

MIMO-OFDM 시스템에서의 채널 추정 기법

A Channel Estimation Method for MIMO-OFDM Systems

김경석*, 안도량, 이동욱
Gyeong Seok Kim*, Do Rang Ahn, Dong Wook Lee

Abstract - In this paper, we propose an channel estimation method for Multi-Input Multi-Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MIMO-OFDM). The proposed method estimates uniquely all channel frequency responses needed in space-frequency block coded OFDM systems using "comb-type" pilot symbols. To reduce the computational complexity of the proposed method, least square(LS) and linear minimum mean square error(LMMSE) are used in the frequency-domain. The performance of the proposed approach is evaluated by computer simulation for rayleigh fading channel.

Key Words : MIMO-OFDM, SFBC, Channel Estimation, LS, LMMSE, Interpolation

1. 서론

최근 인터넷을 통한 음성, 비디오 및 데이터 통신의 급속한 성장과 더불어 노트북 및 이동 전화 등의 보급이 보편화됨으로써 이동 멀티미디어 서비스에 대한 사용자의 욕구가 크게 증가하고 있다. 이에 따라 무선 통신과 인터넷 및 멀티미디어의 결합은 매우 빠른 속도로 진행되고 있으며, 차세대 무선 광대역 멀티미디어 통신 시스템(Wireless Broadband Multimedia Communications Systems)을 정의하기 위하여 많은 국제 표준화 기구, 국내·외 기업과 연구소에서 이에 대한 연구 및 개발을 활발히 수행하고 있다. 그러나 이동통신 환경은 페이딩, 음영효과, 전파 감쇠, 잡음 및 간섭 등에 의해 신호의 신뢰성을 크게 저하시킨다. 다중 경로에 의한 페이딩 현상은 서로 다른 경로를 거쳐 수신되는 서로 다른 위상과 크기를 가지는 신호들의 합에 의한 심각한 신호 왜곡을 초래하게 된다. 이러한 페이딩 효과는 고속 데이터 통신을 이루기 위해 극복해야 할 과제 중의 하나이며, 이러한 무선 채널 특성을 극복하거나 그 성질을 이용하기 위한 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 이에 다수의 송수신 안테나를 이용한 Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing(MIMO-OFDM) 기술이 제안되었다[1][2][3]. 그러나, MIMO-OFDM 시스템에서는 용량의 극대화와 정확한 OFDM 심볼의 추정을 위해서는 채널 상태 정보가 필요하다.

이에 본 논문은 다중 경로 채널을 갖는 주파수 선택적 채널

에서의 MIMO-OFDM 시스템을 위한 채널 추정 기법을 제안한다. 제안된 기법은 주파수 영역에서 "comb-type"의 교차 삽입된 파일럿 심볼들을 이용하여 채널을 추정한다. 주파수 영역에서 LS(Least Square)와 LMMSE(Linear Minimum Mean Square Error) 추정 기법을 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시뮬레이션을 위한 시스템 모델, 3장에서는 파일럿 심볼을 이용한 채널 추정 기법을 제안한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 제시한 기법의 성능을 알아본다.

2. A Space-Frequency Block Coded OFDM 시스템

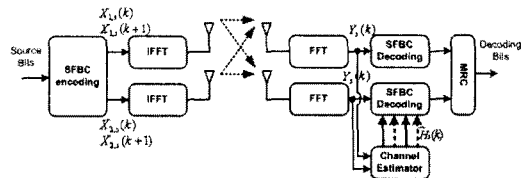


그림 1 SFBC-OFDM 블록도

그림 1은 SFBC(Space-Frequency Block Coding)를 이용한 MIMO-OFDM 시스템의 블록도이다[4]. 본 논문에서 사용한 송·수신 안테나의 수는 각각 두 개씩이다. 입력 데이터는 우선 SFBC 부호기에 의해 부호화 되고 IFFT 단에서 변조된다. s번째 심볼 주기에서 i번째 안테나로 전송되는 신호는 식 (1)과 같다.

