화하여도 신호를 완벽하게 복원할 수 있음을 나타낸다. 이 때 최적의 해는 l_1 -최소화 문제를 풀어 구할 수 있다^[4]. 이동 통신 채널도 몇 개의 경로를 통해 신호가 전달되는 성긴 채널이라 가정할 수 있고, 따라서 채널을 추정할 때에 CS 알고리즘 중 하나인 OMP (Orthogonal Matching Pursuit) 알고리즘을 이용하여 중요한 다중 경로 요소만을 선택하여 추정함으로써 채널 추정의 정확도를 높이고 잡음의 영향을 최소화 할 수 있다^[5].

본 논문에서는 채널을 추정할 때에 발생하는 잡음에 의한 오차를 줄여 정확도를 높이기 위해 OMP 알고리즘을 이용한 OFDM 시스템의 시간 영역 채널 추정 기법을 제안한다. OFDM 무선 통신 채널을 시간 영역에서 성긴 채널로 간주하였고, 고속 이동시에 빠르게 변화하는 채널을 예측하기 위해 파일럿 (pilot) 심벌을 이용하였다.

II장에서는 OFDM 기저대역 시스템을 모델링하고 기존의 LS 알고리즘에 의한 채널 추정 방법에 대해 설명하였다. III장에서는 CS 이론에 대한 기본적인 내용과 OMP 알고리즘에 대하여 설명한다. IV장에서는 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능과 다른 등화 방법의 성능 차이를 비교하였고, 이를 바탕으로 V장에서 결론을 내린다.

II. OFDM 시스템 모델과 LS 채널 추정

OFDM 전송 방식은 전체 대역폭을 N 개의 협대역 직교 부반송파로 분할하고, 각 부반송파에 데이터를 실어 동시에 전송하는 방식이다. OFDM 송신 신호는 i 번째 심벌 블록 $X_i = [X_{i,0}, X_{i,1}, \dots, X_{i,N-1}]$ 를 N -포인트 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)하여 전송한다. 전송신호는 인덱스 i 를 삭제한 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(n) &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\sum_{k \in P} X_k e^{j2\pi kn/N} + \sum_{k \in D} X_k e^{j2\pi kn/N} \right) \\ &= x_p(n) + x_d(n) \end{aligned} \quad (1)$$

신호 $x(n)$ 은 i 번째 심벌 블록의 n 번째 시간영역 신호로 부반송파 N 개의 합으로 이루어져 있고, 이는 파일럿 신호 $x_p(n)$ 와 데이터 신호 $x_d(n)$ 의 합으로 볼 수 있다. X_k 는 k 번째 부반송파의 주파수 영역 신호로 파일럿이나 데이터가 들어간다. 그리고 P 는 파일럿 신호의 위치이고, D 는 데이터 신호의 위치이다. 채널 추정은 파일럿 신호를 이용하여 할 수 있으며, 수신된 파일럿 신호는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$y_p(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_p(l)x_p(n-l) + z_p(n) \quad (2)$$

$$y_p = A_p h_p + z_p \quad (3)$$

여기서 $y_p(n)$ 는 L 개의 다중 경로 채널을 통과한 수신 파일럿 신호이고, $h_p(l)$ 는 채널의 l 번째 복소 이득이며, $z_p(n)$ 는 백색 잡음이다. 식 (3)은 식 (2)를 행렬식으로 표현한 것이다. 시간 영역에서 대표적인 채널 추정 방식인 LS 방법은 다음과 같다.

$$\hat{h}_p = (A_p^H A_p)^{-1} A_p^H y_p \quad (4)$$

시간 영역 LS 방법은 간단하게 채널 추정을 할 수 있는 장점이 있지만 잡음의 영향으로 오차가 생기고, 채널 최대 지연시간이 길어질수록 필터의 길이도 길어져 오차에 의한 성능열화가 크게 나타난다.

