

# 다중반송파 시스템의 정합추구 기반 희소 다중경로 채널 추정

## Matching Pursuit Based Sparse Multipath Channel Estimation for Multicarrier Systems

김시현

Seehyun Kim

### Abstract

Although linear channel estimation for the frequency selective fading channel has been widely deployed, its accuracy depends on the number of pilots to probe the channel. Thus, it is unavoidable to employ large number of pilots to enhance the channel estimation performance, which essentially leads to the degradation of the transmission efficiency. It even does not utilize the sparseness of the multipath channel. In this paper a sparse channel estimation scheme based on the matching pursuit algorithm and a pilot assignment method, which minimizes the coherence, are proposed. The simulation results reveal that the proposed algorithm shows superior channel estimation performance with fewer pilots to the LS based ones.

### 요약

주파수 선택적 페이딩 채널을 위한 선형 채널 추정 방식의 성능은 파일럿의 개수에 비례하므로 채널 추정의 정확도를 높이기 위해서 많은 파일럿을 쓰지 않을 수 없으며 필연적으로 전송 효율성이 낮아지는 단점이 있다. 또한 다중경로 채널의 희소(sparse)한 특성을 활용하지 않고 있다. 본 논문에서는 압축센싱 기법을 이용하여 아주 적은 수의 파일럿으로 희소한 채널을 추정하는 정합추구 기반 알고리즘과 간섭도(coherence)를 최소화하기 위한 파일럿 배치 방법을 제안한다. 또한 모의 실험을 통해 LS (least square) 채널 추정 방식보다 적은 수의 파일럿으로 우수한 채널 추정 성능을 보임을 확인한다.

*Key words* : multicarrier system, channel estimation, compressive sensing, matching pursuit, pilot assignment

### 1. 서론

다중반송파 시스템은 주파수 선택적 페이딩 채널에  
수원대학교 정보통신공학과 (Dept. of Information and Communication Engineering, Suwon University)

接受日: 2012年 06月 29日, 修正完了日: 2012年 09月 14日  
掲載確定日: 2012年 09月 25日

서도 우수한 전송 능력을 보이기 때문에 고효율 및 고전송율이 필요한 다양한 분야에 적용되어 왔다. 특히 직교주파수분할다중 (OFDM) 방식은 디지털 비디오와 오디오 방송 (DVB-T/DAB), 3GPP LTE 등에 채택되어 그 응용 분야가 매우 광범위하다. 전송율의 증가와 무선 채널의 복잡성으로 인해 정확한 채널 추정의 필요성은 지속적인 연구 주제가 되어 왔다. 블라인드 채널추정 방식에서는 데이터 신호의 통계적인 특성을 이용하여 채널의 상태를 알아낸다. 그러나 이

Table 1. The number of scattered pilots in DVB-T

표 1. DVB-T 시스템의 분산파일럿 수

전송모드	부반송파 수	분산파일럿 수
2K	1705	143
4K	3409	285
8K	6817	569

방식은 아주 큰 행렬의 역행렬을 구하는 등 복잡한 연산을 필요로 한다. 이론적으로는 가능하지만 구현 가능성은 매우 떨어진다. 특히 오차가 전파되기 쉬운 문제점을 안고 있다. 혼련 기반 채널추정 방식은 미전송 심볼에 알려져 있는 신호 즉, 파일럿을 삽입하고 수신부에서 왜곡된 파일럿으로부터 채널의 상태를 알아낸다. 이 과정은 비교적 간단히 구현될 수 있으며, 이는 채널 추정과 데이터 검출 기능을 분리할 수 있어 수신기 구조가 간단해지는 장점도 있다.

최소자승 (least squares, LS) 또는 최소평균제곱오차 (minimum mean square error, MMSE) 등과 같은 선형 채널 추정 방식이 수신된 파일럿으로부터 채널 정보를 추정하는 대표적인 방법으로 널리 사용되어 왔다. 그러나 이러한 방법에서는 채널 추정 성능이 파일럿의 개수에 비례하므로 많은 수의 파일럿을 부반송파에 할당하고 있다. 따라서 전송 효율성이 저하되는 문제점이 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 DVB-T 시스템에서는 약 10%의 부반송파를 파일럿 신호에 사용하고 있다[1].

