

논문-05-10-2-05

Matching Pursuit 방식을 이용한 OFDM 시스템의 채널 추정

최재환^{a)}, 임채현^{a)}, 한동석^{a)†}, 윤대중^{a)}

Channel estimation of OFDM System using Matching Pursuit method

Jae Hwan Choi^{a)}, Chae Hyun Lim^{a)}, Dong Seog Han^{a)†}, and Dae Jung Yoon^{a)}

요약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중 접속 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 시스템에서 MP (matching pursuit) 알고리즘을 이용하는 이동 채널 추정법을 제안한다. OFDM 시스템에서 기존의 채널추정 알고리즘으로 쓰이는 LS (least square) 알고리즘은 잡음의 영향으로 채널 추정 오류의 가능성을 가지고 있다. 본 논문에서는 MP 알고리즘을 이용하여 스파스 (sparse) 형태의 채널을 추정함으로써 다중경로 신호가 없다고 가정되는 시간 구간에서 발생할 수 있는 잡음에 의한 영향을 줄인다. 그리고 연속으로 전송되는 파일럿 정보를 이용하여 변화하는 채널을 추정한다. 64QAM, 그리고 이동 다중 경로 페이딩 채널에 대해서 심볼 오류를 측정하여 제안된 알고리즘과 LS 알고리즘의 성능을 비교한다.

Abstract

In this paper, we propose a mobile channel estimation algorithm using matching pursuit algorithm for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. Least square (LS) algorithm, which is used as a conventional channel estimation algorithm for OFDM systems, has error probability of channel estimation affected by effects of noise. By estimating the channel of sparse type, the proposed algorithm reduces effects of noise during time intervals that multi-path signal doesn't exist. The proposed algorithm estimates a mobile receiving channel using pilot information transmitted consequently. We compare performance of the proposed algorithm with the LS algorithm by measuring symbol error rate with 64QAM under a mobile multi-path fading channel model.

Keywords : OFDM, channel estimation, sparse type, LS estimation

I. 서론

OFDM은 다중 경로 환경에 강인하고 고속전송에 유리하기 때문에 방송, 통신 융합을 위한 핵심적인 전송 방식으로 자리

잡고 있다. 또한 이동 환경에서 멀티미디어 서비스에 대한 소비자의 욕구가 증가되면서 이동 채널 환경을 극복할 수 있는 채널 추정 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

도시의 이동 수신환경에서는 밀집한 건물과 이동중인 수신체로 인해 복잡한 다중경로환경과 도플러 효과가 나타난다. 이는 주파수 선택적 채널을 시간적으로 변화시키므로 더욱 열악한 채널 환경을 구성하게 된다. 기존의 방송용 수신기에서는 수신된 훈련열을 이용하는 LS 알고리즘의 채

a) 경북대학교 전자공학과
School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업과 한국과학재단 목격기초연구(R05-2003-000-11108-0) 지원으로 수행되었음.

널 보상이 일반적이다^{[1][2]}. 그러나 이는 고정 채널에서의 채널 보상을 위해 제시된 알고리즘이며, 잡음에 대한 채널 추정 오류의 가능성을 가지고 있다.

본 논문에서는 잡음에 대한 채널 추정 오류의 확률이 낮고 고속 이동에서도 채널 변화를 추적하기 위해 연속 파일럿과 MP 알고리즘을 이용한 OFDM 시스템의 채널 추정기법을 제안한다. MP 알고리즘은 역행렬을 사용하지 않고 연립방정식의 해를 근사적으로 구하는 수학적 기법으로서 시간 영역에서의 채널 정보를 선택적으로 추정한다^[3]. 즉 예상되는 다중경로 성분의 개수에 따라 추정 횟수가 결정되고, 추정 횟수만큼의 다중경로 신호의 경로 정보를 획득한다. 다중경로 성분의 개수는 MDL(minimum description length)로 추정된다^[4]. MP 알고리즘에서는 추정된 경로의 지연시간 이외에는 추가적인 다중경로가 없다고 가정하고 스파스(sparse) 형태의 채널 정보를 획득한다^{[5][6]}. 따라서 다중경로가 없다고 가정되는 시간영역의 채널 구간에서 발생할 수 있는 잡음의 효과를 줄인다^[7]. 또한 반복적으로 전송되는 파일럿 정보를 이용하여 실시간으로 채널의 변화를 따라간다^[8].

