

OFDM 시스템에서 채널 추정 기법

Channel Estimation Techniques for OFDM Systems

광대역통합망기술 특집

라택수 (T.S. La)	BcN원천연구팀 위촉연구원
전용일 (Y.I. Jun)	BcN원천연구팀 책임연구원
이왕주 (W.J. Lee)	BcN원천연구팀 책임연구원
박태준 (T.J. Park)	BcN원천연구팀 선임연구원

목 차

-
- I. 개요
 - II. 훈련 심볼을 이용한 채널 추정
 - III. PSAM 채널 추정
 - IV. ESAE & Blind 채널 추정
 - V. 최신 연구 동향

무선 통신 시스템에서 다중 경로 감쇠로 인한 심볼의 크기와 위상의 왜곡이 일어나는데 이를 추정하여 보상하기 위해 채널 추정 기법이 사용된다. OFDM 시스템에서의 채널 추정 기법에는 훈련 심볼이나 파일럿을 사용하여 채널을 추정하는 기법과 파일럿을 사용하지 않는 Blind 채널 추정 기법 등이 있다. 본 고에서는 I장 개요에 이어 II장에서는 훈련 심볼을 이용한 채널 추정 기법을 WPAN과 WLAN을 예로 들어 설명하고 LS, 1-D LMMSE, Low rank LMMSE 알고리즘에 대해 설명한다. III장에서는 PSAM 채널 추정에 대해 1차원 PSAM 기법과 2차원 파일럿 패턴과 Wiener filtering을 이용한 2-D LMMSE, Low rank LMMSE, Separable Wiener filter에 대하여 설명한다. IV장에서는 ESAE와 Blind 채널 추정 기법을 간략히 소개하고, V장에서 채널 추정의 최신 연구 동향을 소개한다.

I. 개요

OFDM은 고속 데이터 전송을 위해 다중 반송파를 이용하는 통신 방식이다. 광대역 신호를 서로 직교성을 갖는 여러 개의 부반송파로 나누어 병렬로 전송하는 방식으로써 광대역의 주파수 선택적 감쇠(frequency selective fading) 채널 특성이 부반송파별로 협대역의 주파수 비선택적 감쇠(frequency flat fading) 채널 특성으로 바뀌는 효과가 있다. 또한 서로 다른 주파수를 가지는 여러 개의 직교 부반송파로 변조시켜서 동시에 전송함으로써 전송 심볼은 원래 데이터의 주기보다 FFT 크기만큼 길어지게 된다[1]. 따라서 ISI의 영향을 크게 줄일 수 있다.

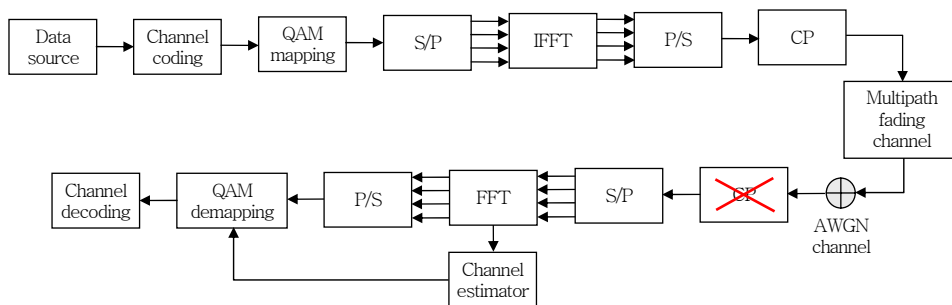
이와 같이 OFDM이 주파수 선택적 감쇠에 강한 특징을 갖지만 M-ary QAM 변조된 심볼은 채널의 통과에 의한 크기와 위상의 감쇠를 겪게 되므로 채널에서 겪는 감쇠를 추정하여 보상해주어야 한다. 정확한 채널 추정과 보상이 OFDM 시스템의 전체 시스템 성능을 높이는 데 중요한 역할을 한다. (그림 1)은 일반적인 OFDM 시스템을 블록도로 나타낸 것이고 FFT 후에 채널 추정기에서 채널을 추정하여 그 추정된 채널값을 보상하여 demapping하게 된다. OFDM 채널을 추정하는 기법을 훈련심볼을 이용한 채널 추정 기법과 PSAM 채널 추정 기법으로 나누어 분석하였다. 먼저 훈련 심볼을 이용한 채널 추정 기법은 패킷의 프리앰블의 훈련심볼에서 LS 또는 LMMSE 알고리즘을 이용하여 채널 추정을 한다[2]. LS 채널 추정은 복잡도가 낮고 구현이 간단한 장점이 있지만 MSE 관점에서 성능이 떨어진다.

