주파수 선택적 채널에서의 OFDM 시스템을 위한 PSAM 채널 추정 기법의 성능 개선

Performance Improvement of PSAM Channel Estimation Method for OFDM Systems over Frequency-Selective Channel

김 영 수 · 배 정 국*

Young Soo Kim · Jeong Gook Bae*

요 약

본 논문에서는 주파수 선택적 채널 환경의 OFDM 시스템에서 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 기법인 pilot Symbol Assisted Modulation(PSAM) 채널 추정 성능을 개선하는 방법을 제안한다. OFDM 시스템에서는 채널 추정에 쓰이는 파일럿의 밀도가 적을수록 시스템의 유효 데이터량과 전력 효율이 증가되는 장점이 있다. 이를 위해 송신단에서는 채널 추정에 사용되는 파일럿의 수를 적게 사용하는 것이 좋다. 본 논문에서의 수신단에서는 인접한 파일럿 중간에 위치한 채널값이 먼저 추정된 후, 기존의 파일럿 값과 추정된 중간값을 사용하여 나머지 채널값을 추정한다. 그 후 채널의 최대 응답 길이를 고려하여 설계된 보호 구간의 길이를 이용하여 추정된 채널값의 오차를 줄여준다. 제안된 채널 추정 기법의 평균 제곱 오차(MSE) 성능은 기존의 PSAM 채널 추정 방법에 비해 신호대 잡음비 면에서 약 2 dB 정도의 개선 효과를 보여주었다.

Abstract

In this paper, we propose a method to improve performance of pilot symbol assisted modulation(PSAM) channel estimation method for OFDM systems over frequency selective channel. When channel values are estimated, the low pilot density used for channel estimation increases not only the effective data rate but also power efficiency. Thus, the lower pilot density which is used for channel estimation is better for OFDM system. At first, we estimate the channel values which are located at the middle of adjacent pilots, and then all of the possible channel values are estimated by using original pilot values and previously estimated pilot values. Furthermore, the error of estimated channel values is reduced by introducing guard interval which is designed according to maximum channel delay. Performance achieved with the proposed method is illustrated by simulation experiments in comparison with the existing methods in terms of mean squared error(MSE).

Key words : Channel Estimation, OFDM System, PSAM, MMSE

I. 서 론

앞으로의 유비쿼터스 시대는 멀티미디어 서비스

의 증가로 인해 보다 고속으로 고품질의 데이터 전송이 요구된다. 이러한 필요에 의해 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 이미 IE-

「이 논문은 2009년도 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과임」

경희대학교 전자전파공학과(Department of Electronic and Radio Engineering, Kyung Hee University)

*삼성전자 무선사업부 S/W 개발팀(S/W Development Team, Wireless Business Group, Samsung Electronics)

· 논 문 번 호 : 2011222-165

· 교 신 저 자 : 김영수(e-mail : yskim@khu.ac.kr)