2장에서는 기저대역 시스템을 모델링하고 3장에서는 본 논문에서 제안하는 MP 알고리즘과 파일럿을 이용하는 채널 추정 방법을 설명한다. 4장에서는 MDL을 이용하여 다중경로의 수를 추정하는 방법을 설명한다. 5장에서는 3장에서 설명한 알고리즘과 LS 채널추정 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 전산 모의 실험 결과를 보이고, 6장에서는 이를 바탕으로 결론을 내린다.

II. 기저대역 시스템 모델과 LS 알고리즘

송신 신호의 데이터와 파일럿의 구성은 그림 1과 같다. 신호는 N 개의 부반송파에 의해서 전송되고 N_p 개의 부반송파마다 파일럿이 배치된다. OFDM 시스템에서 송신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_i(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{i,k} e^{j2\pi kn/N}, \quad i = 0, 1, \dots, I-1 \quad (1)$$

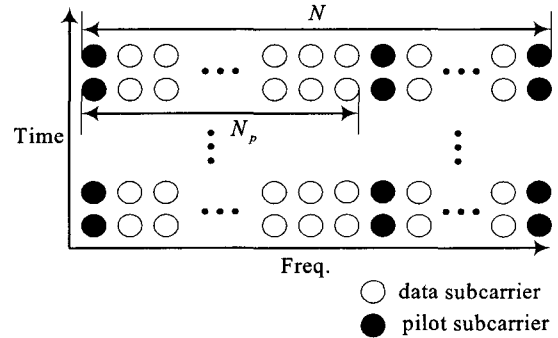


그림 1. 데이터와 파일럿 배치
Fig. 1. Data and pilot arrangement.

$x_{i,k}$ 는 i 번째 OFDM 심볼의 k 번째 부반송파의 샘플을 나타내며, I 는 OFDM 심볼의 수를 나타낸다. 생성된 OFDM 심볼이 전송될 때 겪는 다중경로 페이딩 채널은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$h(\tau, t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l) \quad (2)$$

$h_l(t)$ 는 l 번째의 복소 이득을 나타내고, L 은 다중경로의 수를 의미한다. T_d 를 N 개의 부반송파 데이터의 시간 간격이라 하고 동기가 정확하다고 가정하면, 샘플링 비율 $T_s = T_d / N$ 로 샘플링한 수신 신호는 다음과 같다.

$$y(iT_s) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) s(iT_s - \tau_l) + n(iT_s), \quad i = 0, 1, \dots, I-1 \quad (3)$$

$n(t)$ 는 시간영역의 백색잡음을 의미한다. 보호 구간을 제거하고 남은 N 개의 샘플들로 N 포인트 푸리에 변환을 하면, i 번째 OFDM 심볼의 k 번째 부반송파 샘플은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{i,k} = X_{i,k} H_{i,k} + M_{i,k}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

여기서 $M_{i,k}$ 는 주파수 영역의 백색잡음을 나타내고

$H_{i,k}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$H_{i,k} = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(iT_s) e^{-j2\pi \frac{kl}{T_d}} \quad (5)$$

채널 응답 $\hat{H}_{i,k}$ 가 추정되면 전송된 데이터 샘플은 식 (5)의 LS 알고리즘에 의해 보상이 이루어질 수 있다. 그러나 LS 방식에서는 백색 잡음의 영향 또한 채널 추정에 함께 고려되므로 채널 추정의 정확성이 떨어진다^[3].

$$\hat{H}_{i,k} = \frac{Y_{i,k}}{X_{i,k}} = H_{i,k} + \frac{M_{i,k}}{X_{i,k}} \quad (6)$$

식 (6)의 $M_{i,k}/X_{i,k}$ 이 백색잡음에 의한 영향을 나타낸다.