반면 LMMSE 채널 추정은 MSE 관점에서 좋은 성능을 나타내지만 너무 많은 연산량을 처리해야 하는 단점이 있다. 이 단점을 극복하기 위해 SVD를 이용하여 랭크(rank)를 줄여 좋은 성능을 유지하면서 복잡도를 줄이는 Low rank LMMSE가 1998년 Ove Edfors에 의해 제안되었다[3].

PSAM 채널 추정 기법은 1997년 Peter Hoeher에 의해서 제안되었다. Wiener filtering을 이용한 PSAM 채널 추정 기법은 파일럿을 주파수와 시간축의 격자점에 분산하여 배치함으로써 주파수와 시간에 따라 빠르게 변화하는 채널환경에서 주파수와 시간의 상관관계를 이용하여 더욱 정확하게 채널을 추정하는 기법이다. PSAM 채널 추정 기법의 성능은 파일럿의 개수와 배치에 따라 결정된다[4]. 복잡도와 구현의 용이를 위해 2차원 필터를 주파수와 시간축의 Separable 필터, 즉 1차원 필터 2개를 주파수와 시간 축으로 나누어 구현하는 기법이 사용된다[5],[6]. 이외에 다른 OFDM 채널 추정 기법으로는 이전의 추정된 값을 함께 사용하는 ESAE 채널 추정 기법[7]과 파일럿을 쓰지 않고 신호의 특성을 이용하는 Blind 채널 추정 기법이 있다[8].

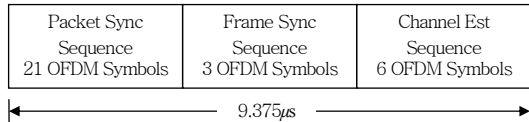
II. 훈련 심볼을 이용한 채널 추정

훈련 심볼을 이용한 채널 추정 기법은 WPAN과 WLAN과 같은 패킷타입 통신방식에 사용된다. 한 개의 패킷의 길이 동안 시간에 따라 채널이 변하지 않을 만큼 일정하기 때문이다.



(그림 1) OFDM Baseband Model

Multi-Band OFDM 기반의 HR-WPAN의 표준 프리앰블은 (그림 2)와 같고 채널 추정을 위해 6개의 OFDM 심볼에 훈련 심볼을 사용하고 LS, LMMSE 또는 Low rank LMMSE 알고리즘을 이용하여 패킷의 채널을 추정한다[9].



(그림 2) PLCP Standard Preamble

또한 OFDM 기반의 WLAN(802.11a, Hiper LAN/2)의 경우 한 개의 패킷은 (그림 3)과 같이 구성된다[10].

WLAN 패킷의 훈련 심볼 중 긴 훈련 심볼을 이용하여 채널을 추정한다. 긴 훈련 심볼은 (1)과 같은 시퀀스(sequence)를 IFFT하여 사용한다.

$$L_{-26,26} = \{1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1\} \quad (1)$$

WLAN과 같은 패킷 전송에서는 하나의 패킷동안 채널이 변하지 않는다는 가정 하에 채널추정을 한다. 따라서 수신된 긴 훈련심볼에서 LS 알고리즘을 통해 부반송파의 채널을 추정하고 그 추정된 채널값을 패킷 끝까지 이용하여 전체의 채널을 추정하고 보상한다. 시간축의 3.4번째와 모든 주파수축이 긴 훈련심볼을 나타내고 수신된 긴 훈련 심볼은 (2)와 같이 표현된다.

$$Y_{c,k}(f) = H_{c,k}(f)X_{c,k}(f) + N_{c,k}(f), \quad (2)$$

$$\begin{cases} C = -26 \dots -1, 1 \dots 26 \\ k = 3, 4 \end{cases}$$

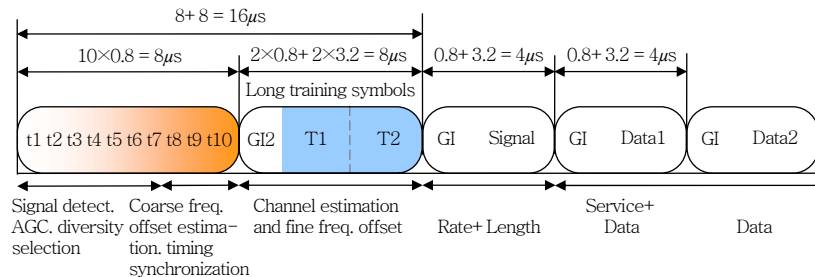
잡음의 통계적 특성을 고려하지 않고 수신된 심볼을 이미 아는 심볼, 즉 파일럿 심볼로 일대일로 나누어 추정하는 기법인 LS 채널 추정을 했을 때 $\hat{H}_{c,k} = \frac{Y_{c,k}}{X_{c,k}}$ 로 긴 훈련심볼의 채널값을 간단히 추정할 수 있고 긴 훈련심볼이 두 개의 심볼구간에 존재하므로 첫번째와 두번째 긴 훈련 심볼의 평균으로 (3)과 같고 3dB SNR 이득을 얻을 수 있다.