· 심사일자 : 2012년 1월 13일 · 수정완료일자 : 2012년 1월 16일

EE 802.11g, 무선 LAN, 지상파 DMB 등의 규격으로 사용되면서 무선 채널의 다중 경로 페이딩에 강한 고속의 전송 방식으로써 우수성이 입증되었다^[1]. OFDM은 하나의 반송파에 정보를 실어 보내는 기존의 통신 방식과는 다르게 여러 개의 부반송파에 정보를 실어서 보낸다. 각각의 반송파는 직교성을 이용하여 서로 간에 영향을 미치지 않으며 정보를 전달할 수 있다. 무선 채널의 특징은 광대역 전송시 채널의 다중 경로로 인한 주파수 선택적 페이딩에 의해서 심각한 수신 신호의 왜곡이 발생한다는 점이다. 그러나 OFDM 방식은 긴 심볼의 전송 주기를 가지므로, 각각의 부 채널 내에서는 전 전송 구간을 통하여 비교적 균일한 주파수 특성을 가지기 때문에 다중 경로로 인한 페이딩에 강한 특성을 갖는다^[2]. 또한, 수신단에서 채널 추정 성능은 OFDM 데이터 복조에 많은 영향을 미친다. 채널의 변화가 심한 환경에서 파일럿을 이용해 채널 추정을 할 경우 사용되는 파일럿의 수는 적을수록 좋다. 이는 파일럿에 낭비되는 부반송파와 전력을 줄일 수 있기 때문이다. 즉, 파일럿을 적게 삽입할수록 유효 데이터량과 전력 효율이 증가되는 장점이 있다. 또한, 추정 기법 중 하나인 채널의 최대 응답 시간을 고려한 영값을 매핑하는 기법은 채널 잡음에 의한 영향을 줄여 채널 추정 성능을 개선시킬 수 있다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 주파수 선택적 채널 환경에서 적은 파일럿 밀도를 이용하여 PSAM(Pilot Symbol Assisted Modulation) 채널 추정 기법의 성능을 개선시키는 방법을 제안한다. 채널을 통과한 신호에 대하여 수신단에서는 먼저 파일럿 사이의 중간값 추정이 이루어진다. 그 값을 파일럿으로 간주하여 나머지 채널의 추정에 이용된다. 이렇게 구해진 채널값은 채널의 최대 응답 시간 이후의 데이터는 잡음 신호이므로, 시간 영역으로 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 취한 후 최대 지연 시간 이후의 데이터는 영값을 매핑시켜 줌으로써 추정 오차를 감소시키게 된다. 최대 지연 시간을 추정하는 방법은 이 논문에서 다루지 않으며, 전송 채널을 고려하여 설계된 OFDM 심볼의 보호 구간을 이용한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 OFDM 시스템에서 파일럿을 이용한 기본적인 채널 추정 방법에 대해 소개하고, III 장에서는 시뮬레이션 조건을 기술하며, IV 장에서

그림 1. 파일럿을 이용한 채널 추정 과정이 있는 OFDM 시스템의 블럭도

Fig. 1. Block diagram of OFDM system with channel estimation using pilot.

제안된 채널 추정 방법을 설명한다. V 장에서는 기존의 채널 추정 방법과 제안된 채널 추정 방법의 MSE 성능을 비교하였다. 끝으로 VI 장에서 결론을 맺었다.

II. OFDM 시스템을 위한 채널 추정 방법

무선 채널을 통과한 OFDM 신호는 페이딩의 영향으로 주파수 상에서 랜덤하게 크기와 위상 변화가 생긴다. 이러한 변화에 대처하기 위하여 동기식 검출 방식을 사용하는 수신기에서는 기준 크기와 위상을 추정하여 각 부반송파의 정상도에 대한 최선의 결정 경계를 결정한다^[3]. 이처럼 채널 추정이란 전송된 신호가 수신단의 안테나에 도착하기까지의 무선 채널의 주파수 응답을 추정하는 과정이라 할 수 있다. 따라서 이러한 기준값을 찾기 위한 채널 추정은 OFDM 시스템의 성능 향상을 위하여 중요한 과정이다. 그림 1은 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 과정이 있는 OFDM 시스템의 간단한 블럭도를 보여 준다.

2-1 훈련 심볼을 이용한 채널 추정 기법

훈련 심볼을 이용하는 방법은 채널 변화가 비교적 적은 채널 환경에 적합한 방식이다. 한번 추정된 채널값을 다음 훈련 심볼 이전까지 사용해야 하므로 그 동안에 채널의 주파수 응답이 변하지 않는다는 가정하에 채널 추정을 수행하는 방법이다. 이는 그림 2와 같이 일정한 시간에 모든 부반송파에 훈련 심볼을 삽입함으로써 채널을 추정할 수 있다.

잘 알려진 간단한 방법 중의 하나인 최소 제곱(LS : Least Square) 추정기는 식 (1)에서 나타낸 것과 같이 제곱 오차 e^2 을 최소로 한다^[2]. 채널 벡터 $\mathbf{h}$ 를 추

그림 2. 훈련 심볼을 이용하는 OFDM 심볼 구조
Fig. 2. OFDM symbol structure using training symbol.

정하기 위한 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}$ 와 $\mathbf{X}\mathbf{h}$ 사이의 제곱 오차는 다음과 같다.

$$e^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{h})^H (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{h})$$

$$\hat{\mathbf{h}}_{LS} = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{y} = \mathbf{X}^{-1} (\mathbf{X}^H)^{-1} \mathbf{X}^H \mathbf{y} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{y}$$

$$\hat{\mathbf{h}}_{LS} = \begin{bmatrix} \frac{y_0}{x_0}, \frac{y_1}{x_1}, \dots, \frac{y_{N-1}}{x_{N-1}} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{X}$ 는 훈련 심볼로 구성된 대각 행렬을 의미한다. 식 (1)을 바탕으로 LS 채널 추정기를 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 3과 같다.