III. MP알고리즘과 연속 파일럿을 이용한 채널 추정

채널 추정은 수신된 신호를 송신 신호가 지연된 신호들의 선형 결합으로 나타내는 것이라 할 수 있다. 즉 송신 신호의 모든 지연된 신호들 중에서 어떤 신호들이 선형 결합되고 또 그 지연된 신호들이 각각 얼마의 이득을 가지고 선형 결합되는 지를 결정하는 것이 채널 추정이라 할 수 있다. MP 알고리즘은 수신된 신호를 송신 신호가 지연된 신호들에 정사영시켜서 가장 큰 값을 나타내는 지연 신호

의 지연 시간을 찾고 해당 지연 신호의 이득을 구하는 과정을 반복하여 채널을 추정한다.

본 논문에서는 그림 2에서와 같이 파일럿을 추출하여 위에서 말한 송신신호와 수신신호인 **a** 와 **b** 를 구성한다. 먼저 파일럿의 위치 인덱스를 다음과 같이 정의한다.

$$p(m) = m \times N_p, \quad m = 0, 1, \dots, \frac{N}{N_p} - 1 \quad (7)$$

그리고 송신신호와 수신신호의 파일럿 위치의 데이터를 이용하여 **r** 과 **P** 를 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{r} = [r_0 \ r_1 \ \dots \ r_{N-1}]^T, \quad \mathbf{P} = [p_0 \ p_1 \ \dots \ p_{N-1}]^T \quad (8)$$

여기서 r_k 와 p_k 는 다음과 같다.

$$r_k = \begin{cases} Y_{p(m)}, & \text{for } k = p(m) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad p_k = \begin{cases} X_{p(m)}, & \text{for } k = p(m) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

r 과 **P** 를 N 포인트 역 이산푸리에 변환한 결과를 **a** 와 **b** 라고 행렬로 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{a} = \mathbf{Fp}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{Fr} \quad (10)$$

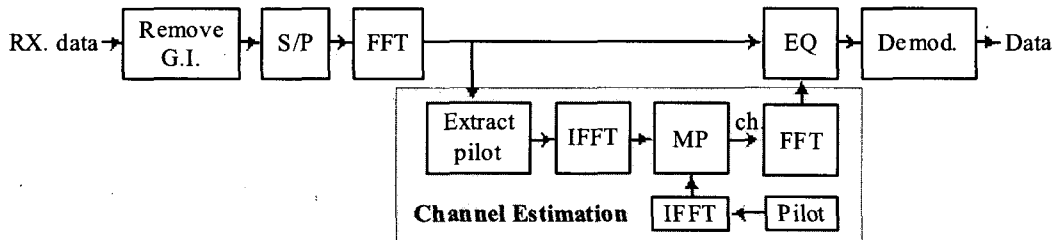


그림 2. 수신기의 채널 추정 블록
Fig. 2. Channel estimation block of receiver.

$$\mathbf{F} = \frac{1}{N} \begin{pmatrix} e^{\frac{j2\pi 0}{N}} & e^{\frac{j2\pi 1}{N}} & \dots & e^{\frac{j2\pi(N-1)}{N}} \\ e^{\frac{j2\pi 0}{N}} & e^{\frac{j2\pi 1}{N}} & \dots & e^{\frac{j2\pi(N-1)}{N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\frac{j2\pi 0}{N(N-1)}} & e^{\frac{j2\pi 1}{N(N-1)}} & \dots & e^{\frac{j2\pi(N-1)}{N(N-1)}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서 \mathbf{F} 는 N 포인트 역 이산푸리에 변환 행렬이다 $\mathbf{a} = \mathbf{a}_0, \mathbf{b} = \mathbf{b}_0$ 라고 하고 \mathbf{a} 가 j 샘플 지연된 신호를 \mathbf{a}_j , 채널의 길이를 d 라고 한다. \mathbf{a}_j 의 처음 j 개의 원소는 영이다.