OFDM 수신 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역으로 표현할 때, 한 심벌 블록 동안 채널이 불변한다고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_k = X_k H_k + Z_k \quad (5)$$

$$Y = \Phi H + Z, \quad \Phi = \text{diag}(X) \quad (6)$$

식 (5)의 신호 모델에서 k 번째 부반송파가 파일럿 신호라면 채널 응답 \hat{H}_k 는 간단히 추정할 수 있다.

$$\hat{H}_k = \frac{Y_k}{X_k} = H_k + \frac{Z_k}{X_k} \quad (7)$$

이 주파수 영역 LS 채널 추정 기법은 가장 간단하게 채널을 추정할 수 있는 장점이 있지만, 채널이 null에 빠진 경우 잡음이 증폭되어 채널 추정 오차가 증가하는 단점이 있다.

III. Compressive Sensing

CS 알고리즘은 신호가 sparse하다면 Nyquist rate 이하로 측정된 신호에서도 원 신호를 완벽하게 복원할 가능성이 있다. 이는 과소 결정된 선형 방정식에서 해를 구하는 것이다. Sparse 신호란 신호의 대부분에서 0 혹은 상대적으로 매우 작은 값을 갖는 신호를 말한다. 이때 선형 변환을 거쳐 대부분 0이 되는 신호도 sparse 신호에 포함된다. OFDM 채널도 주파수영역에서는 모두 값을 갖지만 시간영역에서 sparse 하다고 할 수 있다. 식 (6)의 주파수 영역 신호를 잡음 Z 는 제외하고 파일럿 신호만으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y_p = \Phi_p H = \Phi_p T h = \Theta h \quad (8)$$

$$[T]_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j2\pi mn/N} \quad (9)$$

여기서 Φ_p 는 $[M \times N]$ 행렬이고 T 는 $[N \times N]$ DFT 행렬이며 Θ 는 $\Phi_p T$ 이다.

CS 알고리즘으로 과소 결정된 선형 방정식의 해를 구할 수 있는 이유는 sparse 신호에서 0이 아닌 부분만을 찾기 때문이다. l_2 -최소화 방법은 과소 결정된 방정식에서는 유일해를 갖지 않고 무수히 많은 해를 찾는다. l_0 -최소화 방법은 0이 아닌 부분만 찾는 방법이지

만 0을 찾기 위해서 모든 경우의 수를 탐색하는 NP-hard (non-deterministic polynomial-time hard) 문제이다. l_1 -최소화 방법은 모든 원소 절대값의 합을 최소화 하는 방법으로 $M \geq cK \log(N/K)$ 개 정도의 측정값으로 sparse 신호를 높은 확률로 복원할 수 있다. 식 (8)의 선형 행렬 Θ 를 l_1 -최소화 문제로 해를 구할 수 있는지는 다음 수식과 같은 RIP (Restricted Isometry Property)라는 조건을 만족하는가로 알아볼 수 있다^[4].

$$(1 - \delta_{2s}) \|h\|_2 \leq \|\Theta h\|_2 \leq (1 + \delta_{2s}) \|h\|_2 \quad (10)$$

여기서, $\delta_{2s} \in (0, 1)$ 는 RIP 상수라 불리고, 0에 가까울수록 의미가 있다. 하지만 모든 sparse 신호에 대해 RIP 조건을 확인하는 것은 NP-hard 문제이기 때문에 사전에 Θ 가 좋은 행렬인지 판단하는 방법으로는 좋지 않다. 보다 현실적인 방법으로 행렬 Θ 에서 열 간의 상호관계를 조사하여 판단할 수 있다. 행렬 Θ 의 열을 θ_i 라 하고, 이들이 각각 정규화 되어 있을 때, 최대 상호상관은 다음과 같다.

$$\mu(\Theta) := \max |\langle \theta_i, \theta_j \rangle|_{i \neq j} \quad (11)$$

이 상호상관값을 사용하여 l_0 -최소화와 l_1 -최소화가 같은 유일해를 갖는 조건은 다음과 같다.

$$\|h\|_0 \leq \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\mu(\Theta)} \right) \quad (12)$$

보다 일반적으로 잡음이 포함되어 있는 측정신호 $Y_p = \Theta h + Z_p$ 를 l_1 -최소화 문제로 풀어보면 다음과 같다.

$$\hat{h} = \arg \min \|h\|_1 \text{ s.t. } \|Y_p - \Theta h\|_2 \leq \epsilon \quad (13)$$

여기서 $\epsilon \geq \|Z_p\|_2$ 이다. 식 (13)과 같은 l_1 -최소화 문제를 선형 문제로 변환하여 그대로 풀면 계산 복잡도가 대략 $O(N^3)$ 에 해당하는 많은 연산을 필요로 한다.