주파수 선택적 다중경로 페이딩 채널에서는 지연확산 (delay spread)이 크지만 희소(sparse)한 임펄스 응답을 가진다. 0이 아닌 값을 가진 탭의 개수를 희소도 (sparsity)라고 하는데, 일반적인 다중경로 채널의 희소도는 반송파의 개수에 비해 볼 때 매우 적다. 지상에서의 무선 통신을 위해 COST207에서 정의한 typical urban (TU6) 모델은 긴 지연시간과 큰 파워를 갖는 6개의 경로로 구성되며 표 2와 같다. (이 경우 희소도는 6이다.) 수중 음파 채널도 비슷한 특성을 가지고 있다[2].

압축센싱 이론을 활용하면 희소한 다중경로 채널을 적은 수의 파일럿을 사용하고도 높은 정확도의 임펄스 응답을 추정할 수 있다. 정합추구(matching pursuit) 알고리즘은 탐욕(greedy) 알고리즘의 일종으로 압축센싱 문제에 대해 순차적으로 해를 찾는다. 제2장에서는 다중반송파 시스템의 채널추정 문제를

Table 2. Typical Urban profile (TU6) constitution

표 2. TU6 채널 모델의 구성

탭 번호	지연 ( $\mu s$ )	파워 (dB)
1	0.0	-3
2	0.2	0
3	0.5	-2
4	1.6	-6
5	2.3	-8
6	5.0	-10

알아보고 수학적 모델을 세운다. 제3장에서는 먼저 압축센싱 이론의 적용 가능성을 알아본 후 압축센싱 이론을 적용하기 위한 기본 환경으로서 파일럿의 배치 방식을 제안한다. 이어서 정합추구 기반 채널 추정 알고리즘을 제안한다. 제4장에서는 모의실험을 통해 제안된 알고리즘을 선형 채널 추정 방식과 비교하여 적은 수의 파일럿으로도 우수한 채널 추정 성능을 얻을 수 있음을 보인다.

## II. 다중반송파 시스템의 채널추정

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템에서 충분한 보호구간과 완벽한 동기를 가정하면 ISI (inter-symbol interference)와 ICI (inter-carrier interference)를 무시할 수 있다. Comb 타입 파일럿 배치를 채용한 OFDM 시스템에서  $k$ 번째 부반송파  $Y(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Y(k) = X(k) \cdot H(k) + W(k) \quad (1)$$

단  $X(k)$ 는 송신 신호이고,  $H(k)$ 는 채널 주파수 응답이며,  $W(k)$ 는 AWGN 잡음이다.  $\phi$ 를 모든 파일럿의 인덱스의 집합이라고 하면, LS 방식에 의한  $k_p$  번째 부반송파의 주파수 응답 추정치는 다음과 같다 (단,  $k_p \in \phi$ ).

$$\tilde{H}(k_p) = \frac{Y(k_p)}{X(k_p)} = H(k_p) + \frac{W(k_p)}{X(k_p)} \quad (2)$$

일반적인 선형 추정기는 데이터 부반송파의 주파수

응답을 파일럿 부반송파의 주파수 응답, 즉  $\tilde{H}(k_p)$ 을 보간하여 구한다. 따라서 허용 가능한 수준의 MSE(mean square error)를 갖는 주파수 응답을 구하기 위해 많은 파일럿이 필요하다.

다중경로 채널의 최소한 특성을 이용하면 주파수 응답을 직접 구하는 대신 임펄스 응답 (channel impulse response)을 수신된 파일럿으로부터 구할 수 있다. 구해진 임펄스 응답은 DFT를 통해 주파수 응답으로 변환되어 등화에 사용된다. 파일럿의 개수를  $M(=|\phi|)$ , 임펄스 응답의 길이를  $L$ 이라고 하자. 단  $L$ 은 보호구간의 길이보다 클 수 없다. 즉, FFT 길이가  $N$ 이고 보호구간의 길이가  $N/4$ 라면  $L \leq N/4$ 이다. 임펄스의 응답  $h$ 를 이용하여 파일럿이 할당된 부반송파의 주파수 응답의 행렬-벡터 표현은 다음과 같다. 이후 편의상 첨자는 생략하기로 한다.

$$\tilde{H} = \Psi \cdot h + n \quad (3)$$

$\tilde{H}$ 는 파일럿의 LS 추정치이며  $(M \times 1)$ ,  $h$ 는 최소한 임펄스 응답인  $L \times 1$  벡터이고,  $n$ 는  $M \times 1$  오차 벡터이다.  $\Psi$ 는  $N$ -포인트 DFT 행렬에서  $\phi$ 에 속한 행에 대하여 각 행의 앞  $L$ 열만 추출한  $M \times L$  부분 DFT 행렬이며 다음과 같다.

