

OFDM 시스템에서의 시변 채널 추정 및 신호 검출

김형중, 박정호, 박병준, 김지형, 강창언, 홍대식
연세대학교 전기전자공학과 정보통신연구실

Channel Estimation and Detection Techniques for OFDM Systems in Time Varying Channels

Hyungjung Kim, Jeongho Park, Byungjoon Park, Jihyung Kim, Changeon Kang and Daesik Hong
Information and Telecommunication Lab.
Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University

E-mail : livenoa@itl.yonsei.ac.kr

Abstract

In this thesis, a new channel estimation technique is proposed for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) over time varying channels. The channel estimation algorithm exploits the fact that the estimated channel impulse response (CIR) by using pilot signal is the average value of the CIR variation within an OFDM symbol period. With this fact, the CIR variation is simply estimated through lowpass interpolation of the CIRs of the adjacent OFDM symbols. For signal detection, a time domain equalizer is used in this thesis. Simulation results show that the proposed system improves the bit error rate (BER) over time varying channels.

이에 본 논문은 시변 채널 환경에서의 ICI의 영향을 줄이기 위해 시변 채널 추정기법을 제안한다. 또한 시간 영역 등화기를 사용하여 신호를 검출하는 방법을 기술하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II절에서는 시변다중경로채널환경에서의 OFDM 시스템 모델을 살펴본다. III절에서는 시변다중채널 추정기법을 제안하고 시간 영역 등화기법을 기술한다. IV절에서는 Wireless Local Area Networks (WLAN) 채널에서의 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 평가하며, V절에서 본 논문의 결론을 내린다.

I. 서론

OFDM 전송방식은 전체 전송대역을 다수의 협대역 부채널로 분할하여 각 부채널로 데이터를 병렬 전송한다. 이 방식은 심볼의 구간이 길어져 채널지연에 대한 영향을 덜 받게 되어 다중경로 페이딩에 강하다. 그러나 길어진 심볼구간은 시변채널환경에서 부정적인 영향을 준다. OFDM 심볼구간 내에서 채널이 변할 경우 부반송파간 직교성이 상실되어 채널간 간섭 (Inter-Channel Interference : ICI)이 발생된다. 그로 인해서 파일럿 신호가 ICI의 영향을 받게 되어 채널추정에도 영향을 준다.

II. 시변다중경로채널환경에서의 OFDM 시스템 모델

OFDM 시스템에서 입력 비트열은 M -ary 데이터 심볼 X_m 으로 맵핑된다. N 개의 부반송파를 가지는 기저대역 OFDM 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n = \sum_{m=0}^{N-1} X_m e^{j2\pi mn/N}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

여기서, x_n 은 OFDM 신호의 n 번째 샘플이다. 전체경로 수가 L 개인 다중경로채널을 가정할 때 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_n = \sum_{l=0}^{L-1} h_{n,l} x_{n-l} + w_n, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2)$$

여기서 $h_{n,l}$ 과 w_n 는 각각 l 번째 경로의 복소수 이득과 가산성 백색 가우스 잡음 (Additive White Gaussian Noise : AWGN)의 n 번째 샘플을 나타낸다. 위 식에서 cyclic prefix 가 제거된 후 $0 \leq n \leq N-1$ 사이의 샘플신호가 fast Fourier transform (FFT)에 의해 복조되는데, 이 때 cyclic prefix 의 길이가 다중경로 채널의 최대 지연확산보다 길다면 m 번째 수신 부반송파의 출력은 다음과 같다.

$$Y_m = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} X_k H_l^{(m-k)} e^{-j2\pi k l / N} + W_m \quad (3)$$

여기서 W_m 은 w_n 의 FFT 결과이다. 또한 $H_l^{(m-k)}$ 는 시변다중경로채널의 FFT 결과이며 다음과 같이 표현된다.

$$H_l^{(m-k)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h_{n,l} e^{-j2\pi n(m-k)/N} \quad (4)$$

이 때 m 번째 수신 부반송파와, k 번째 전송 부반송파사이의 채널응답을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$a_{m,k} = H_0^{(m-k)} + H_1^{(m-k)} e^{-j2\pi k / N} + \dots + H_{L-1}^{(m-k)} e^{-j2\pi k(L-1)/N}, \quad 0 \leq (m,k) \leq N-1 \quad (5)$$

식 (5)를 이용해서 식 (3)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$Y_m = a_{m,m} X_m + \underbrace{\sum_{k=0, k \neq m}^{N-1} a_{m,k} X_k}_I + W_m \quad (6)$$

여기서 I_m 은 m 번째 수신 부반송파에서의 ICI 이다. 따라서 시변다중경로채널환경에서 복조된 OFDM 신호는 ICI 의 영향을 받게 된다.