$$x_i[s, n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_i[s, k] e^{j2\pi kn/N}, \quad i=1,2 \quad (1)$$

저자 소개

- * 金景錫 : 東國大學校 電氣工學科 碩士課程
- 安麟郎 : 東國大學校 電氣工學科 博士課程
- 李東旭 : 東國大學校 電氣工學科 教授·工學博士

이 때, N 은 부채널의 수이다. 다중 경로 채널에서의 지연 확산이 CP(Cyclic Prefix) 보다 작다고 가정하면, 수신단에서 FFT 단을 거친 신호는 식 (2)와 같다.

$$Y_j[s, k] = \sum_{i=1}^2 X_i[s, k] H_{ij}[s, k] + W_j[s, k], j=1, 2 \quad (2)$$

$$Y_j = \sum_{i=1}^2 X_i H_j^i + W_j \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{이때, } Y_j &= [Y_j[s, 0] \ Y_j[s, 1], \dots, Y_j[s, N-1]]^T \\ W_j &= [W_j[s, 0] \ W_j[s, 1], \dots, W_j[s, N-1]]^T \\ H_j^i &= [H_j^i[s, 0] \ H_j^i[s, 1], \dots, H_j^i[s, N-1]]^T \\ X_i &= \begin{bmatrix} X_i[s, 0] & 0 & \dots & 0 \\ 0 & X_i[s, 1] & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & X_i[s, N-1] \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이 때, $H_{ij}[s, k]$ 는 i 번째 송신 안테나와 j 번째 수신안테나 사이의 다중경로 채널의 채널 주파수 응답이다. 또한, $W_j[s, k]$ 는 AWGN의 DFT를 의미한다. 식 (3)은 식 (2)를 행렬식으로 표현한 것이다.

3. 파일럿을 이용한 채널 추정

전형적인 comb-type 파일럿에 의한 채널 추정 기법으로는 LS 기법이 사용된다. 복조된 신호로부터 채널 주파수 응답을 구하기 위한 LS 기법의 비용함수는 식 (4)와 같다.

$$S = \epsilon^H \epsilon = (Y_j - \widehat{Y}_j)^H (Y_j - \widehat{Y}_j) \quad (4)$$

$$\text{이때, } \widehat{Y}_j = X_1 \widehat{H}_j^1 + X_2 \widehat{H}_j^2$$

\widehat{H}_j^i 는 H_j^i 의 추정된 값이다. 또한 $(\cdot)^H$ 는 Hermitian transpose 이다. 식 (4)에서의 비용함수에서 \widehat{H}_1 과 \widehat{H}_2 를 최소화하기 위해서는 식 (5)와 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\nabla_{\widehat{H}_1} S = -X_1^H Y + X_1^H X_1 \widehat{H}_1 + X_1^H X_2 \widehat{H}_2 = 0 \quad (5)$$

$$\nabla_{\widehat{H}_2} S = -X_2^H Y + X_2^H X_1 \widehat{H}_1 + X_2^H X_2 \widehat{H}_2 = 0 \quad (6)$$

여기서 ∇ 은 복소 기울기를 의미한다. 수신된 신호들이 두 개의 송신 안테나로부터 전송된 신호들의 절대적 위치에 있어서, 다른 안테나로부터의 신호들이 간섭으로 여겨지기 때문에, 식 (5)와 (6)으로부터 일반적인 입력의 경우 채널 주파수 응답을 구할 수 없다[5].

본 논문에서는 위와 같이 다른 안테나의 신호들에 의한 간섭을 피하기 위해 식 (7)과 (8)과 같이 각 주기마다 파일럿을 교차 삽입하였다. comb-type의 파일럿 삽입 방법은 총 N 개의 부반송파에 N_p 개의 파일럿 심볼 $X_p(m)$, $m=0, 1, 2, \dots, N_p-1$ 를 심볼 $X(k)$ 에 주기적으로 삽입하는 것이다.