2.2 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 기법

파일럿 심볼을 이용하는 방법은, OFDM 심볼의 데이터 심볼을 값을 알고 있는 파일럿 심볼로 대체해 주는 방법이다. 시간과 주파수 도메인의 정해진 위치에 파일럿이 삽입되고, 각각의 위치에서 채널이 추정된다. 그리고 나머지 채널값은 인접한 파일럿의 추정값을 이용하여 채널 추정을 수행하는 방법이다. 그림 4는 사각 형태로 파일럿이 삽입된 OFDM 심볼을 나타낸다. 이 경우, 파일럿의 밀도는 1/12이다. 즉, 전체 데이터 용량 중 채널 추정에 사용되는 용량이 1/12이다. 추정에 사용되는 파일럿이 증가할수록 데이터율과 비트당 평균에너지 E_b 가 감소된다. 그러므로 파일럿을 이용해서 채널 추정을 하는 시스템에서는 전력 효율과 주파수 효율을 고려할 필요가 있다.

그림 3. LS 채널 추정기의 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of LS channel estimator.

그림 4. Rectangular 파일럿 패턴을 갖는 OFDM 심볼
Fig. 4. OFDM symbol with rectangular pilot pattern.

여러 가지 기법중 본 논문에서 사용한 MMSE(Minimum Mean Square Error) 추정기는 식 (2)처럼 주어진다^[4].

$$\hat{\mathbf{h}}_{MMSE} = \mathbf{R}_{hy} \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{y} \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{R}_{hy}$ 와 $\mathbf{R}_{yy}^{-1}$ 은 식 (3)처럼 표현될 수 있다.

$$\mathbf{R}_{hy} = E[\mathbf{h}\mathbf{y}^H] = E[\mathbf{h}(\mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{n})^H] = \mathbf{R}_{hh} \mathbf{X}^H$$

$$\mathbf{R}_{yy} = E[\mathbf{y}\mathbf{y}^H] = E[(\mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{n})(\mathbf{X}\mathbf{h} + \mathbf{n})^H]$$

$$= \mathbf{X}\mathbf{R}_{hh} \mathbf{X}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_N \quad (3)$$

$\mathbf{R}_{hh} = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H]$ 는 채널 벡터 $\mathbf{h}$ 의 자기 상관 행렬을 의미하고, σ_n^2 은 AWGN의 분산을 나타낸다. 그림 5는 채널 추정 기법인 LS와 MMSE의 평균 제곱 오차

그림 5. LS와 MMSE 성능 비교

Fig. 5. Performance comparison between LS and MMSE.

(MSE) 성능 차이를 보여준다. MMSE 방식은 LS 방식보다 MSE 성능이 SNR 관점에서 약 3 dB 정도 개선된 성능을 보여준다. 그러나 MMSE 방식은 LS 추정기보다 상관 행렬 및 역행렬 등으로 인하여 계산이 복잡한 단점을 갖는다.

III. 시스템 모델

본 논문에서는 레일리 페이딩 채널 환경에서의 OFDM 시스템을 고려하였으며, 순환 확장(cyclic prefix)을 사용하였다. 이는 연속적인 OFDM 심볼 사이에서 보호 구간의 역할을 수행한다. 그러므로 채널의 최대 응답의 길이는 순환 확장의 길이보다 짧다고 가정한다. OFDM 심볼의 보호 구간 길이는 채널의 최대 응답 시간을 고려하여 설계되었기 때문에 채널 추정 기법에 이용될 수 있다. OFDM 심볼의 보호 구간의 삽입은 ISI(Inter Symbol Interference)를 예방하고, 순환 확장은 ICI(Inter Carrier Interference)로부터 강건한 특징을 갖는다.