III. 시변다중채널 추정 및 시간 영역 등화기법

본 절에서는 시변다중채널 추정기법을 제안한다. 채널추정은 파일럿 심볼을 이용한다. 먼저 사용된 파일럿 구조와 채널 임펄스 응답 추정 기법을 설명하고 이어서 채널 보간 기법을 제안한 후 시변채널 등화기법을 설명한다.

3.1 파일럿 구조 및 채널 임펄스 응답 추정 기법

본 논문에서는 N_p 개의 파일럿 심볼을 전송심볼 X_m 사이에 다음과 같이 균일한 간격으로 삽입하는 Comb 타입 파일럿을 사용한다. 즉 특정 부반송파를 파일럿으로 사용한다.

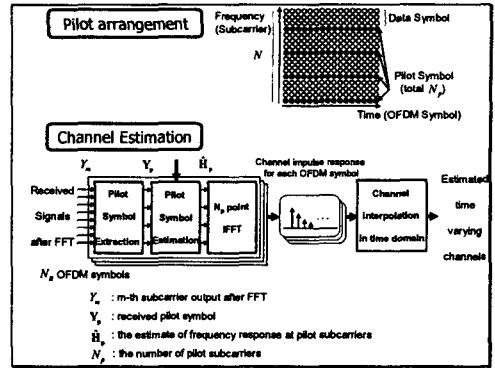


그림 1 파일럿 구조와 채널 임펄스 응답 추정 기법

$$X_m = \begin{cases} \text{pilot symbol} & m = 0, M, \dots, N-M \\ \text{data symbol} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $M=N/N_p$ 이다.

그림 1 은 사용된 파일럿 구조와 제안된 채널 임펄스 응답 추정 기법을 제시한다. 이때 least square (LS) 방법에 의한 파일럿 부반송파에서의 채널추정은 식 (6)에서 수신 파일럿 심볼(Y_m)을 송신 파일럿 심볼(X_m)로 나누어 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{H}_{m,b} = a_{m,m} + \frac{I_m}{X_m} + \frac{W_m}{X_m} \quad (8)$$

그러나 한 OFDM 심볼 구간 안에서 채널이 변하는 경우 위와 같은 주파수 영역 채널추정 방법은 채널의 시변특성을 추적하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 LS 추정된 주파수 영역 채널응답을 시간영역으로 변환하고 저역통과보간법을 적용하여 시변채널을 추정한다.

첫째로 파일럿 부반송파에서의 채널응답을 구한다(총 N_p 개). 여기서 식 (8)을 식 (4)와 식 (5)를 사용해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{H}_{m,b} &= \sum_{l=0}^{L-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h_{n,l} \right) \cdot e^{-j2\pi n m / N} + \frac{I_m}{X_m} + \frac{W_m}{X_m} \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} h_{avg,l} \cdot e^{-j2\pi n m / N} + \frac{I_m}{X_m} + \frac{W_m}{X_m} \end{aligned} \quad (9)$$

즉, LS 추정된 채널응답은 FFT 를 통과한 수신신호를 이용하기 때문에 OFDM 심볼구간 내 시변 채널 임펄스 응답 평균값($h_{avg,l}$)의 주파수 영역 표현이 된다.

다음 과정으로 구해진 채널응답은 N_p 의 크기를 가지는 inverse fast Fourier transform (IFFT)를 이용해 채널 임

펄스 응답으로 변환된다. 채널 임펄스 응답의 i 번째 ($i=0,1,\dots,N_p-1$) 경로값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{h}_{avg,i} &= \frac{1}{N_p} \sum_{k=0}^{N_p-1} \hat{H}_{k,M,i} \cdot e^{j2\pi k/N} \\ &= \tilde{h}_{avg,i} + \frac{1}{N_p} \sum_{k=0}^{N_p-1} \frac{I_{k,M} + W_{k,M}}{X_{k,M}} \cdot e^{j2\pi k/N} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $H_{k,M,i}(k=0,1,\dots,N_p-1)$ 은 $H_{m,i}(m=0,M,\dots,N-M)$ 의 다른 표현이다. ICI ($= I_{k,M}$)는 AWGN 으로 모델링 될 수 있다[1]. ICI 의 분산은 정규화 도플러 주파수로부터 구할 수 있다[2]. ICI 와 AWGN 의 분산을 각각 σ_n^2 와 σ_i^2 로 정의하면 추정에러항의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E \left[\left| \frac{1}{N_p} \sum_{k=0}^{N_p-1} \frac{I_{k,M} + W_{k,M}}{X_{k,M}} \cdot e^{j2\pi k/N} \right|^2 \right] \\ \sim N \left(0, \frac{\beta \cdot (\sigma_i^2 + \sigma_n^2)}{N_p} \right), \quad \beta = E[|X_{k,M}|^2] \cdot E[|1/X_{k,M}|^2] \end{aligned} \quad (11)$$