$$\hat{H}_c^{LT} = \frac{\hat{H}_{c,3} + \hat{H}_{c,4}}{2}, \quad (3)$$

$$c = -26, \dots, -1, 1, \dots, 26$$

마찬가지로 훈련 심볼에 LMMSE 채널 추정 알고리즘과 Low rank LMMSE 채널 추정 알고리즘을 적용하여 채널을 추정할 수 있다.

<표 1>은 훈련 심볼에서 사용하는 알고리즘 3종류의 특징, 알고리즘 수식 및 연산량을 비교한 표이다. 1-D LMMSE 알고리즘은 실제 채널값과 추정된 채널값 사이에 MSE를 최소화 하는 채널 추정이다. σ_n^2 는 채널잡음의 분산, R_{hh} 는 채널의 자기상관 행렬, $\beta = E\{x_k^2\}E\{1/x_k^2\}$, 16QAM일 경우 $\beta = \frac{17}{9}$ 이 된다. R_{hh} 와 SNR을 채널의 통계적인 특성에 의해 미리 안다면 $W_{MMSE} = R_{hh}(R_{hh} + \frac{\beta}{SNR}I)^{-1}$ 행렬값은 단지 한 번의 계산이 필요하고 그 값이 고정되어 사용되므로 매 심볼 tone 당 부반송파 만큼의 곱이 필



(그림 3) WLAN 패킷

〈표 1〉 채널 추정 알고리즘 비교표

알고리즘	특징	수식	MSE	연산량
LS	<ul style="list-style-type: none"> MSE 관점에서 성능 떨어짐 복잡도 적음 	$\hat{h}_{LS} = (X^H X)^{-1} X^H y = X^{-1} y$ $= \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{N-1} \\ x_0 & x_1 & \dots & x_{N-1} \end{bmatrix}^T$	$\frac{\beta}{SNR}$	$N/N=1$
LMMSE	<ul style="list-style-type: none"> MSE 관점에서 성능 최적임 복잡도 큼 	$\hat{h}_{LMMSE} = R_{hy} R_{yy}^{-1} y$ $= R_{hh} (R_{hh} + \sigma_n^2 (X X^H)^{-1})^{-1} \hat{h}_{LS}$ $= R_{hh} (R_{hh} + \frac{\beta}{SNR} I)^{-1} \hat{h}_{LS}$ $\beta = E\{ x_k ^2\} E\{ 1/x_k ^2\}$	$\frac{1}{N} \left(R_{hh} \left(I - \frac{R_{hh}}{\left(R_{hh} + \frac{\beta}{SNR} I \right)} \right) \right)$	$(N^2 + N)/N = N + 1$
Low rank LMMSE	<ul style="list-style-type: none"> Rank에 따라 MSE 성능 결정됨 SVD를 이용하여 복잡도 줄임 	$\hat{h}_p = W_{mmsc} \hat{h}_{LS}$ $= U \Lambda U^H \left\{ U \left(\Lambda + \frac{\beta}{SNR} I \right)^{-1} U^H \right\} \hat{h}_{LS}$ $= U \Lambda \left(\Lambda + \frac{\beta}{SNR} I \right)^{-1} U^H = U \Delta U^H \hat{h}_{LS}$ $\hat{h}_p = W_{mmsc}^p \hat{h}_{LS} = U \begin{bmatrix} \Delta_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^H \hat{h}_{LS}$ $\Delta_p = \text{diag} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \frac{\beta}{SNR}}, \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \frac{\beta}{SNR}}, \dots, \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \frac{\beta}{SNR}}, 0, \dots, 0 \right)$	$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{p-1} \left(\lambda_k (1 - \delta_k)^2 + \frac{\beta}{SNR} \delta_k^2 \right) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \lambda_k$	$(2Np + N)/N = 2p + 1$