그래서 연산량이 적으면서도 sparse 채널을 등화할 수 있는 방법으로 준 최적화 알고리즘인 OMP 방법을 사용한다. 그림 1은 OMP를 이용한 등화기의 구조를 나타낸 것이다.

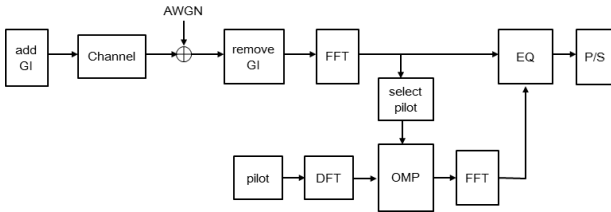


그림 1. 제안하는 OMP 등화기 구조
Fig. 1. Architecture of equalizer using OMP.

표 1. OMP 채널 추정 알고리즘
Table 1. OMP channel estimation algorithm.

Input : matrix Θ , vector Y_p , Error ϵ
Output : Index set I , Estimation \hat{h}
$I = \emptyset, r = Y_p$
repeat
$\lambda \leftarrow \text{largest coordinate } \Theta^* r $
$I \leftarrow I \cup \{\lambda\}$
$\hat{h} = \arg \min \ Y_p - \Theta _I \hat{h} \ _2$
$r = Y_p - \Theta \hat{h}$
until $\ r \ ^2 < \epsilon, \ \Delta r \ ^2 < \rho$

OMP 알고리즘은 Greedy 알고리즘의 한 방식으로 상관도가 높은 원소부터 해를 찾아가는 방법이다. 순차적으로 하나씩 해를 찾아가다 중요한 원소를 모두 찾으면 알고리즘을 중지한다.

표 1은 OMP 추정 알고리즘을 정리한 것이다. 이 알고리즘은 3단계로 나눌 수 있는데 초기화 단계에서는 인덱스 집합 I 를 공집합으로 두고, residual 벡터 r 을 수신 신호 Y_p 로 한다. 그 다음으로는 상관관계를 확인하는 단계로 $|\Theta^* r|$ 을 구하고 이 중 가장 큰 값의 위치를 인덱스 집합에 포함한다. 마지막 업데이트 단계는 $\| Y_p - \Theta|_I \hat{h} \|_2$ 로 새로운 \hat{h} 를 구하고 residual 벡터 $r = Y_p - \Theta \hat{h}$ 을 갱신한다. 이 과정을 알고리즘 종료 조건을 만족할 때까지 반복적으로 실행한다. 무선 채널은 잡음을 포함하고 있기 때문에 값이 0인 원소는 없다. 따라서 OMP 알고리즘의 종료 조건은 매우 중요하다. 먼저 알고리즘에 포함되어 있는 residual 벡터는 남아있는 잡음과 오차를 나타낸다. 이 값의 크기가 우리가 원하는 오차 이내라면 다음과 같이 알고리즘을 종료할 수 있다.

$$\| r \|^2 = \| \Theta(h - \hat{h}) + Z_p \|^2 \leq \epsilon \quad (14)$$

채널 추정이 정확히 이루어지면 $\| r \|_2$ 에서는 잡음만이 남게 된다. 따라서 종료조건은 $\epsilon = \gamma E[\| Z_p \|^2]$ 로 할 수 있다. 하지만 이 조건은 residual 값이 작아질 때까지 계속 반복시켜 성능을 나쁘게 한다. 그래서 residual의 기울기 조건을 다음과 같이 추가하였다.

$$\| \Delta r \|^2 = \| r_k - r_{k-1} \|^2 / \| Z_p \|^2 < \rho \quad (15)$$

여기서 k 는 현재 반복 횟수이다. 그래서 종료 조건은 $\| r \|^2$ 이 성능을 보장할 수 있는 ϵ 를 만족하거나 보다 큰 ϵ 를 만족하는 상태에서 $\| \Delta r \|^2$ 이 ρ 를 만족하는 것으로 결정할 수 있다. 그리고 OMP 알고리즘의 연산량은 $3\Theta + 3k^2 + 2M + N$ 에 비례한다.