유효한 OFDM 심볼 길이는 $T = NT_s$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 T_s 는 시스템의 샘플링 주기를 나타내고, N 은 서브캐리어 수를 나타낸다. 순환 확장을 사용한 구간은 $T_G = LT_s$ 로 나타낼 수 있다. L 은 순환 확장의 샘플수이다. 그러므로 하나의 OFDM 심볼 주기는 $T + T_G$ 가 된다. 만약 ISI와 ICI가 제거된 채널을 생각하면 채널을 통과한 OFDM 심볼은 식 (4)와 같은 채널 감쇠를 갖는다^[3].

$$h_k = G \left(\frac{k}{NT_s} \right), \quad k = 0 \cdots N-1 \quad (4)$$

여기서 $G(\cdot)$ 는 시간 영역에서 OFDM 심볼 동안 채널의 임펄스 응답 $g(\tau)$ 의 주파수 응답을 나타낸다.

3-1 채널 모델

본 논문에서 사용한 채널 모델은 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 채널이며, 하나의 OFDM 심볼에 대하여 일정한 채널을 고려함으로써, 시간 t 에서 M 개의 경로를 갖은 채널의 주파수 응답은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$G(f; t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=1}^M e^{j(\theta_n + 2\pi F_{Dn}t - 2\pi f\tau_n)} \quad (5)$$

식 (5)에서 θ_n 은 n 번째 경로에서 위상을 나타내고 F_{Dn} 은 도플러 주파수를 나타내며, τ_n 은 지연을 나타낸다. 제이크(Jake) 스펙트럼을 가지는 레일리 페이딩과 τ_{rms} 가 지수적으로 감소하는 전력 지연 프로파일(power delay profile)을 얻기 위해서 식 (6)에 주어진 확률 밀도 함수를 선택할 수 있다.

$$\begin{aligned} p_\theta(\theta) &= 1/2\pi, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \\ p_{F_D}(F_D) &= \frac{1}{\pi F_{D,max} \sqrt{1 - (F_D / F_{D,max})^2}}, \quad |F_D| < F_{D,max} \\ p_\tau(\tau) &= \frac{e^{-\tau/\tau_{rms}}}{\tau_{rms}(1 - e^{-T_p/\tau_{rms}})}, \quad 0 \leq \tau \leq T_{cp} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 랜덤 변수 F_D 와 τ 는 원하는 누적 분포 함수의 역수를 사용함으로써 출력이 0과 1 사이를 가지는 균일 분포 랜덤 생성기로부터 쉽게 얻을 수 있다.

3-2 파일럿 패턴

채널 추정을 위한 파일럿의 개수는 신호 대 잡음비와 채널 추정 성능 간에 적당한 절충관계에 있다. 파일럿의 개수를 많이 사용하여 파일럿간의 거리를 가까이 할수록, 즉 OFDM 심볼 안의 파일럿의 밀도가 증가할수록 채널 추정의 오차가 점점 감소하여 추정 성능이 좋아지는 반면에 유효 신호대 잡음비가 줄어드는 단점이 있다. 채널값 추정을 위한 파일럿

의 배치는 나이퀴스트 샘플링 이론을 만족해야 한다. 시간축에서 파일럿의 배치 간격 N_t 는 동기 시간(coherence time)보다 작아야 하고, 주파수 축에서의 파일럿의 배치 간격 N_f 는 동기 대역폭(coherence bandwidth)보다 작아야 한다^[3].

$$\begin{aligned} N_t < (N+L)T_S \frac{1}{B_d} &= \frac{(N+L)T_S}{2f_{D,\max}} = \frac{1}{2\left(1+\frac{L}{N}\right)f_{D,\max}} \\ N_f < NT_S \frac{1}{\tau_{\max}} &= \frac{NT_S}{LT_S} = \frac{N}{L} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\tau_{\max}$ 는 최대 다중 경로 지연 확산, B_d 는 도플러 확산, $f_{D,\max}$ 는 서브캐리어간 간격에 대한 최대 도플러 주파수의 비, N 은 부반송파 개수, L 은 순환 확장의 샘플 수, 한 개의 OFDM 심볼 구간은 $(N+L)T_s$, 부반송파의 간격은 $\frac{1}{NT_s}$ 이다.