$$\Psi = \begin{bmatrix} W^{k_0 0} & \dots & W^{k_0(L-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W^{k_{M-1} 0} & \dots & W^{k_{M-1}(L-1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

또한

$$W^{mn} = e^{-j2\pi mn/N} \quad (5)$$

이다.  $M \ll L$ 이라면 식 (3)은 under-determined 상태로 해가 유일하지 않다. 즉,  $\Psi$ 의 영공간(null space)에 존재하는 임의의 벡터  $v$ 를 더한  $h + v$ 도 식 (3)을 만족한다. 다중경로 채널에서  $h$ 는 최소한 특성이 있으므로 압축센싱 이론에 따르면  $\tilde{H}$ 로부터  $h$ 를 구할 수 있다[3].

### III. 정합추구 기반 채널 추정 방법

#### 1. 압축센싱의 적용

식 (3)를 풀 수 있는 방법은 여러 가지가 알려져 있다. 가장 보편적으로 사용되어 온  $l_2$  norm 최소화 방법은 해가 알려져 있지만 그 해가 최소하지 않다는 문제가 있다.  $l_0$  norm 최소화 방법은 최소한 해를 얻을 수 있지만  $h$ 에 대한 모든 가능한 후보에 대해 검사하여야 하므로 계산량이 NP hard의 복잡도를 가지게 된다. 따라서 실시간 구현에 적합하지 않다. 한편  $l_1$  norm을 최소화 하는 문제는 다음과 같다.

$$\hat{h} = \arg \min \|h\|_1 \text{ s.t. } \|\tilde{H} - \Psi h\|_2 < \epsilon \quad (6)$$

$\epsilon$ 는 허용 가능한 오차의 크기이다. 이 방법을 이용하면 단지  $M > cS \log(L/S)$ 개의 측정값으로 최소도가  $S$ 인  $h$ 를 높은 확률로 복원할 수 있다[4].  $c$ 는 상수이다. 이 최적화 문제는 linear programming 기법인 기저추구 (basis pursuit) 방법으로 풀 경우 계산 복잡도는 약  $O(L^3)$ 이 된다. 이 계산량 또한 과도하여 실용적이지 못하므로 탐욕 알고리즘에 기반한 많은 연구가 이어졌으며, CoSaMP 방식은 계산량을  $O(SML)$ 으로 줄였다[8]. 그 외에 regularized OMP (ROMP)[9], stagewise OMP (StOMP)[10], subspace pursuit (SP)[11] 등이 OMP를 개선하기 위해 제안되었다.

Candes 등은  $\Psi$ 가 RIP(restricted isometry property)를 만족하면  $l_1$  norm 최소화 기법으로  $h$ 를 복원할 수 있음을 보였다[5]. RIP는 행렬의 투사 특성이 균일함을 의미하며, 다음과 같다.

$$1 - \delta < \frac{\|\Psi x\|_2}{\|x\|_2} < 1 + \delta \quad (7)$$

그러나 이 조건을 확인하기 위해서는 모든 가능한  $x$ 에 대해서 검사하여야 하므로 NP hard 문제이다. 이 방법 대신 Donoho와 Huo는 측정 행렬  $\Psi$ 의 열 간의 간섭도(coherence)을 이용하여 그 행렬이 신호 벡터의 정보를 잘 보존하는지의 여부를 알아보았다[6].  $\psi_i$ 를  $\Psi$ 의  $i$ 번째 열벡터라고 하면 간섭도는 다음과 같다.

$$\mu_{\Psi} = \max_{0 \leq i, j \leq L-1, i \neq j} \frac{|\langle \psi_i, \psi_j \rangle|}{\|\psi_i\| \cdot \|\psi_j\|} \quad (8)$$

$\mu_{\Psi}$ 가 작을수록 측정값은 원 신호의 정보를 더 잘 보존한다. 특히 탐욕 알고리즘에서는 RIP 차수보다 간섭도가 성능에 더 큰 영향을 준다. [7]에 따르면  $\mu_{\Psi} < 1/2s$ 일 때  $l_1$  norm 최소화나 탐욕 알고리즘으로 최소도가  $s$ 인 신호 벡터를 완벽하게 복원할 수 있으며 그 해가 유일함이 증명되었다.

파일럿을 이용한 희소 채널의 추정 문제에서는 파일럿의 위치에 의해  $\Psi$ 가 결정되므로 압축센싱 기법의 채널 추정 알고리즘의 성능을 보장하기 위해서  $\mu_{\Psi}$ 가 작은 파일럿 배치 방법이 필요하다.