즉 IFFT 의 이동평균 효과로 인해 ICI 와 AWGN 의 영향이 $(1/N_p)$ 로 줄어든다. 변환된 채널 임펄스 응답은 N_p 개의 경로를 가진다. 일반적으로 파일럿의 개수(N_p)는 다중경로 채널의 길이(L)보다 같거나 크므로 N_p 개의 채널경로중 L 개를 취하여 보간 기법을 적용한다. 잔여경로는 부가적 채널 추정 에러로 작용되므로 적절한 문턱값을 이용해 잔여경로의 값을 0 으로 조정한다. 본 논문에서는 식 (11)의 분산값을 문턱값으로 선택하였다.

3.2 채널 보간 기법

그림 2 는 제안된 채널보간기법을 나타낸다. 보간기법으로는 저역통과 보간기법을 사용한다. 느린 페이딩 환경에서 채널 임펄스 응답은 OFDM 심볼구간 내에서 선형적으로 변한다. 이 경우 추정된 채널 임펄스 응답의 평균값($\tilde{h}_{avg,i}$)은 OFDM 심볼의 중간샘플 위치에 해당하는 채널 임펄스 응답값($\tilde{h}_{N/2,i}$)이 된다. 이러한 특성을 이용하여 다음과 같은 보간기법을 제안한다. 첫째로 N_B 개의 OFDM 심볼로부터 구해진 평균 채널 임펄스 응답을 각각의 OFDM 심볼의 중간샘플에 채널 경로별로 위치시킨다. 이후 각 경로에 대해 저역통과 보간기법을 적용하여 총 $N_B \cdot (N+N_{GI})$ 샘플길이를 가지는 시변 채널 임펄스 응답을 추정한다. 덧붙여, 보간기법은 첫 번째 OFDM 심볼의 중간샘플부터 적용된다. 따라서 추정된 시변 채널은 OFDM 심볼길이의 절반만큼 ($N/2$) 지연되어 추정된다.

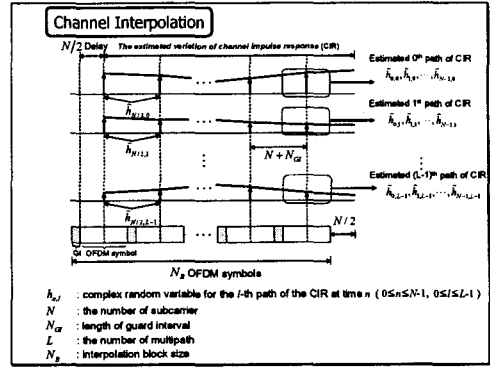


그림 2 채널 보간 기법

3.3 시간 영역 등화기법

본 절에서는 OFDM 시스템에서의 시간영역 등화기를 기술한다. 시변채널에서 단일펄 등화기를 사용할 경우 ICI 가 발생한다. 따라서 3.1 절에서 제안된 시변채널을 등화할 수 있는 기법이 요구된다. 추정된 시변채널을 식 (2)에 적용하여 수신신호 y_n 을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$y = \tilde{h}x + w \quad (12)$$

여기서, y, x 와 w 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} y &= [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T \\ x &= [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T \\ w &= [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T \end{aligned} \quad (13)$$

추정된 채널행렬 \tilde{h} 는 다음과 같다.

$$\tilde{h} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{0,0} & 0 & \dots & \tilde{h}_{0,L-1} & \dots & \tilde{h}_{0,1} \\ \vdots & \tilde{h}_{1,0} & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \tilde{h}_{L-1,L-1} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \tilde{h}_{N-1,L-1} & \dots & \tilde{h}_{N-1,0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

LS 방법을 이용한 시간영역 등화기는 다음과 같이 채널행렬의 역행렬로 구해진다.

$$\hat{x} = \tilde{h}^{-1}y \quad (15)$$

이후 등화된 OFDM 신호는 FFT 를 통해 복조된다.