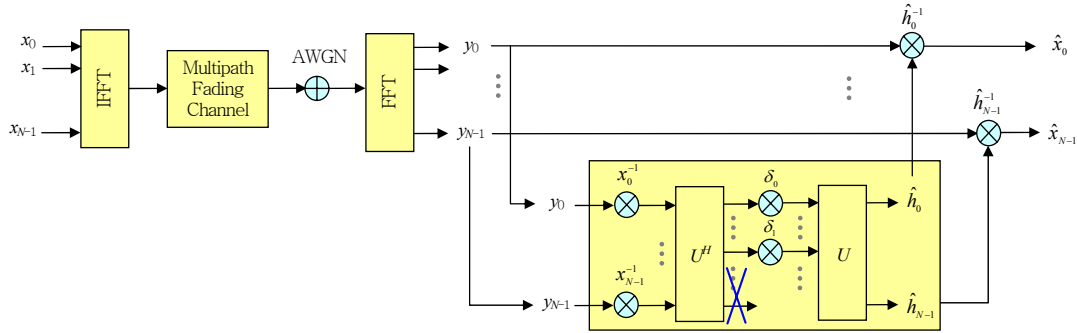
요하다[3]. 또한 $SNR = \frac{XX^H}{\sigma_n^2}$ 이므로 파일럿의 power를 높여서 에러의 분산을 줄이는 boosted 파일럿 기법이 있다.

앞에서 살펴본 1-D LMMSE는 MSE의 관점에서 최적의 성능을 보이지만 채널과 잡음의 통계적 특성을 얻기 위해 많은 연산량을 요구한다.

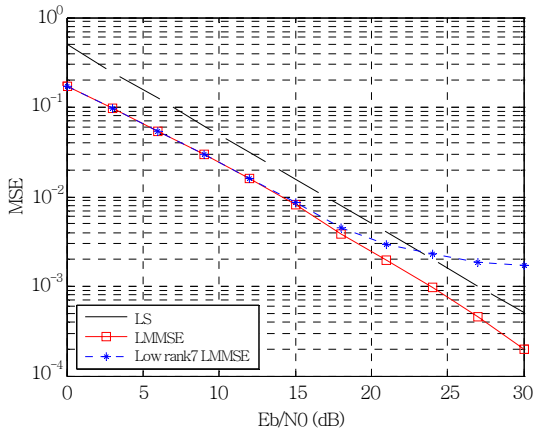
연산량의 대부분은 R_{hh} 행렬을 구하고 그것과 SNR의 연산을 거친 결과에 역행렬을 구하는 데 쓰인다. 1-D Low rank LMMSE 알고리즘은 SVD를 이용하여 R_{hh} 의 랭크를 줄이고 자신이 원하는 경계점(threshold) p를 정하여 연산량을 크게 줄일 수 있다[3]. (그림 4) 블록도는 대략적인 OFDM 시스템

과 1-D Low rank LMMSE 채널추정기를 나타낸 것이다. 채널을 통과하고 잡음이 더해진 수신 심볼을 FFT한 후 수신된 부반송파는 먼저 LS 추정되고 Low rank LMMSE 채널 추정을 거쳐 추정된 채널값을 보상해줌으로써 송신 데이터 값을 구할 수 있다.

(그림 5)는 지금까지 설명한 LS, LMMSE, Low rank LMMSE 채널 추정을 MSE 관점에서 성능을 비교한 결과이다. LMMSE 채널 추정은 LS 채널 추정보다 대략 3~5dB 성능이 좋음을 볼 수 있고 Low rank LMMSE 채널 추정은 낮은 SNR 구간에서는 채널 추정 오차가 잡음에 감춰지는 반면 잡음이 적은 SNR 구간, 즉 높은 SNR 구간에서는 랭크가 줄



(그림 4) 1-D Low Rank LMMSE 채널 추정



(그림 5) LS, LMMSE, Low Rank LMMSE MSE 비교

어 subspace의 dimension이 줄어 나타나는 현상 때문에 채널 추정 오차로 인한 MSE 성능의 저하가 나타남을 볼 수 있다.

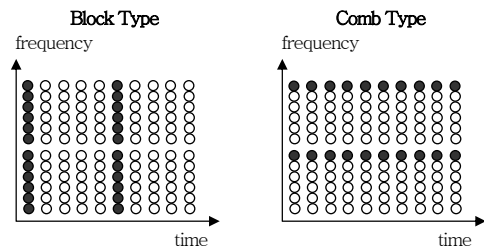
Ⅲ. PSAM 채널 추정

PSAM 기법은 1980년대 단일 반송파(single carrier) 시스템용으로 제안되었으며 1997년에 Peter Hoeher는 2-D Wiener filtering을 이용한 PSAM 채널 추정 기법과 Separable Wiener filtering 기법을 제안했고 같은 해에 Rickard Nilsson은 이를 분석했다. PSAM 채널 추정은 시간과 주파수 축에서 빠르게 변화하는 채널 환경에서 채널값을 추정하는데 사용된다. 채널의 감쇠는 시간과 주파수에서 높은 상관관계(correlation)를 갖기 때문에 급변하는

채널 환경에서 채널을 추정하기 위해 시간과 주파수 축 상에서 파일럿을 일정한 간격으로 배치하여 시간과 주파수의 상관관계를 이용하여 채널의 변화를 추정하는 기법이 PSAM 채널 추정 기법이다. 따라서 PSAM 채널 추정 기법의 성능은 파일럿의 배치와 간격에 따라 큰 영향을 끼치게 된다.