$$\mathbf{a}_j = [0, \dots, 0, a(0), \dots, a(N-j-1)], \quad j = 0, 1, \dots, l-1 \quad (12)$$

\mathbf{b}_0 를 \mathbf{a}_j 들에 정사영시켰을 때 그 제곱값이 가장 큰 지연시간 j 를 j_l 이라 한다. P 번째로 크기가 큰 다중 경로 신호의 지연시간을 나타내는 j_p 는 다음과 같다.

$$j_p = \arg \max_j \frac{|\mathbf{a}_j^H \mathbf{b}_{p-1}|^2}{\|\mathbf{a}_j\|^2}, \quad j = 1, 2, \dots, \hat{L}, \quad j \neq j_{p-1} \quad (13)$$

\hat{L} 은 MDL로 추정된 다중경로의 수로서 4장에서 설명된다. 잔여벡터 \mathbf{b}_p 는 다음과 같이 반복적으로 계산된다.

$$\mathbf{b}_p = \mathbf{b}_{p-1} - \hat{c}_{j_p} \mathbf{a}_{j_p} \quad (14)$$

식 (13)에 의해 채널 탭 계수가 결정된다.

$$\hat{c}_{j_p} = \frac{(\mathbf{a}_{j_p}^H \mathbf{b}_{p-1})}{\|\mathbf{a}_{j_p}\|^2} \quad (15)$$

j_p 와 \hat{c}_{j_p} 를 구하는 위의 절차를 다중경로의 수 \hat{L} 만큼 반복하여 다음과 같이 시간영역의 채널을 추정하게 된다.

$$\hat{\mathbf{h}} = [\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_N]^T, \quad \hat{h}_n = \begin{cases} \hat{c}_{i, j_p}, & \text{for } n = j_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

식 (17)의 $\hat{\mathbf{h}}$ 를 푸리에 변환하여 주파수 영역 채널 $\hat{\mathbf{H}}$ 을 얻고 이를 등화에 이용한다.

$$\hat{\mathbf{H}} = N\bar{\mathbf{F}}\hat{\mathbf{h}} \quad (17)$$

여기서 $(\bar{\cdot})$ 는 복소공액을 의미한다. 원소들은 그림 2에서 등화에 최종적으로 업데이트 되는 채널 탭 계수이다. 이와 같은 채널 추정과 보상을 매 심볼마다 실시하여 고속 이동 환경에서도 채널의 변화를 추적하게 된다.

IV. MDL을 이용하여 다중경로의 수를 추정

MP 알고리즘을 채널추정에 이용하기 위해서는 채널의 길이와 다중경로의 수가 필요하다. 채널의 길이는 보호구간 이내라고 가정하고 다중경로의 수는 MDL로 추정한다^[4]. MDL은 정현 신호의 수를 추정하는 방법 중 가장 널리 쓰이는 방식이다^{[9][10]}. 식 (7)의 파일럿 위치에서의 채널 주파수 응답 $\hat{H}_{i,p(m)}$ 를 이용하여 $Q(i)$ 를 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{Q}(i) = \begin{pmatrix} \hat{H}_{i,p(0)} & \hat{H}_{i,p(1)} & \dots & \hat{H}_{i,p(K-1)} \\ \hat{H}_{i,p(1)} & \hat{H}_{i,p(2)} & \dots & \hat{H}_{i,p(K)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{H}_{i,p(M-K)} & \hat{H}_{i,p(M-K+1)} & \dots & \hat{H}_{i,p(M-1)} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$\mathbf{Q}(i)$ 를 이용하여 샘플 채널 상관 행렬 $\hat{\mathbf{R}}$ 를 구한다.