식 (7)과 (8)는 k 번째 부반송파 각 송신안테나에서 송신되

는 OFDM 신호를 나타낸다.

파일럿 심볼 $X_p(m)$ 는 계산의 복잡성을 줄이기 위해서 데이터 심볼과 같이 복소수 값을 갖거나, 동기를 위해 임의적인 데이터를 사용할 수 있다[6].

$$X_1(k) = \begin{cases} X(mL+l) & \\ X_p(m), & l=0, s=\text{even} \\ \text{Null Data} & l=0, s=\text{odd} \\ \text{Data Symbol}, & l=1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (7)$$

$$X_2(k) = \begin{cases} X(mL+l) & \\ X_p(m), & l=0, s=\text{odd} \\ \text{Null Data} & l=0, s=\text{even} \\ \text{Data Symbol}, & l=1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (8)$$

식 (9)는 각 송신 안테나에서의 첫 번째 심볼에서 파일럿 부반송파의 채널 응답이다. 두 번째 심볼에서 파일럿 부반송파의 채널응답은 바뀌게 된다.

$$\begin{cases} H_j^1 \\ H_j^2 \end{cases} = \begin{bmatrix} H_p(0) & H_p(1) & \dots & H_p(N_p-1) \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

수신된 파일럿 심볼 벡터를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있고,

$$Y_p = X_p \cdot H_p + I_p + W_p \quad (10)$$

$$\text{이때, } Y_p = [Y_p(0) \ Y_p(1) \ \dots \ Y_p(N_p-1)]^T$$

I_p 는 ICI(Inter-Channel Interference)이고, W_p 는 파일럿 심볼의 가우시안 노이즈 벡터이다. 또한 $(\cdot)_p$ 는 i 번째 송신 안테나에서 j 번째 수신안테나 사이에 전송되는 파일럿 심볼에 의한 모든 벡터 값을 나타낸다.

본 논문은 식 (10)로부터 LS 기법을 사용하여 채널을 추정하였다. 식 (11)는 LS 기법을 사용하여 추정된 파일럿 심볼의 채널 값이다.

$$\begin{aligned} \widehat{H}_{p, k} &= [H_{p, k}(0) \ H_{p, k}(1) \ \dots \ H_{p, k}(N_p-1)]^T \\ &= X_p^{-1} Y_p \\ &= \begin{bmatrix} Y_p(0) & Y_p(1) & \dots & Y_p(N_p-1) \\ X_p(0) & X_p(1) & \dots & X_p(N_p-1) \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (11)$$

$\widehat{H}_{p, k}$ 는 가우시안 노이즈와 ICI에 민감하다. 왜냐하면, 데이터 부반송파의 채널 응답이 파일럿 부반송파들의 보간에 의해 얻어지기 때문에, comb-type 파일럿 배열을 기초로한 OFDM 시스템의 성능은 파일럿 심볼의 추정값에 상당히 민감하다. 그러므로 본 논문에서는 block-type 파일럿 배열을 사용하는 OFDM 시스템에서 LS 기법보다 성능이 좋은 LMMSE 기법을 사용하였다[6].

파일럿 심볼에 의해 구해진 채널 응답을 이용하여 데이터 부반송파의 채널을 추정하게 된다. 또한 각 송신안테나에서 파일럿 심볼이 교차 삽입에 의한 심볼 사이의 채널도 추정하여야 한다. 본 논문에서는 식 (12)과 같이 2차 보간법을 이용

하여 데이터 부반송파의 채널을 추정하였다[6].

$$\begin{aligned} \widehat{H}(k) &= \widehat{H}(mL+1) \\ &= C_1 \widehat{H}_p(m-1) + \zeta \widehat{H}_p(m) + \zeta^* \widehat{H}_p(m+1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{이때, } \begin{cases} C_1 = \frac{\alpha(\alpha+1)}{2} \\ C_0 = -(\alpha-1)(\alpha+1) \\ C_{-1} = \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \end{cases}$$