1. Block and Comb 타입 채널 추정

PSAM 채널 추정 기법 중에 (그림 6)과 같이 block 타입과 comb 타입의 1-D PSAM 채널 추정 기법이 있다. Block 타입은 slow fading 채널환경에서 적합한 채널 추정 기법으로 모든 부반송파에 파일럿을 배치하고 주파수축에서 LS 또는 LMMSE 채널 추정을 하고 시간축으로 여러 가지 보간법(linear, second order, low-pass, spline cubic, time domain interpolation 등)으로 데이터가 위치한 부채널을 추정하는 기법이다. 반면 comb 타입 채널 추정은 fast fading 채널환경에서 적합한 채널 추정 기법으로 특정한 주파수의 모든 심볼에 파일럿을 배치하여 LS, LMMSE 채널 추정을 하고 주파수

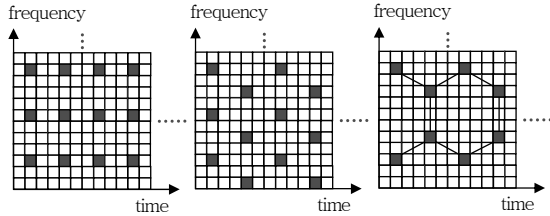


(그림 6) Block and Comb Pilot Arrangement

축으로 보간법을 이용하여 채널을 추정하는 기법이 다[11].

2. 2차원 PSAM 파일럿 패턴

채널 추정을 위해 쓰는 파일럿의 개수는 SNR과 채널 추정 성능 사이의 trade-off의 관계에 있다. 파일럿의 개수를 많이 사용하여 파일럿 사이의 거리를 가깝게 할수록 채널추정의 오차가 줄어들어 성능이 좋아지지만 SNR이 줄어드는 단점이 있다. (그림 7)은 3가지 파일럿 패턴을 보여준다.



(그림 7) 2-D PSAM 파일럿 패턴

빠르게 변화하는 채널값을 추정하기 위해 파일럿의 배치는 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 이론을 만족해야 한다. 시간축의 파일럿 배치는 (4)와 같이 도플러 확산의 역수인 동기 시간(coherence time)보다 작아야 하고 주파수축의 파일럿 배치는 (5)와 같이 최대 다중 경로 지연 확산(maximum multipath delay spread)의 역수인 동기 대역폭(coherence bandwidth)보다 작아야 한다[6].

$$N_t < (N+L)T_s \frac{1}{B_d} = \frac{(N+L)T_s}{\frac{2f_{D,max}}{NT_s}} = \frac{1}{2(1+\frac{L}{N})f_{D,max}} \quad (4)$$

$$N_f < NT_s \frac{1}{\tau_{max}} = \frac{NT_s}{LT_s} = \frac{N}{L} \quad (5)$$

여기서 τ_{max} 는 최대 다중 경로 지연 확산, B_d 는 도플러 확산, $f_{D,max}$ 는 최대 도플러 주파수, N 은 부반송파 개수, L 은 cyclic prefix의 부반송파 개수, 전체데이터 신호 대비 파일럿의 밀도는 $\epsilon = \frac{1}{N_t N_f}$, 한 개의

OFDM 심볼구간은 $(N+L)T_s$, 부반송파간의 간격은 $\frac{1}{NT_s}$ 이다.

3. 2-D Wiener Filtering

2-D Wiener filter를 사용한 2-D LMMSE 채널 추정기는 MSE의 관점에서 최적의 성능을 보인다 [5]. 2-D LMMSE 채널 추정 절차는

- <1단계> LS 채널 추정을 통해 파일럿이 위치한 부 채널의 채널값을 추정한다.
- <2단계> 그 추정된 파일럿 채널값을 IFFT하여 채널 충격 응답을 추정하고 지연 확산을 계산한다. 또한 이동체의 최대 속도와 중심 주파수를 이용하여 최대 도플러 주파수를 구한다.
- <3단계> 지연 확산을 이용하여 주파수 상관함수를 구하고 최대 도플러 주파수를 이용하여 시간 상관함수를 구하여 데이터의 채널값과 파일럿의 채널값과의 상호상관함수 R_{hp} 를 구하고 파일럿 채널값의 자기상관함수 R_{pp} 를 구한다.
- <4단계> 마지막으로 이를 토대로 파일럿 채널값 p 를 곱하면 2-D LMMSE 채널 추정값 $\hat{h} = R_{hp} R_{pp}^{-1} p$ 를 구할 수 있다.