IV. 모의 실험

본 논문에서는 제안된 채널추정 및 등화기법의 성능을 평가하기 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험을

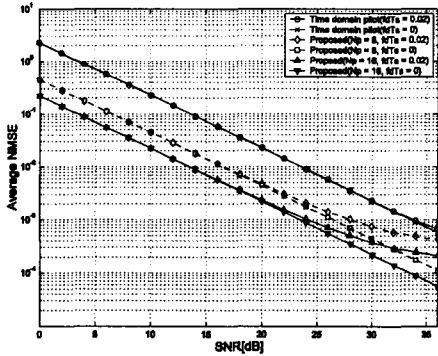


그림 3 제안된 채널추정기법과 시간영역 파일럿 채널 추정 기법의 채널 임펄스 응답 평균 NMSE 비교

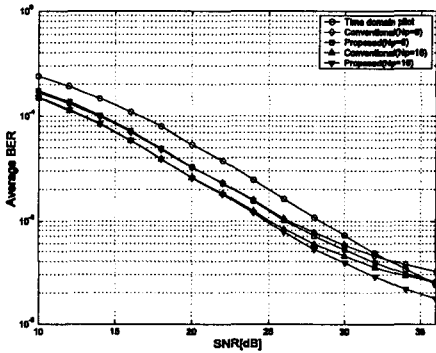


그림 4 제안된 시스템의 BER 비교 ($f_d T_s = 0.02$)

위한 환경은 다음과 같다. 전체 부반송파의 개수는 $N=64$ 이며 보호구간의 길이는 $N_{GI}=8$, 파일럿 심볼의 개수는 $N_p=8, 16$ 으로 설정하였다. 심볼변조는 16QAM 이며 보간법이 적용되는 OFDM 심볼 개수는 $N_b=10$ 이다. 모의실험에서는 채널길이가 $L=4$ 인 WLAN 지수감소 채널 모델을 사용하였다.

그림 3 은 제안된 채널추정기법과 시간영역 파일럿 채널 추정 기법 [3]의 채널 임펄스 응답의 정규화된 평균 제곱 오차 (Normalized Mean Square Error: NMSE)를 비교한 것이다. 여기서 $f_d T_s$ 는 정규화된 도플러 주파수를 뜻한다. 제안된 채널추정기법은 파일럿 심볼이 AWGN 이외에 ICI 의 영향을 받기 때문에 시변채널환경에서 NMSE 가 증가하지만 이동평균에 의해 AWGN 과 ICI 의 영향이 감소하여 시간영역 파일럿 방식에 비해 우수한 성능을 보인다. 또한 파일럿 수가 증가할수록 이동평균의 효과가 커져 성능이 향상된다.

그림 4 는 제안된 채널추정과 신호검출기법의 성능을 BER 관점에서 살펴본 것이다. 'Conventional' 은 추정

된 채널이 OFDM 심볼안에서 변하지 않는다고 가정하고 1-tap 등화기를 적용한 것이다 [4]. 이 방법은 ICI 의 영향을 제거하지 못하기 때문에 시변채널환경에서 성능이 떨어진다. 'Time domain pilot' 은 시간영역 파일럿으로 추정된 채널을 이용해 시변채널을 등화하는 방법이다. 'Time domain pilot' 방법과 제안된 시스템 모두 ICI 를 제거하지만 제안된 방법은 낮은 NMSE 성능으로 인해 'Time domain pilot' 방법보다 뛰어난 성능을 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 시변채널환경 OFDM 시스템에서의 ICI 의 영향을 줄이기 위해 새로운 시변다중채널 추정 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 주파수 영역 채널 응답을 시간영역으로 변환하고 변환된 채널 임펄스 응답 경로별로 저역통과 보간기법을 적용하여 OFDM 심볼구간 내 시변 채널 임펄스 응답을 추정한다. 추정된 채널은 시간 영역 등화기를 이용하여 OFDM 복조 전에 등화된다. 따라서 신호검출시 ICI 의 영향은 줄어든다. 이러한 장점을 고려할 때 제안된 기법은 느린 페이딩에서의 OFDM 시스템에 적합하다.

참고문헌

- [1] M. Russell and G. L. Stuber, "Interchannel interference analysis of OFDM in a mobile environment," in *Proc. Of Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 820-824, Jul. 1995.
- [2] J. Li and M. Kavehrad, "Effects of time selective multipath fading on OFDM systems for broadband mobile applications," *IEEE Comm. Letter*. Vol. 3, pp. 332-334. Dec. 1999
- [3] W. G. Jeon, K. H. Chang and Y. S. Cho, "An equalization technique for orthogonal frequency-division multiplexing systems in time -variant multipath channels," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 47, pp. 27-32, Jan. 1999.
- [4] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri and A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 48, pp. 223-229, Sep. 2002.