$$\hat{\mathbf{R}}(i) = \frac{1}{2K} \left(\mathbf{Q}(i)\mathbf{Q}(i)^H + \overline{\mathbf{J}\mathbf{Q}(i)\mathbf{Q}(i)^H\mathbf{J}} \right) \quad (19)$$

여기서 $(\bar{\cdot})$ 는 복소공액을 의미하고, $(\bar{\cdot})^H$ 는 공액전치를 의미한다. \mathbf{J} 는 대각성분은 0이고 나머지 성분은 1인 행렬을 나타낸다.

$\hat{\mathbf{R}}$ 는 I 개의 OFDM 심볼에 대한 $\hat{\mathbf{R}}(i)$ 의 평균이다.

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^{I-1} \hat{\mathbf{R}}(i) \quad (20)$$

$\hat{\mathbf{R}}$ 를 고유치 분해를 하여 $M-K+1$ 개의 고유치들 $\hat{\lambda}_1 \geq \dots \geq \hat{\lambda}_{M-K+1}$ 와 그에 해당하는 고유치 벡터들 $\hat{\mathbf{u}}_1, \dots, \hat{\mathbf{u}}_{M-K+1}$ 를 구한다. 여기서 M 은 전체 부반송파 중에서 파일럿의 전송에 이용되는 부반송파의 수이고 K 는 $M-K \leq L$ 이 되도록 설정되어야 한다.

$$\hat{\mathbf{R}} = \sum_{k=1}^{M-K+1} \hat{\lambda}_k \hat{\mathbf{u}}_k \hat{\mathbf{u}}_k^H \quad (21)$$

고유치들을 이용하여 다음의 식 (22)번과 같이 MDL을 구하고 그 값들 중에서 가장 작은 값을 나타내는 ρ 에 대한 \hat{L} 을 식 (23)에 의하여 추정한다^[10].

$$\text{MDL}(\rho) = -I(M-K+1-\rho) \times \log \left\{ \frac{\left(\prod_{k=\rho+1}^{M-K+1} \hat{\lambda}_k \right)^{I/(M-K+1-\rho)}}{\frac{1}{M-K+1-\rho} \sum_{k=\rho+1}^{M-K+1} \hat{\lambda}_k} \right\} \quad (22)$$

$$+ \frac{1}{4} \rho [2(M-K+1) - \rho + 1] \log I$$

$$\hat{L} = \arg \min_{\rho \in \{0, \dots, M-K\}} \text{MDL}(\rho) \quad (23)$$

V. 모의 실험

본 장에서는 표 1^[11]의 다중 경로 채널에 대해서 제안한 알고리즘과 LS 알고리즘을 적용하여 채널을 추정하고 식 (6)을 이용하여 등화를 실시하여 고속, 대용량 전송을 위한 고차 변조 방식에서의 두 알고리즘의 성능을 비교 분석한다. 모의 실험에서는 512개의 부반송파를 가지는 64QAM의 OFDM 시스템을 가정한다. 그리고 시스템은 5Mhz의 대역폭과 1Ghz의 반송파 주파수에서 동작하도록 설계 되었다. 또한 103샘플의 보호구간, 8개의 부반송파마다 파일럿을 배치하여 64개의 파일럿 부반송파를 두고 $K=32$ 로 한다.

표 1. ITU의 다중 경로 페이딩 채널

Table 1. Multi-path fading channel of ITU.