IV. 제안된 채널 추정 방법

기존의 MMSE 알고리즘은 채널을 추정하는데 인접한 곳에 위치한 파일럿 심볼만을 이용했다. 이럴 경우 파일럿 간격이 점점 멀어질수록 채널의 상관 정도가 감소하여 채널 추정 성능이 저하되는 단점이 있다. 하지만 OFDM 심볼 안에 파일럿 밀도가 적을수록 유효 데이터량과 전력 효율이 증가되는 장점이 있다. 이를 위해 본 논문에서는 먼저 파일럿의 배치를 동기 시간과 동기 주파수를 고려하여 파일럿을 배치하였다. 파일럿의 배치는 사각 형태를 사용하였다. 주파수와 시간 도메인에 삽입되는 인접한 파일럿의 최대 간격을 구해 보면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} N_{f,\max} &= \frac{1,024}{50} = 20.5 \\ N_{t,\max} &= \frac{1}{2\left(1 + \frac{50}{1,024}\right)0.05} = 9.5 \end{aligned} \quad (8)$$

추정을 위해서 결정하는 인접한 파일럿간의 간격
은 최대 파일럿 간격보다 작아야 한다.

$$\begin{aligned} N_f &< N_{f,\max} \\ N_t &< N_{t,\max} \end{aligned} \quad (9)$$

논문에서는 중간값 추정을 위하여 파일럿 간 간

격을 2의 제곱배로 설계하였다. 즉, $N_{f,\max}$ 가 20.5이므로 주파수 영역에서 파일럿간 간격 N_f 를 16으로 하였고, 시간 영역에서 파일럿간 간격 N_t 를 8로 결정하였다. 이렇게 설계된 파일럿의 오버샘플링 인자 (oversampling factor)를 구해 보면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} M_f &= \frac{N_{f,\max}}{N_f} = \frac{20}{16} = 1.25 \\ M_t &= \frac{N_{t,\max}}{N_t} = \frac{9}{8} = 1.125 \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 파일럿간 간격이 멀어짐에 따라 발생하는 단점을 극복하고자 채널 추정 보간 간격을 줄여줌으로써 성능이 개선될 수 있도록, 인접한 파일럿 중간에 위치한 채널값을 먼저 추정한 후 그 값을 파일럿처럼 이용하여 나머지 채널값을 추정하였다. 그림 6은 중간값을 이용한 1-D 채널 추정의 개념을 나타낸다. 이렇게 추정된 채널값은 IFFT를 통해 시간 영역으로 변환된 후 채널의 최대 응답 길이 이후의 데이터는 잡음 신호이므로 영 값을 매핑해 줌으로써 채널 통과시 발생한 잡음을 줄여준다. 그림 7은 본 논문에서 사용된 WSSUS 채널의 최대 도플러 주파수는 111 Hz이고, 최대 지연은 $10\ \mu\text{s}$ 임을 가정하였을 때, 1,024개의 서브캐리어에 대한 주파수 응답의 크기를 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 채널의 특성이 주파수 선택적 채널의 특징을 가짐을 확인할 수 있다. 본 논문에서 가정했던 채널의 최대 지연 시간 $10\ \mu\text{s}$ 는 OFDM 심볼에 설계된 보호 구간의 길이와 일치한다. 채널의 경로수는 10을 채택하였다. 중

그림 6. 중간값 추정 알고리즘

Fig. 6. Algorithm for a middle point estimation.

그림 7. 주파수 선택적 채널 특성을 갖는 채널의 주파수 응답

Fig. 7. Frequency response of frequency-selective channel.

간값 추정이 이루어진 채널값은 잡음의 영향을 줄여 주기 위하여 영 값을 매핑해 준다. 무선 채널의 최대 응답 길이는 설계된 OFDM 심볼의 보호 구간을 고려하여 설정하였으므로 채널 통과시 발생하는 오차를 감소시킬 수 있다. 영값을 매핑하는 추정된 채널의 임펄스 응답 신호 $\hat{\mathbf{g}}_{MMSE}$ 는 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{\mathbf{g}}_{MMSE} = \begin{cases} \hat{\mathbf{g}}_{MMSE}, & 0 \leq n \leq L-1 \\ 0, & L \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (11)$$

본 논문에서는 OFDM 심볼의 보호 구간 길이 L 은 50 샘플, OFDM 심볼의 길이는 1,024 샘플을 사용하였다. 부반송파의 개수 N 은 1,024이다. 즉, 보호 구간 이후의 채널값은 영값을 매핑해 줌으로써 추정시 발생한 오차를 감소시켜 준다. 이렇게 구해진 $\hat{\mathbf{g}}_{MMSE}$ 값을 FFT 를 수행하여 채널의 주파수 응답을 최종적으로 추정하게 된다.