## 2. 파일럿 배치

$\Psi$ 는  $N \times N$  DFT 행렬의  $M \times L$  부분 행렬이므로 모든 열벡터의 크기는  $\sqrt{M}$ 이고 열벡터  $\psi_i$ 와  $\psi_j$ 간의 내적은  $d_c = j - i$ 에 의해 결정된다. 즉,

$$\langle \psi_i, \psi_j \rangle = \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j2\pi k_m d_c / N} \quad (9)$$

한편 파일럿 위치의 차를  $d_p = k_m - k_n$ 라고 정의하면, 내적의 크기의 제곱은 다음과 같다.

$$|\langle \psi_i, \psi_j \rangle|^2 = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} e^{-j2\pi d_p d_c / N} \quad (10)$$

위 식은  $M^2$ 개 항의 합이며 그 값이 가장 클 때의  $\{i, j\}$ 에서  $\langle \psi_i, \psi_j \rangle$ 가 최대가 되며, 간섭도의 값을 결정한다. 따라서 식 (10)이 최소가 되도록  $\{k_p\}$ 를 정해야 한다.  $\sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi n/N} = 0$  이므로 식 (10)의  $N$ 개의 항들을 단위원(unit circle) 상에서 균등하게 분포시킬 수 있다면 간섭도를 최소화 할 수 있다. 그러나  $M \ll N$ 이므로 간섭도를 작게 만들기 어렵다. 만약  $d_p$ 가  $N/L$ 의 배수라면  $L$ 개의 항으로 단위원을 채울 수 있다. 즉, 파일럿을  $N/L$ 의 배수만큼 떨어뜨리고, 파일럿의 차이가 서로 다르게 배치하면

간섭도를 작게 만들 수 있다.

## 3. 정합추구 기반 채널 추정

희소한 신호의 복원 문제는 최근 연구자들의 많은 관심을 받아왔으며 이 문제를 풀기위한 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 그 중 정합추구 (matching pursuit, MP) 알고리즘은 가장 계산이 단순하며 하드웨어의 구현에 적합하다. 정합추구 알고리즘을 개선한 orthogonal matching pursuit 알고리즘은 문제 해결 시간은 빠르나 연산량 부담이 크다.

식 (3)을 풀기 위해 먼저 정합추구 알고리즘을 이용하여  $h$ 의 0이 아닌 성분의 위치를 찾는다. 초기화 과정으로 측정값  $\tilde{H}$ 를 잔류신호(residual)의 초기값으로 삼는다 ( $r_0 = \tilde{H}$ ). 첫 번째 단계로  $\Psi$ 의 열벡터 중에서  $r_0$ 를 투사시켰을 때 그 크기가 가장 큰 벡터  $\psi_{i_1}$ 를 찾는다. 그리고  $r_0$ 를  $\psi_{i_1}$ 에 투사시켜 얻은 값을  $r_0$ 에서 빼서 새로운 잔류신호,  $r_1$ 으로 삼는다. 그 다음  $r_1$ 의 투사값이 가장 큰  $\psi_{i_2}$ 를 찾아  $r_2$ 를 구한다. 종료 조건이 만족되기 전까지 잔류신호와 가장 잘 맞는 열벡터를 찾는 위 과정을 순차적으로 반복하여  $h$ 의 0이 아닌 성분의 위치를 찾는다. 이 때 반복한 횟수는  $h$ 의 희소도  $s$ 가 된다.

이어서  $s$ 개의  $h$ 의 0이 아닌 성분의 값을 LS 방법으로 복원한다. 먼저  $i_s$ 번째 임펄스 응답  $h_{i_s}$ 는  $r_s$ 를  $\psi_{i_s}$ 로 나누어 구하고, 이어서  $h_{i_{s-1}}$ 부터  $h_{i_1}$ 을 차례로 구한다. 이 과정을 정리하면 다음과 같다.

---

입력:  $\tilde{H}, \Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_L]$

출력:  $h$

---

$r_0 = \tilde{H}$

$P_k = \frac{\psi_k \psi_k^H}{\|\psi_k\|^2}, 1 \leq k \leq L$

$j = 1$

repeat

---

---


$$i_j = \arg \max_k \| P_k r_{j-1} \|$$

$$r_j = r_{j-1} - P_{i_j} r_{j-1}$$

$$j = j + 1$$

**until**  $j = L$  또는  $\| r_j \| \leq \epsilon$

**repeat**

$$h_{i_j} = r_j / \psi_{i_j} |_{LS}$$

$$j = j - 1$$

**until**  $j = 0$

---

#### IV. 모의 실험

제안된 정합추구 기반 채널추정 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 다중경로 채널에 대한 다중반송파 시스템의 수신 성능을 모의 실험을 통해 비교하였다. 실험 환경은 다음 표 3과 같다.