	속도 [Km/h]	도플러 주파수 [Hz]	지연시간 [samples]			상대전력[dB]				
case 1	3	2.78	0	5		0	-10	0		
case 2	3	2.78	0	5	60		0	0	0	
case 3	120	111.11	0	1	3	4	0	-3	-6	-9
case 4	3	2.78	0	5			0	0		
case 5	50	46.30	0	5			0	-10		
case 6	250	231.48	0	1	3	4	0	-3	-6	-9

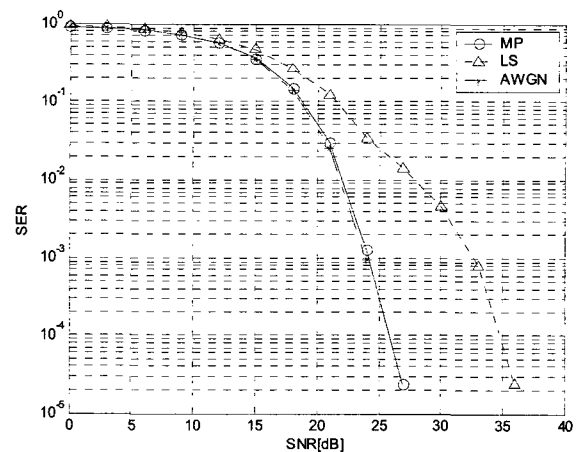


그림 3. 표 1의 첫번째 경우에 대한 제안된 알고리즘과 LS알고리즘의 심볼오율
Fig. 3. SER of the proposed algorithm and the LS algorithm for case 1 of Table 1.

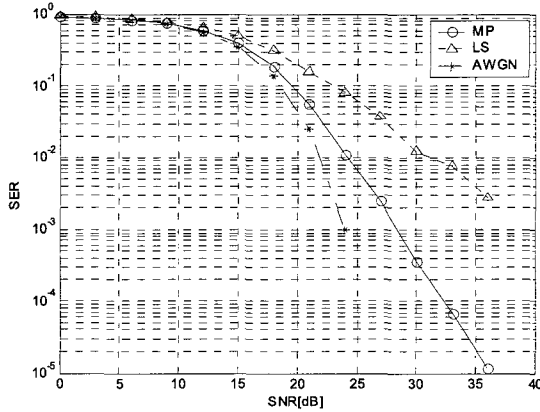


그림 4. 표1의 두번째 경우에 대한 제안된 알고리즘과 LS 알고리즘의 심볼오율
Fig. 4. SER of the proposed algorithm and the LS algorithm for case 2 of Table 1.

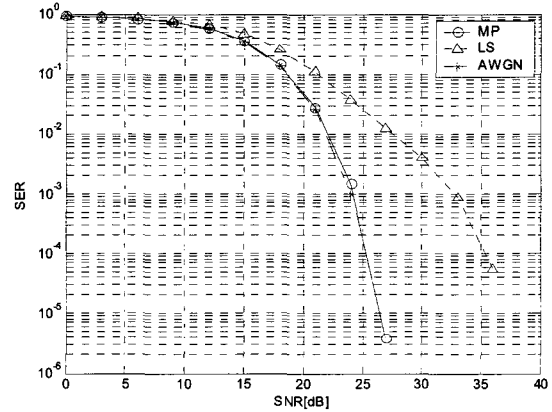


그림 7. 표1의 다섯 번째 경우에 대한 제안된 알고리즘과 LS 알고리즘의 심볼오율
Fig. 7. SER of the proposed algorithm and the LS algorithm for case 5 of Table 1.

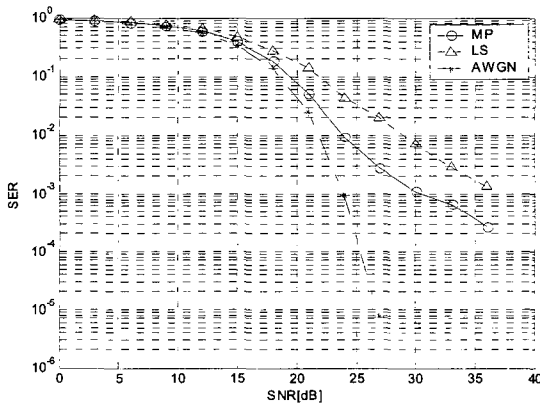


그림 5. 표1의 다섯 번째 경우에 대한 제안된 알고리즘과 LS 알고리즘의 심볼오율
Fig. 5. SER of the proposed algorithm and the LS algorithm for case 3 of Table 1.