IV. 모의실험

모의실험에서는 256개의 부반송파를 갖는 64-QAM OFDM 시스템을 이용하였다. 신호의 대역폭은 10MHz 이고 반송파 주파수는 5 GHz이다. 또한 32 샘플 (3.2 μ s)의 보호구간과 8개의 부반송파마다 파일럿을 배치하여 32개의 파일럿이 있다. 채널 추정은 32 샘플 (3.2 μ s) 지연까지 했다. 모의실험에 사용한 채널은 $[0, 1] \mu$ s의 지연에 $[0, 0]$ dB의 상대 파워를 갖는 2-path 채널과 $[0, 0.3, 0.7, 1.1, 1.7, 2.5] \mu$ s의 지연에 $[0, -1, -9, -10, -15, -20]$ dB의 상대 파워를 갖는 6개 path의 다중 경로 채널이고, 도플러 주파수는 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz로 각 채널에서 실험을 하였다. 도플러 1 kHz는 시속 216 km/h로 고속 이동하는 환경이다. 비교 대상으로는 일반적인 LS 방법과 MP (Matching Pursuit) 알고리즘^[6], CoSaMP (Compressive Sampling Matching Pursuit) 알고리즘^[7]을 사용하였다. MP 알고리즘과 CoSaMP 알고리즘에서는 종료조건으로 $\epsilon = \gamma E[\| Z_p \|^2]$ 의 γ 를 5로 하고 실험하였다. 그림 2는 2-path 채널에서 도플러 주파수가 10 Hz 일 때 모의 실험한 결과이다. 2-path는 채널 계수의 파워가 모두 0 dB인 주요 원소로 잡음과는 파워 차이가 많이 난다. LS를 제외한 3가지 방법 모두 거의 같은 성능을 보였으며 SNR이 15~35dB일 때, OMP 알고리즘은 LS 알고리즘보다 약 3dB 성능이 우수하게 나왔으며, SNR 35 dB일 때 OMP 알고리즘은

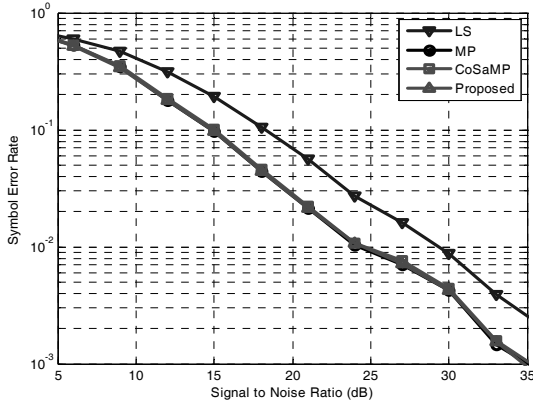


그림 2. 도플러 주파수가 10 Hz인 2-path 채널에서 여러 등화 알고리즘의 SER
 Fig. 2. SER of 2-path channel in different equalization algorithm at Doppler 10 Hz.

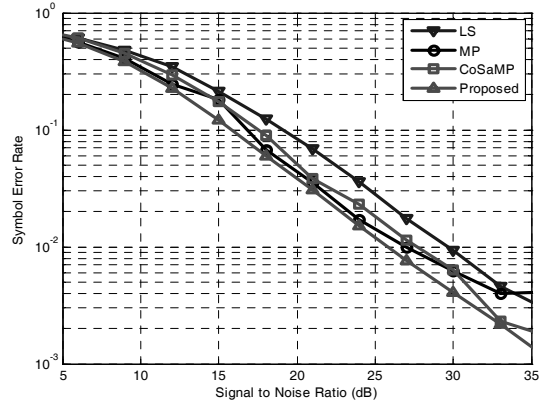


그림 5. 도플러 주파수가 10 Hz인 다중 경로 채널에서 여러 등화 알고리즘의 SER
 Fig. 5. SER of multi-path fading channel in different equalization algorithm at Doppler 10 Hz.