먼저 제안된 정합추구 기반 채널추정 방식의 성능 평가를 위해 제3장에서 기술된 파일럿 배치 방법을 사용하였다. 사용한 채널 모델인 TU6의 회소도가 6이

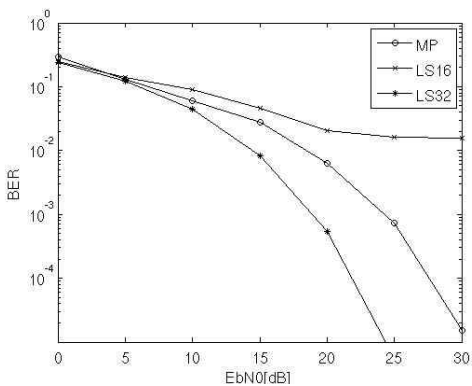


Fig. 1. BER performance of the MP based channel estimation algorithm.

그림 1. 정합추구 기반 채널추정 알고리즘의 BER 성능

Table 3. Common parameters for simulation

표 3. 공통 모의실험 설정

FFT 크기 ( $N$ )	256
부반송파 변조 형식	16 QAM
채널 모델	TU6
보호 구간 길이 ( $L$ )	1/4 (64)
Eb/N0	0 ~ 30 dB
반복 횟수	1000

므로 파일럿의 개수  $N_p$ 로는 8을 사용하였고 이는 전체 부반송파 개수의 3.1%에 해당한다. 위치는 서로의 차이가  $N/L = 4$ 의 배수이며 서로 다르도록 할당하였으며 다음과 같다.

$$\phi = \{4, 8, 16, 32, 64, 128, 192, 252\}$$

제안된 정합추구 기반 채널추정 알고리즘으로 임펄스 응답을 구한 후 FFT를 통해 데이터 부반송파의 주파수 응답을 얻었다. 이를 이용하여 수신된 데이터 부반송파 신호를 등화하고 BER을 측정하였다. 비교를 위해 LS 기반의 채널 추정 방식으로 모의 실험을 병행하였다. 파일럿은 균일하게 배치하였고, 각 파일럿으로부터 채널의 주파수 응답을 LS 방법으로 구한 후 보간을 통해 데이터 부반송파의 주파수 응답을 얻었다. 파일럿의 개수는 16과 32를 사용하였다. 이는 각각 전체 부반송파 개수의 6.3%와 12.5%에 해당한다. 세 가지 실험 조건에 대한 BER 특성은 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 8개의 파일럿을 사용한 정합추구 기반 채널추정의 성능이 16개의 파일럿을 사용한 LS 방식의 채널추정보다 낮은 BER 특성을 보임을 알 수 있다. 즉 제안된 파일럿 배치 방법을 이용한 정합추구 기반 채널추정 기법을 이용하면 회소 채널에 대해 다중부반송파 전송 방식의 데이터 전송율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

채널 추정 성능을 비교하기 위해 복원된 채널 주파수 응답의 MSE(mean square error)도 평가하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 BER과 MSE는 서로 깊은 연관성이 있으므로 비슷한 결과를 얻었다. MSE를 구하는 식은 다음과 같다.

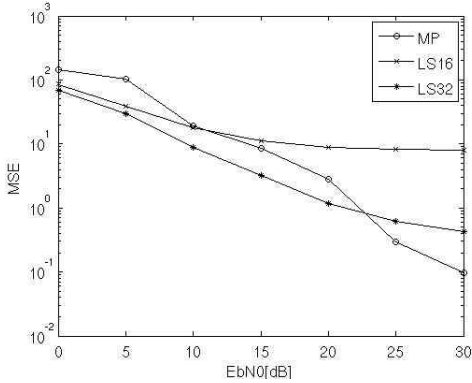


Fig. 2. Comparison of MSE of the channel frequency response.