또한, 파일럿 교차 삽입에 따른 심볼 사이의 채널을 추정하기 위해 식 (13)와 같이 선형 보간법을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \widehat{H}(k) &= \widehat{H}(mL+1) \left(1 - \frac{l}{L}\right) \widehat{H}_p(m) + \frac{l}{L} \widehat{H}_p(m+1) \\ &= \widehat{H}_p(m) + \frac{l}{L} (\widehat{H}_p(m+1) - \widehat{H}_p(m)), 0 \leq l \leq L \end{aligned} \quad (13)$$

3. 시뮬레이션 결과

제한된 채널 추정 기법은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 레일레이 페이딩 채널에서 Bit Error Rate(BER) 성능을 평가하였다. OFDM 시스템은 QPSK와 64-QAM 변조 방식을 적용하고, 총 부반송파 수는 512개이며, 삽입된 파일럿의 수는 46개 (L=11)이다. 채널 모델은 0.2 μ s의 지연을 갖는 2개의 다중경로와 도플러 주파수(f_d) 40Hz와 100Hz를 가지는 slow 레일레이 채널 모델과 fast 레일레이 채널 모델을 Jakes 채널 모델에 적용하였다[7]. 보호구간은 채널의 최대지연확산보다 크다고 가정한다.

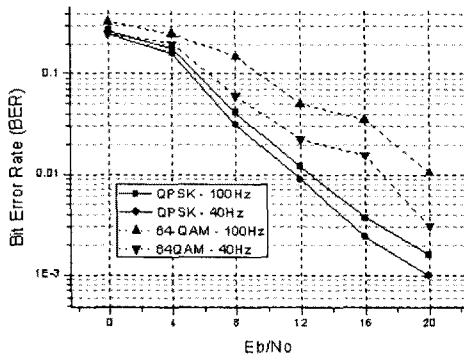


그림 2 도플러 주파수에 따른 QPSK와 64-QAM 변조 신호의 BER 성능 비교

그림 2는 본 논문에서 제시한 파일럿 삽입 기법을 이용하여 도플러 주파수와 변조 방식에 따른 BER 성능을 보여준다. QPSK 변조 신호의 경우 도플러 주파수가 커지더라도 성능 차이가 비슷하지만, 64-QAM 변조 신호의 경우 성능의 차이가 있는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 MIMO-OFDM 시스템의 파일럿 추정을 위해 각 안테나에 파일럿을 교차 삽입하는 방식을 제안하였다. 또한 LS와 LMMSE를 통해 채널을 추정하였으며, 2차 보간법과 선형 보간법을 사용하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 파일럿 삽입 방식을 통해 채널 추정이 가능함을 보였다. 하지만 64-QAM과 같이 좀 더 정확한 채널 추정이 필요한 경우 파일럿의 삽입 주기나 채널 추정 기법의 변화가 필요하다.

참고 문헌

- [1] S. M. Alamouti, "A Simple Transmitter Diversity Scheme for Wireless Communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Oct. 1998.
- [2] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction," *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. 44, No. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [3] H. Bölcskei, D. Gesbert, and A. J. Paulraj, "On the capacity of OFDM based spatial multiplexing Systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 50, pp. 225-234, Feb. 2002.
- [4] H. Bölcskei and A. J. Paulraj, "Space-frequency coded broadband OFDM systems," in *Proc. IEEE WCNC-62000*, Chicago, IL, Vol. 1, pp. 1-6, Sept. 2000.
- [5] W. G. Jeon, K. H. Paik, and Y. S. Cho, "An efficient channel estimation technique for OFDM systems with transmitter diversity," *The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication*, PIMRC 2000, Vol. 2, pp. 1246-1250, 2000.
- [6] M. Han. Hsieh, and C. H. Wei, "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels," *IEEE Trans., Consumer Electronics*, Vol. 44, No. 1, pp. 217-225, Feb. 1998.
- [7] W. C. Jakes, Jr, "Microwave mobile Communications," A Wiley-Interscience Publication, ISBN 0-471-43720-4, 1974.