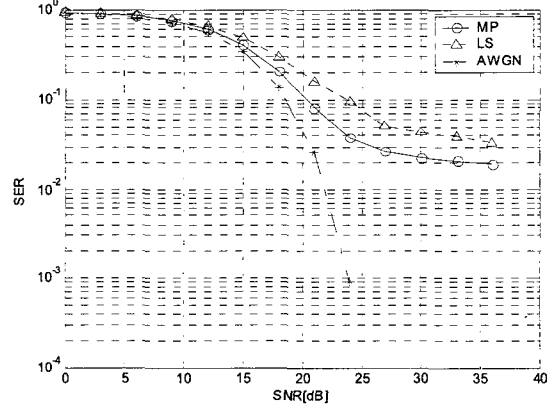


그림 8. 표1의 여섯 번째 경우에 대한 제안된 알고리즘과 LS 알고리즘의 심볼오율
Fig. 8. SER of the proposed algorithm and the LS algorithm for case 6 of Table 1.

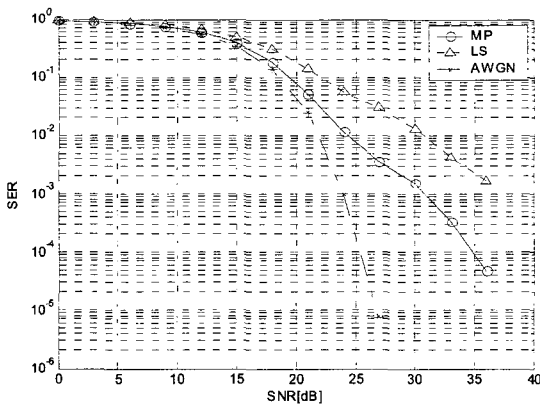


그림 6. 표1의 네번째 경우에 대한 제안된 알고리즘과 LS 알고리즘의 심볼오율
Fig. 6. SER of the proposed algorithm and the LS algorithm for case 4 of Table 1.

그림3-8은 본 논문에서 제안하는 MP알고리즘과 기존 방법인 LS알고리즘을 이용하여 채널을 추정한 후 등화를 각각 실시하여 심볼 오율을 구한 것을 나타낸다. 그림에서 AWGN은 다중경로가 없고 백색 잡음만 존재하는 채널에서 수신한 심볼 오율을 나타내는 것이다. 그림3-8에서 MP 알고리즘을 이용한 채널 추정법이 LS 알고리즘을 이용한 채널 추정법보다 오율에서 우수한 성능을 보인다. 그림 3과 7에서는 제안하는 알고리즘이 거의 AWGN 환경의 심볼 오율에 근접한다. 둘 다 다중경로가 두 개이고 두번째 다중경로의 신호가 주경로보다 작은 경우이다. 그림 4, 5, 6에서는 다중경로가 세개 이상이거나 주경로 이외의 신호크기가

상대적으로 큰 경우이다. 채널 상황이 가장 열악한 그림8의 경우를 제외한 채널에서 약 5dB 내외의 잡음 전력에 대한 신호전력의 이득을 보인다. MP 알고리즘으로 채널을 추정하면 스파스 형태의 채널을 얻게 되므로 추정한 지연시간 이외의 구간에서는 채널 추정치가 영이 된다. 따라서 이 구간에서는 잡음의 영향을 받지 않게 되므로 잡음에 민감한 LS 알고리즘에 비해 잡음 전력에 대한 신호전력의 비에서 이득을 가진다.