그림 2. 채널 주파수 응답의 MSE 비교

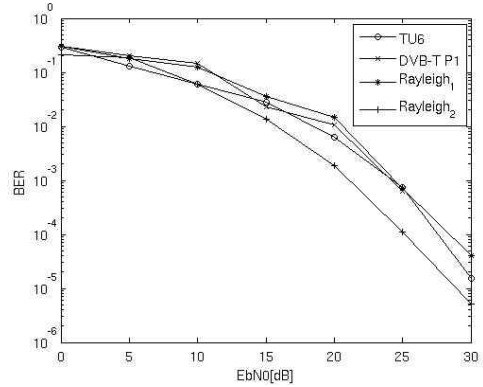


Fig. 3. Comparison of BER performances in various channel models.

그림 3. 채널 모델에 따른 BER 성능 비교

### V. 결론

본 논문에서는 다중반송파 시스템을 위한 정합추구 알고리즘 기반의 채널 추정 알고리즘과 이를 위한 파일럿 배치 방식을 제안하였다. 최소한의 특성을 갖는 다중경로 페이딩 채널 환경에서 수행한 모의 실험 결과에 따르면 제안된 다중반송파 시스템은 같은 BER 성능을 갖는 LS 기반 채널 추정 시스템에 비해 파일럿의 개수를 50% 이상 줄여도 더 높은 수신 성능을 보임을 알 수 있다. 즉 제안된 방식을 채용하여 동일한 개수의 부반송파를 갖는 다중반송파 시스템의 전송 효율을 증가시킬 수 있다.

### 참고문헌

[1] ETSI EN 300 744: Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, v.1.5.1, 2004-11.  
 [2] M. Kocic, D. Brady and M. Stojanovic, "Sparse equalization for real-time digital underwater acoustic communications," *Proc. OCEANS '95*, pp. 1417-1422.  
 [3] D. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans., Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp.

$H_n$ 은  $n$ 번째 부반송파의 이론적인 채널 응답이고,  $\widetilde{H}_n$ 은 해당 알고리즘에 의한 채널 응답이다.  $E_b/N_0$ 가 10dB보다 크면 정합추구 방식의 채널추정 알고리즘이 16개의 파일럿을 이용한 LS 방식보다 우수한 성능을 보였으며,  $E_b/N_0$ 가 20dB보다 크면 32개의 파일럿을 사용한 LS 방식보다도 낮은 MSE를 보였다.

채널의 변화에 대한 BER 성능의 추이를 관찰하기 위해 DVB-T P1 모델[12]과 임의의 Rayleigh 모델에 대해서 성능 실험을 추가로 수행하였다. P1 모델은 채널의 탭 수는 12이나 TU6와 동일한 실험 조건을 구성하기 위해 최소도가 6이 되도록 파워가 작은 탭들은 제외시켰다. 그림 3에서 보는 바와 같이 네 가지 채널 모델에 대한 BER 성능이 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 즉, 제안된 정합추구 기반 채널 추정 알고리즘이 채널 특성 변화에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

1289-1306, Apr, 2006.

[4] E. Candes, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489-509, February, 2006.

[5] E. Candes and T. Tao, "Decoding by linear programming," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4203-4215, Dec. 2005.

[6] D. Donoho and X. Huo, "Uncertainty principles and ideal atomic decomposition," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 47, no. 7, pp. 2845-2862, November, 2001.

[7] J. A. Tropp, "Greed is good: algorithmic results for sparse approximation," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 50, no. 10, pp. 2231-2242, Oct. 2004.

[8] D. Needell and J. A. Tropp, "CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples," *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, vol 26, no. 3, pp. 301-321, May 2009

[9] D. Needell and R. Vershynin, "Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. J. Selected Topics of Signal Processing*, vol. 4, no. 2, pp. 310-316, Apr. 2010

[10] D. Donoho, Y. Tsaig I. Drori, and J. Starck, "Sparse solution of underdetermined linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 58, no. 2, pp. 1094-1121, Feb. 2012.

[11] W. Dai and O. Milenkovic, "Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 55, no. 5, pp. 2230-2249, May. 2009.

[12] ETSI TR 102 377: *Digital Video Broadcasting (DVB): DVB-H Implementation Guidelines*, 2006

## 저 자 소 개

### 김 시 현 (정회원)



1990년 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사)

1992년 : 서울대학교 대학원 제어계측공학과 (공학석사)

1996년 : 서울대학교 대학원 제어계측공학과 (공학박사)

2010년 3월~현재 : 수원대학교

정보통신공학과 전임강사

<주관심분야> 디지털통신, 신호처리, 멀티미디어 신호처리, 신호처리용 반도체 구조