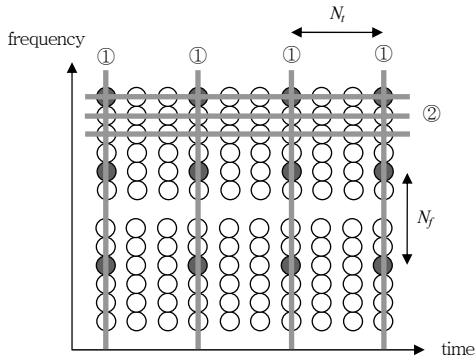
Wiener filtering을 이용한 2-D LMMSE는 추정하고자 하는 채널과 가까운 몇 개의 파일럿의 추정된 채널만을 골라 상관관계를 구하게 된다. 왜냐하면 파일럿과의 떨어진 정도가 가까울수록 높은 상관관계를 갖고 멀수록 낮은 상관관계를 갖기 때문이다. <표 2>는 2-D 채널추정기별로 연산량을 비교한 표이다[7]. 2-D LMMSE 채널추정기는 이를 수행하기 위해 너무 많은 연산량이 필요하므로 복잡도가 커서 실제로 구현하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 Low rank LMMSE와 Separable Wiener filtering 기법이 제안되었다.

- Separable Wiener filtering

채널이 WSSUS하다면 연산량을 줄이기 위해 1-D Wiener filter 두 개를 주파수축과 시간축에 각각 사용하여 채널을 추정하는 기법이 사용되고 실제로 2-D Wiener filter를 사용했을 때와 비슷한 성능을

〈표 2〉 2차원 PSAM 채널추정 연산량 비교표

채널추정기	원리	연산량	파일럿 개수
2-D LMMSE	K_p 개의 가까운 파일럿 사용함	K_p	K_p
Low rank 2-D LMMSE	K_p 개의 파일럿과 rank p 를 이용하여 K_h 개의 채널값 추정함	$p\left(1 + \frac{K_p}{K_h}\right)$	K_p
Separable Wiener filter	주파수축의 K_f 개의 탭과 시간축의 K_t 개의 탭을 2개의 필터로 나누어 추정함	$\frac{K_f}{K_t} + K_t$	$K_f K_t$
Low rank Separable Wiener filter	Rank p 를 갖는 주파수축의 K_p 개의 탭과 시간축의 K_t 개의 탭을 2개의 필터로 나누어 추정함	$\frac{p}{N_t}\left(1 + \frac{K_p}{K_h}\right) + K_t$	$K_p K_t$



(그림 8) 1-Dx2 Separable Wiener Filtering

보인다. 복잡도를 고정했을 때 오히려 성능은 1-Dx2 Separable LMMSE 채널추정기가 2-D Wiener filter를 사용했을 때보다 좋다. 1-Dx2 Separable LMMSE estimator의 채널을 추정하는 과정은(그림 8)과 같다[5].

①과정은 단지 주파수축으로 1-D Wiener filtering을 하여 주파수축의 행렬 계수(6)을 구하고 (7)을 이용하여 ①주파수축의 채널을 추정하게 된다.

$$W_k = R_{H\hat{H}_{LS,k}} R_{\hat{H}_{LS}\hat{H}_{LS}}^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{h}_k = \sum_{m=1}^p W_k^m \times \hat{h}_{LS} \quad (7)$$

②과정은 ①과정을 통해 추정한 채널값을 가지고 시간축에서 채널을 추정한다. 파일럿이 위치한 채널 값뿐만 아니라 ①과정을 통해 추정한 데이터가 위치해 있는 채널값도 파일럿처럼 사용하여 행렬 계수(8)을 구하고 (9)를 이용하여 시간축상의 모든 채널

을 추정한다.

$$W_l = R_{H\hat{H}_{LS,l}} R_{\hat{H}_{LS}\hat{H}_{LS}}^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{h}_l = \sum_{m=1}^p W_l^m \times \hat{h}_{LS} \quad (9)$$

최종적으로 Wiener filter의 행렬 계수값 $W_{k,l}$ 을 구할 수 있고 1-Dx2 Separable LMMSE 채널추정 $\hat{h}_{k,l} = \sum_{m=1}^p W_{k,l}^m \times \hat{h}_{LS}$ 를 계산하여 시간축과 주파수축의 모든 채널을 추정한다[5].