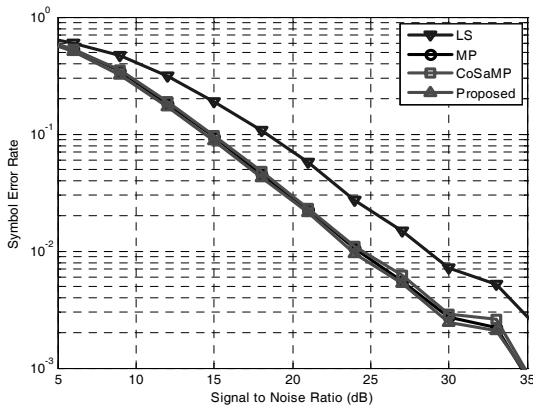


그림 3. 도플러 주파수가 100 Hz인 2-path 채널에서 여러 등화 알고리즘의 SER
 Fig. 3. SER of 2-path channel in different equalization algorithm at Doppler 100 Hz.

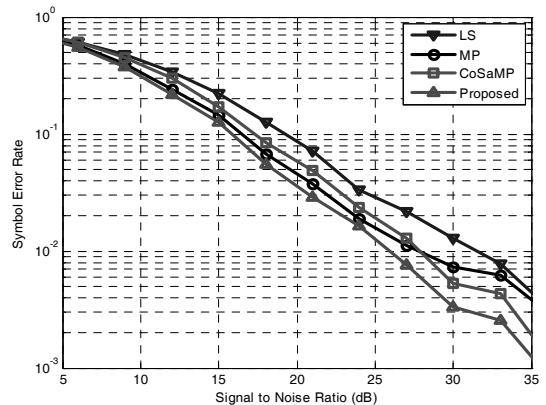


그림 6. 도플러 주파수가 100 Hz인 다중 경로 채널에서 여러 등화 알고리즘의 SER
 Fig. 6. SER of multi-path fading channel in different equalization algorithm at Doppler 100 Hz.

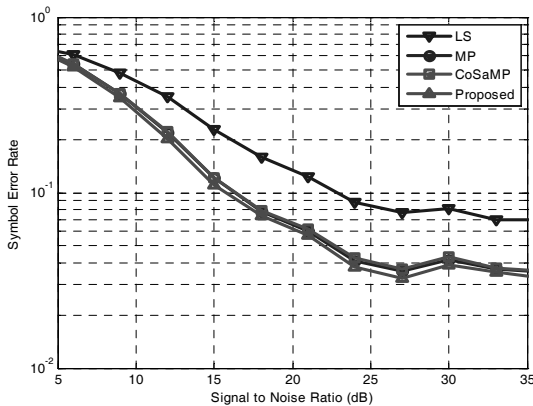


그림 4. 도플러 주파수가 1 kHz인 2-path 채널에서 여러 등화 알고리즘의 SER
 Fig. 4. SER of 2-path channel in different equalization algorithm at Doppler 1 kHz.

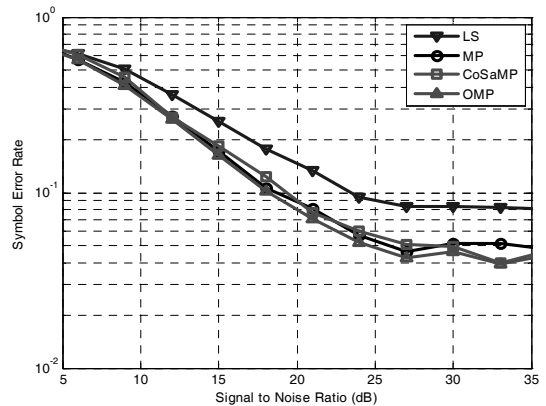


그림 7. 도플러 주파수가 1 kHz인 다중 경로 채널에서 여러 등화 알고리즘의 SER
 Fig. 7. SER of multi-path fading channel in different equalization algorithm at Doppler 1 kHz.