4-1 사용된 파일럿과 복잡도 비교

채널 추정기는 선형시스템이므로 채널 추정기는 파일럿 위치에서의 채널값들 간의 선형 결합으로 채널을 추정할 수 있다. 추정에 사용되는 파일럿의 수는 추정의 복잡도를 변화시킨다. 추정시 사용하는 파일럿의 개수를 표 1에 나타난 바와 같이 가정한다면 하나의 채널값을 추정하기 위한 곱셈의 평균 개

표 1. 채널 추정기의 복잡도 비교

Table 1. Complexity comparison between existing algorithm and proposed algorithm.

추정기	채널 추정기의 구조	채널 추정시 곱셈수	파일럿 개수
2-D	인접한 K_p 개 파일럿 사용	K_p	K_p
Separable (1-D)	주파수에서 K_f 개 시간 도메인에서 K_t 개를 사용	$\frac{K_f}{N_t} + K_t$	$K_f K_t$
제안된 방법	주파수에서 $2K_f$ 개 시간 도메인에서 $2K_t$ 개를 사용	$\frac{K_f}{N_t} + K_t + \frac{2K_f'}{N_t} + 2K_t'$	$K_f K_t$

수는 표 1과 같다^[3]. 2-D(Dimension)와 비교하여 1-D의 채널 추정기는 주파수 영역에서 먼저 K_f 개 만큼의 파일럿을 사용하여 채널 추정을 수행한 후 시간 영역에서 K_t 만큼의 파일럿을 사용하므로, 주파수 영역에서의 파일럿 수와 시간 영역에서의 파일럿 수를 곱해 주면 추정기의 전체 파일럿의 수는 $K_f K_t$ 로 결정된다. 채널 추정시 사용되는 총 곱셈 수는 매 N_t 마다 반복되는 OFDM 심볼에 주파수 도메인에서의 채널 추정기가 적용되므로 $K_f/N_t + K_t$ 로 결정될 수 있다^[3].

한편, 제안하는 알고리즘은 먼저 추정된 중간값을 파일럿이라고 간주하고, MMSE 알고리즘을 수행하는 방법이므로 사용되는 원래의 파일럿 개수는 1-D 추정기의 경우와 마찬가지로 $K_f K_t$ 이다. 하지만 채널 추정시 계산되는 곱셈은 추정된 중간값의 사용으로 인하여 주파수 영역과 시간 영역에서 사용되는 Wiener 필터의 탭 수가 2배 증가하는 결과를 초래한다. 이 경우 시스템의 복잡도는 1-D 추정기에 비해 2배 증가하게 된다.

그림 8에서 확인할 수 있듯이 $K_f=10$ 이고, $K_t=4$ 인 경우는 $K_f=4$ 이고 $K_t=4$ 인 경우보다 복잡도는 약 1.3배 증가되지만, MSE가 2×10^{-2} 인 경우에 대하여 신호대 잡음비가 약 5 dB 정도 개선됨을 알 수 있다. 그래프로 표현되지는 않았지만 실험결과 K_f 가 12, 14, 16으로 증가시켜가며 MSE 성능을 나타낸 결과, K_f 가 10일 때의 결과와 유사함을 확인했다. 이로써 주파수 영역에 삽입된 모든 파일럿의 정보를

그림 8. $f_{D,\max}=240$ Hz, $\tau_{\max}=8 \mu\text{s}$ 일 때 MSE 성능 비교

Fig. 8. MSE performance versus SNR.

이용하여 채널 추정을 수행하는 1-D 채널 추정 방법은 추정 오차를 가장 적게 할 수 있는 이상적인 MMSE 방법이 될 것이다. 그러나 이런 경우에 복잡도는 매우 크게 증가하게 된다. 본 논문의 시뮬레이션 조건인 1,024개의 서브캐리어를 사용하고, 주파수 도메인에서 16, 시간 도메인에서 8개의 간격으로 규칙적으로 파일럿을 삽입하였을 경우에 이상적인 채널 추정 방법은 $K_f=64$ 가 된다. $K_t=4$ 인 경우에 복잡도는 $K_f=4$ 인 경우보다 복잡도가 약 4배 정도 증가하게 되는 단점이 있다.

V. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 효율성을 보여주기 위하여 OFDM 시스템하에서 WSSUS 채널 환경을 가정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 표 2와 같으며, 채널 추정의 성능 변화를 MSE 관점에서 분석하였다. 시뮬레이션 수행시 송신단에서 전송되는 파일럿 정보는 수신단에서 정확하게 알고 있다고 가정하였다. 또한, 주파수 영역의 채널값을 먼저 추정 후 시간 영역의 채널값을 추정하는 1-D 추정기를 사용하였고, MMSE 알고리즘을 통해 채널 추정을 수행하기 위하여 파일럿 위치를 동기 주파수와 동기 시간보다 작게 위치시켰다. 파일럿의 배치 형태는 사각 형태를 사용하였다. 인접한 파일럿만을

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Simulation parameters.

신호의 대역폭	5 MHz
채널	WSSUS, AWGN
부반송파의 수	1,024
IFFT 크기	1,024
OFDM 심볼 길이	$215 \mu\text{s}$
OFDM 보호 구간 길이	$10 \mu\text{s}$
채널 추정 알고리즘	MMSE
인접한 파일럿간 간격	frequency : 16, time : 8
파일럿 밀도	0.78 %

채널 추정에 사용하는 고전적인 MMSE 기법은 시뮬레이션에서 PSAM-MMSE로 표기하였으며, 인접한 파일럿 사이의 중간값만을 채널 추정에 이용하였을 때의 결과는 Extended-MMSE로 표기하였다.

$$MSE = E \left[\left| h - \hat{h} \right|^2 \right] \quad (12)$$

그림 9는 그림 4에서 보인 사각 형태의 파일럿 패턴을 사용하고 채널의 최대 도플러 주파수가 5 Hz, 채널의 최대 지연 시간을 $10 \mu\text{s}$ 로 가정하였을 때, OFDM 심볼이 WSSUS 채널을 통과한 후의 채널 추정 기법들의 성능을 보여주고 있다. 이 경우에는 2.4 GHz의 캐리어 주파수를 사용할 때 이동체의 속도가 2.4 km/h인 경우이고, 채널의 최대 지연 시간이 OFDM 심볼의 보호 구간 설계시 고려된 채널의 최대 지연만큼 발생한 경우이다. 고려한 채널의 최대 지연 시간은 무선 전송 채널의 주파수 선택적 채널 특성이 심한 환경임을 의미한다. 제안된 채널 추정 기법은 파일럿간 보간 간격을 감소시키고 추정 오차를 감소시켜줌으로써, 기존의 MMSE 기법에 비해 MSE 성능이 10^{-1} 일 때 SNR이 1 dB 정도 개선된 효과를 보여주고 있다. 그림 10은 도플러 주파수가 5 Hz이고, 채널의 최대 지연 시간이 $8 \mu\text{s}$ 인 경우로 그림 9의 경우와 비교해서 채널의 최대 지연 시간이 $2 \mu\text{s}$ 줄어든 경우로, 주파수 선택적 채널 특성이 감소된 채널 환경을 가정하였다. 이 경우 채널의 동기 대역폭이 증가하고, PSAM 방식의 채널 추정 오차가 감소되기 때문에 채널 추정의 MSE 성능이 10^{-2} 일 때 2 dB 정도의 신호대 잡음비 개선 효과를 보여주고

그림 9. $\tau_{\max} = 10 \mu s$ 일 때 제안 방법과 기존 채널 추정 기법과의 성능 비교

Fig. 9. Performance comparison between existing method and proposed method for $\tau_{\max} = 10 \mu s$.

그림 10. $\tau_{\max} = 8 \mu s$ 일 때 제안 방법과 기존 채널 추정 기법과의 성능 비교

Fig. 10. Performance comparison between existing method and proposed method for $\tau_{\max} = 10 \mu s$.