4. 채널 추정 기법의 선택

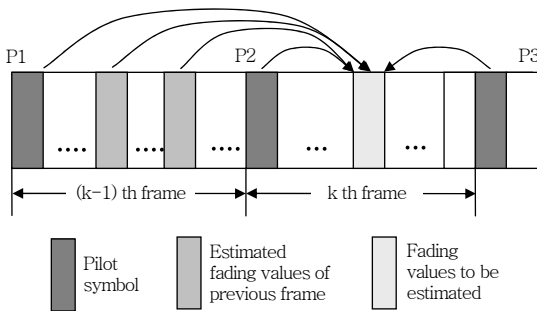
OFDM 시스템에서 다중 경로 감쇠로 인한 채널의 왜곡을 추정하고 보상하기 위해 훈련심볼을 이용한 채널 추정 기법을 쓸 것인가? 아니면 PSAM 채널 추정 기법을 쓸 것인가? 하는 문제는 결국 무선 통신 시스템이 속한 채널의 특성에 의해 결정된다.

WPAN이나 WLAN과 같은 패킷 타입의 근거리 통신의 경우 지연 확산과 도플러 확산이 작기 때문에 프리앰블에서의 훈련 심볼만을 이용한 채널 추정 기법을 사용한다. 반면 이동통신 시스템과 같이 큰 넓은 지역의 셀을 갖는 경우 도플러 확산과 지연 확산이 크고 시간과 주파수축에서 급격하게 채널값이 변하기 때문에 데이터값 사이에 파일럿을 나이퀴스트 샘플링 이론에 따라 배치하고 2-D LMMSE 알고리즘 또는 2-D Low rank LMMSE와 Separable Wiener 필터를 이용한 기법을 사용하여 채널을 추정한다.

IV. ESAE & Blind 채널 추정

1997년에 Le-hai Nam에 의해 제안된 ESAE 채널 추정 기법은 채널 추정을 위해 파일럿 심볼만 이용하는 것이 아니라, (그림 9)와 같이 이전의 프레임에서 추정된 채널값도 마치 파일럿과 같이 사용하여 채널을 추정한다. ESAE 기법은 PSAM 기법보다 높은 SNR 구간과 fast fading 채널 환경에서 더 낮은 BER 성능을 보인다. 그러나 PSAM 기법에 비해 연산량이 증가하고 이전 추정된 채널값의 오차가 쌓일수록 오차가 커지므로 안전성(stability)에 문제가 있는 단점이 있다[7].

지금까지 OFDM 시스템에서 적지 않은 Blind 채널 추정 기법이 제안되었는데 그 중에서 한 가지 방법을 간략히 소개한다. Blind 채널 추정은 파일럿을 사용하지 않고 순수하게 OFDM 신호의 특성을 이

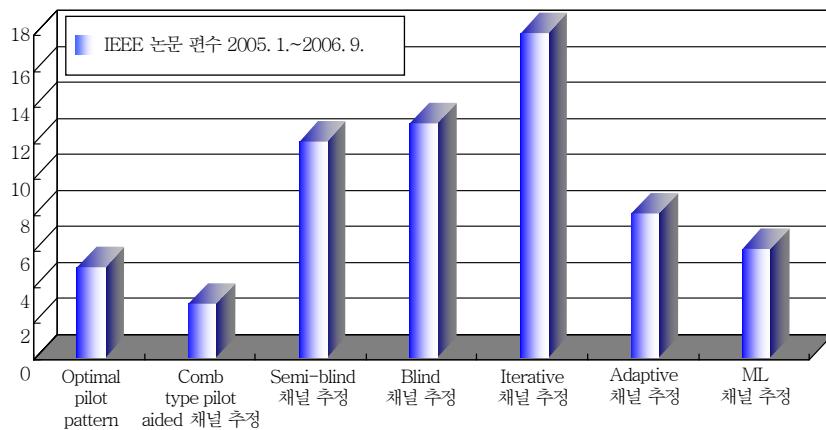


(그림 9) ESAE 채널 추정

용하여 채널을 추정하는 기법이다. OFDM 시스템에서는 각 심볼의 일부를 복사하여 이를 심볼의 앞에 CP로 만들어 전송하는 특성을 이용한다. 다중 경로 채널을 통과한 수신신호는 전송신호와 채널의 컨볼루션 결과에 잡음이 더하여지는 Toeplitz 행렬의 형태로 표현된다. 여기서 전송 신호 행렬이 full rank 라고 가정한다면 하나의 심볼이 전송되었을 때 한 개의 심볼의 처음과 뒷부분은 CP에 의해 같으므로 서로 빼면 CP의 subspace만 제거되어 채널을 추정할 수 있다[8].