5×10^{-3} 정도의 SER 성능을 보였다. 그림 3은 2-path 채널에서 도플러 100 Hz인 경우로 그림 2와 형태는 거의 같고 SNR 성능도 큰 차이가 없어 아직까지는 도플러보다 SNR의 영향이 큰 것으로 판단된다. 그림 4는 도플러 1 kHz인 경우로 SNR이 2dB에서 SER이 3.5×10^{-2} 정도로 더 이상 좋아지지 않는다. 이 실험에서의 2-path 채널은 2개의 명확한 주요 계수가 있어서 MP, CoSaMP, 제안한 알고리즘 모두 LS 비해 같은 SNR에서 약 3 dB 우수한 특성을 보였다.

그림 5~7은 다중 경로 채널에서 도플러 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz인 경우의 SER이다. 다중 경로 채널은 6개의 계수를 갖으며 계수마다 다른 파워를 갖는다. 그림 5에서는 제안한 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보였으며, LS 방법과 비교하여 같은 SNR에서 약 3 dB 우수하였고 2-path에서의 제안한 방법과 비교해서는 1~2 dB 성능이 나쁘게 나왔다. MP와 CoSaMP 중에서는 MP가 조금 더 나은 성능을 보였다. 도플러 주파수가 100 Hz인 그림 6도 그림 5와 크게 다르지 않은 결과를 보였다. 도플러 주파수가 1 kHz인 그림 7도 SNR 25 dB에서 약 5×10^{-2} 에서 성능이 제한되었다.

모든 그림에서 제안한 방법이 LS보다 약 3 dB 우수하였으며 가장 좋은 성능을 보였다. 제안한 방법은 2개의 채널 계수를 갖는 2-path 환경에서는 MP, CoSaMP와 거의 같은 성능을 보였지만 약한 채널 계수도 포함하고 있는 다중 경로에서는 성능의 차이를 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템 환경에서 OMP 알고리즘을 기반으로 하는 시간 영역 등화 기법을 제안하였다. 시간 영역 등화기법은 주파수 등화 기법에 비해 해상도가 높지만 채널이 길수록 잡음의 영향을 많이 받는 단점이 있었다. 제안된 기법을 기존의 LS 알고리즘과 MP, CoSaMP 알고리즘과 비교하여 모의실험 하였다. 모의실험은 고속 이동 채널을 고려하여 도플러 주파수 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz에서 시행하였다. 실험 결과 제안된 기법이 가장 우수한 성능을 보였으며 LS 방법보다 약 3dB 정도의 SER 향상이 있었다. MP와 CoSaMP 알고리즘과 비교해서는 2-path 채널 환경에서는 비슷하였지만 다중 경로 채널에서는 좀 더 우수한 성능을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Duman and A. Ghayeb, Coding for MIMO Communication Systems, Wiley, 2008.
- [2] W. U. Bajwa, J. Haupt, A. M. Sayeed, and R. Nowak, "Compressed Channel Sensing: A New Approach to Estimating Sparse Multipath Channels," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 6, pp. 1058-1076, Jun. 2010.
- [3] C. R. Berger, Z. Wang, J. Huang and S. Zhou, "Application of Compressive Sensing to Sparse Channel Estimation," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 11, pp. 164-174, Nov. 2010.
- [4] E. J. Candès and M. B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, pp. 21-30, Mar. 2008.
- [5] J. Tropp and A. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, pp. 4655-4666, Dec. 2007.
- [6] S. G. Mallat and Z. Zhang, "Matching Pursuits With Time-Frequency Dictionaries," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 41, no. 12, Dec. 1993.
- [7] D. Needell and J. A. Tropp, "CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 26, no. 3, pp. 301-321, 2008.

 저 자 소 개



문 우 식(정회원)
 2007년 숭실대학교
 정보통신전자공학부 학사
 2009년 숭실대학교
 정보통신공학과 석사
 2009년~현재 숭실대학교
 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 적응 신호처리, 채널 모델링, 통신 시스템, 비선형 신호처리>



임 성 빈(정회원)
 1986년 서울대학교
 전자공학과 학사
 1988년 서울대학교
 전자공학과 석사
 1994년 Univ. of Texas at Austin
 전기및컴퓨터공학과 박사

1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부
 정교수

<주관심분야 : 비선형 신호처리, 통신 시스템, 디지털 방송 시스템>