있다. 그림 11은 도플러 주파수가 111 Hz이고, 채널의 최대 지연 시간이 $10 \mu s$ 인 경우로 무선 채널의 동기 시간이 감소된 고속 페이딩(fast fading)과 주파수 선택적 채널 환경을 고려하였다. 그림 10은 무선 채널의 변화가 더욱 심한 환경일수록 제안된 알고리즘은 기존의 MMSE 추정 방법보다 성능 개선 효과가 커짐을 나타낸다. MSE 성능이 10^{-1} 기준일 때 제안된 채널 추정 기법은 신호대 잡음비면에서 약 2~3 dB 정도의 우수한 성능을 보여주고 있다. 이는 기존의 MMSE 방식은 채널의 변화가 심한 환경에서 파

그림 11. $f_{D\max} = 111 \text{ Hz}$, $\tau_{\max} = 8 \mu s$ 일 때 제안 방법과 기존 채널 추정 기법과의 성능 비교

Fig. 11. Performance comparison between existing method and proposed method for $f_{D\max} = 111 \text{ Hz}$, $\tau_{\max} = 8 \mu s$.

일정한 간격이 멀어질수록 추정 오차가 증가되는 반면, 제안된 기법은 파일럿 사이의 중간값이 추정됨으로써 보간 간격이 줄어들어 채널의 주파수 응답 추정이 보다 능동적으로 수행되었고, OFDM 심볼의 순환 구간 이후의 추정된 데이터는 영 매핑을 해줌으로써 채널 추정시 발생하는 오차를 줄여 주었기 때문에 판단된다.

VI. 결 론

주파수 선택적 채널 환경에서 OFDM 시스템에 적용 가능한 채널 추정 방법을 제안하였다. 인접한 파일럿 사이에 위치한 중간값을 먼저 추정한 후, 그 값을 다시 채널 추정에 이용함으로써 파일럿 간격이 멀어짐으로써 생기는 성능 저하를 극복할 수 있는 특성을 보여주었다. 더구나 채널의 최대 응답 길이 이후의 값을 영 값으로 매핑해 줌으로써 추정에서 생기는 오차를 감소시켜 줌으로서 기존 방법보다 신호대 잡음비 측면에서 약 2 dB 정도의 개선 효과를 나타내었다. 특히 고속 페이딩 채널에서 기존 방법보다 제안된 방법이 월등하게 우수한 성능을 보여주었다. 제안한 방법은 기존의 채널 추정 방법보다 사용되는 파일럿의 밀도가 감소함으로써 OFDM 심볼의 유효 데이터량이 증가되고, 전력 효율이 증가되는 장점을 가지고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Henrik Schulze, Christian Luders, *Theory and Application of OFDM and CDMA*, Wiley, 2005.
- [2] Jan-Jaap van de Beek, Ove Edfors, and Ola Borjesson, "On channel estimation in OFDM systems", *InProc. VTC'95*, vol. 2, pp. 715-719, Rosemont, IL, Jul. 1995.
- [3] M. Sandell, O. Edfors, "A comparative study of pilot-based channel estimators for wireless OFDM", *Research Report TULEA 1996:19*, Div. of Signal Processing, Lulea University of Technology, 1996.
- [4] Y. Li, "Pilot-symbol-aided channel estimation for OFDM in wireless systems", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 49, no. 4, pp. 1207-1212, Jul. 2000.
- [5] Sinem Coleri, Mustafa Ergen, Anuj Puri, and Ahmad Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 48, no. 3, Sep. 2002.
- [6] Louis L. Scharf, *Statistical Signal Processing*, Addison-Wesley, 1991.
- [7] Richard van Nee, Ramjee Prasad, *OFDM Wireless Multimedia Communication*, Artech House, 2000.
- [8] L. hanzo, M. Munster, B. J. Choi, and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, Wiley, 2003.

김 영 수

1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1988년 12월: Arizona State University 전기공학과 (공학박사)
 1985년 5월~1986년 5월: Consultant, Signal-System Technology Inc., U.S.A.
 1986년 6월~1988년 12월: Research Associate, Arizona State University.
 1989년 1월~1992년 8월: 한국전자통신연구원 전파기술부, 전파응용연구실 실장
 2002년 1월~2003년 2월: Visiting Faculty, MPRG, Virginia Tech., U.S.A.
 1992년 9월~현재: 경희대학교 전자전파공학과 교수
 [주 관심분야] 이동통신, RFID, SDR, 스마트안테나, 스펙트럼 공학

배 정 국

2007년 2월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)
 2009년 2월: 경희대학교 전자·전파공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 삼성전자 무선사업부 S/W 개발
 [주 관심분야] 이동통신