V. 최신 연구 동향

지난 몇 십 년 동안 수많은 채널 추정 기법들이 제안되고 연구되어 왔다. 대표적으로 위에 언급한 훈련심볼을 이용하거나 파일럿을 이용한 PSAM, ESAE 채널추정과 파일럿을 이용하지 않는 Blind 채널 추정 등의 채널 추정 기법들이 제안되었다. (그림 10)의 통계 자료는 2005년 1월에서 2006년 9월까지의 IEEE의 OFDM 시스템에서 채널 추정 기법에 따른 논문 게재 편수를 조사한 것이다. 최근의 채널 추정에 관한 연구는 (그림 10)에서 볼 수 있듯이 Blind 채널 추정과 Semi-blind 채널 추정에 대한 많은 관심과 연구로 말미암아 많은 논문이 발표되었다. 또한 기존의 채널 추정 기법보다 더욱 채널 추정



(그림 10) IEEE의 OFDM 시스템에서의 채널 추정 논문 게재 통계 자료

성능을 높이기 위해 기존의 채널 추정 기법에 결정 피드백(decision feedback)을 결합한 반복적인(iterative) 채널 추정 기법에 대한 많은 논문이 발표되고 활발한 연구가 진행되고 있다.

WSSUS Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering

약어 정리

1-D	1 Dimensional
2-D	2 Dimensional
CP	Cyclic Prefix
ESAE	Extended Symbol-Aided Estimation
HR-WPAN	High data Rate Wireless Personal Area Network
ISI	Inter-Symbol Interference
LMMSE	Linear Minimum Mean Square Error
LS	Least Square
MSE	Mean Squared Error
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSAM	Pilot Symbol Aided Modulation
SVD	Singular Value Decomposition
WLAN	Wireless Local Area Network

● 용어해설 ●

주파수 선택적 감쇠(frequency selective fading): 전송신호가 여러 장애물에 의해 반사되는 다중경로 채널 환경에 의해 마지막 반사 신호가 수신되는 시간을 최대 지연 확산(maximum delay spread)이라 하는데 광대역 고속 전송의 경우 신호의 주기가 최대 지연 확산보다 짧은 경우 이 채널의 주파수 특성을 말함

주파수 비선택적 감쇠(frequency flat fading): 협대역을 사용하는 경우 신호의 주기가 최대 지연 확산보다 긴 주파수 특성

WSSUS (Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering) channel: 다중 경로 감쇠 채널의 특별한 종류로써 시간지연(time-delay)과 도플러 천이(doppler shift)에 서로 상관 관계가 없는 채널 모델

참고 문헌

- [1] Richard Van Nee, "OFDM for Wireless Multimedia Communications," Artech House Publishers, 2000.
- [2] Jap-Jaap van de be and Ove Edfors, "On Channel Estimation in OFDM Systems," *IEEE VTC*, Vol.2, July 1995.
- [3] Ove Edfors, "OFDM Channel Estimation by Singular Value Decomposition," *IEEE Tran. Comm.*, Vol.46, No.7, July 1998.
- [4] Rickard Nilsson, "An Analysis of Two-Dimensional Pilot-Symbol Assisted Modulation for OFDM," *IEEE JCPWC'97*, 1997.
- [5] Peter Hoeher, "Two-Dimensional Pilot-Symbol-Aided Channel Estimation by Wiener Filtering," *ICASSP*, Vol.3, Apr. 1997.
- [6] M. Sandell and O. Edfors, "A Comparative Study of Pilot-based Channel Estimators for Wireless OFDM," Research Report TULEA 1996:19, Sep. 1996.
- [7] Le-Hai NAM, "Extended Symbol-Aided Estimation for Non-selective Rayleigh Fading Channels," *IEICE Trans. Fund*, Vol.E80-A, No.11, Nov. 1997.
- [8] Bertrand Muquet "Subspace-Based Blind and Semi-Blind Channel Estimation for OFDM Systems," *IEEE Trans. Signal Proc.*, Vol.50, No.7, July 2002.
- [9] IEEE 802.15.3 Standard, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," IEEE, 2003.
- [10] IEEE std 802.11a-1999, "Part III: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications High-speed Physical Layer in 5GHz Band," 1999.
- [11] Sinem Coleri, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems," *IEEE Tran. Broad.*, Vol.48, Sep. 2002.