VI. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템에서의 이동 채널 환경 극복 알고리즘으로 연속 파일럿을 이용한 MP 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 시간영역에서의 채널 정보를 선택적으로 추정하여 잡음의 영향을 줄여 기존의 훈련열을 이용하는 LS 알고리즘보다 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 이동채널에 적용한 실험결과에서는 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 이동 수신 환경에 적합하다는 것을 알 수 있다. 즉 본 알고리즘은 차세대 이동통신 시스템의 목표인 이동 멀티미디어 서비스 시스템에서 채널 추정 알고리즘으로 사용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] J.-J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson, and P. O. Borjesson, "On channel estimation in OFDM systems," in Proc. IEEE 45th Vehicular Technology Conf., Chicago, IL, pp. 815819, July 1995.
- [2] O. Edfors, M. Sandell, J.-J. van de Beek, S. K. Wilson, and P. O. Brjesson, "OFDM channel estimation by singular value decomposition," IEEE Trans. Commun., vol. 46, no. 7, pp. 931939, July 1998.
- [3] S. F. Cotter et al., "Forward sequential algorithms for best basis selection," IEE Proc. on Vision, Image and Signal Processing, vol. 146, no. 5, pp. 235244, rs, vol. 39, Oct. 1999.
- [4] B. Yang, K. B. Letaief, R. S. Cheng, and Z. Cao, "Channel estimation for OFDM transmission in multipath fading channels based on parametric channel modeling," IEEE Trans. on Commun., vol. 49, pp. 467479, Mar. 2001.
- [5] S. F. Cotter and B. D. Rao, "Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization," IEEE Trans. on Commun., vol. 50, no. 3, pp. 374377, Mar. 2002.
- [6] Y. Liu and D. K. Borah, "Estimation of fading channels with large possible delay spreads," Electronics Letters, pp. 130131, Jan. 2003.
- [7] S. F. Cotter and B. D. Rao, "Matching pursuit based decision-feedback equalizers," in Proc. ICASSP'00, vol. V, Istanbul, Turkey, , pp. 27132716, June 2000.
- [8] Z. Yuanjin, "A novel channel estimation and tracking method for wireless OFDM systems based on pilots and Kalman filtering," IEEE Trans. on Consum. Electron., vol. 49, pp. 275283, May 2003.
- [9] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-33, pp. 387392, Apr. 1985.
- [10] G. Xu, R. H. Roy III, and T. Kailath, "Detection of number of sources via exploitation of centro-symmetry property," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 42, pp. 102112, Jan. 1994.
- [11] 3rd Generation Partnership Project, "User equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)," 3GPP Technical Specification, TS 25.101, V5.7.0, June 2003.

저 자 소 개



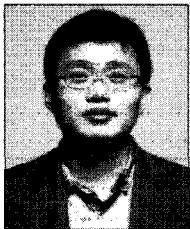
최 재 환

- 2004년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2005년 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : OFDM, channel estimation



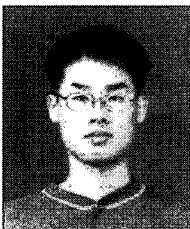
임 채 현

- 2000년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
- 2002년 경북대학교 대학교 전자공학과 석사 졸업
- 2005년 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : 디지털 통신, OFDM



한 동 석

- 1987년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1989년 KAIST 전기 및 전자 공학과 석사 졸업
- 1993년 KAIST 전기 및 전자 공학과 박사 졸업
- 1987년 ~ 1996년 삼성전자 기술총괄 신호처리연구소 선임연구원
- 1996년 ~ 현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수
- 2004년 플로리다대학교 방문교수
- 주관심분야 : 디지털통신 및 이동통신 신호처리



윤 대 중

- 2002년 경북대학교 전자전기공학부 졸업
- 2002년 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정
- 주관심분야 : 디지털 시스템, OFDM 시스템, 다중 반송파 시스템