

MIMO 시스템을 위한 결합 채널 검출 기법

박 상 준*

Aggregated Channel Estimation for MIMO Systems

Sangjoon Park*

요 약

본 논문에서는 MIMO 시스템을 위한 결합 채널 검출 기법을 제안한다. 제안 기법은 현재 전송 구간 및 이전 전송 구간들의 모든 파일럿 신호들을 포함하는 결합 신호 모델을 기반으로 채널 추정을 수행하여 현재 전송 구간에서의 채널 추정 성능의 향상을 도모한다. 모의실험 결과 채널 변화가 느린 환경에서 제안 기법의 결합 전송 구간의 수 증가에 따라 채널 추정 성능이 향상됨을 확인하였다.

Key Words : MIMO, Channel Estimation, Aggregated System Model, Pilot Signal, Reference Signal

ABSTRACT

In this letter, an aggregated channel estimation scheme is proposed for MIMO systems. Based on the aggregated signal model including the pilot signals for the current and previous time slots, the proposed scheme performs the channel estimation for the current time slot to improve the channel estimation accuracy. Simulation results confirm that the proposed scheme can improve the channel estimation accuracy for the slow fading channel as the number of aggregated time slots increases.

I. 서 론

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템 등의 무선 통신 시스템에서는 프리코딩 (precoding) 및 신호 검출 등의 작업을 위해 송수신단 사이의 채널 정보에 대한 추정이 요구된다.^[1-3] 하지만 MIMO 시스템에서 채널 추정을 위해 필요한 파일럿 신호 (pilot signal)의 전송 비율은 시스템 안테나의 수에 따라 증가하게 되며, 따라서 시스템 안테나의 수가 증가할수록 파일럿 오버헤드로 인한 전송 구간 (transmission time slot) 내의 데이터 전송 비율이 감소하게 된다.^[3] 따라서 보다 높은 시스템 성능을 얻기 위해서는 주어진 오버헤드에 따라 정확한 채널 추정을 수행할 필요가 있다.

이에 본 논문에서는 MIMO 시스템에서 통상적인 LS (Least-Square) 등의 채널 추정 방식의 성능 향상을 위한 결합 채널 검출 기법을 제안한다. 제안 기법에서는 여러 전송 구간에 걸친 파일럿 신호들을 포함하는 결합 신호 모델을 정의하여, 해당 결합 신호 모델을 바탕으로 LS 등의 채널 추정을 수행한다. 즉, 제안 기법은 현재 전송 구간뿐만 아니라 다른 채널 응답을 갖는 이전 전송 구간들에서의 파일럿 신호들을 동시에 활용하여 현재 전송 구간에서의 채널 정보를 획득한다. 이 때 서로 다른 전송 구간에서의 변화한 채널 응답에 따른 성분은 결합 신호 모델에서 잡음으로 모델링되며, 이를 통해 제안 기법은 이전 전송 구간에서 수신된 파일럿 신호로부터 현재 전송 구간의 채널에 대한 정보를 추가적으로 획득할 수 있다. 이를 바탕으로 제안 기법은 전송 구간들의 채널 변화가 크지 않은 경우 채널 추정 성능의 향상을 도모할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 및 수신단의 안테나 수가 각각 N 및 M 인 MIMO 시스템을 고려한다. 각 전송 구간에서는 고정된 채널 응답을 가지며, 이러한 채널 응답의 추정을 위해 각 전송 구간에서는 L 개의 자원 요소 (resource element)를 사용하여 파일럿 신호들을 전송한다. 이 때 t 번째 전송 구간에서 l ($1 \leq l \leq L$) 번째로 전송된 파일럿 신호에 대한 $M \times 1$ 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}_{t,l}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 이 논문은 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1C1C1003202).

• First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6684-9803) Kyonggi University, Department of Electronic Engineering, sj.park@kgu.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202104-078-A-LU, Received April 7, 2021; Revised April 27, 2021; Accepted April 28, 2021

$$\mathbf{y}_{t,l} = \mathbf{H}_l \mathbf{x}_{t,l} + \mathbf{n}_{t,l} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{x}_{t,l}$ 은 $N \times 1$ 파일럿 신호 벡터이며 $\mathbf{n}_{t,l}$ 은 각 원소의 평균이 0인 $M \times 1$ AWGN (Additive White Gaussian Noise) 벡터이다. 또한 \mathbf{H}_l 는 t 번째 전송 구간에서 송수신단 사이의 채널 응답을 나타내는 $M \times N$ 채널 행렬이다.

t 번째 전송 구간에서의 모든 $\mathbf{y}_{t,l}$ ($1 \leq l \leq L$)을 묶어 하나의 행렬 형태로 표현하게 되면 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{X}_t + \mathbf{N}_t \quad (2)$$

식 (2)에서 \mathbf{Y}_t 및 \mathbf{N}_t 는 각각 $\mathbf{y}_{t,l}$ 및 $\mathbf{n}_{t,l}$ 을 l 번째 열로 갖는 t 번째 전송 구간에서의 $M \times L$ 수신 신호 행렬 및 AWGN 행렬이며, \mathbf{X}_t 는 $\mathbf{x}_{t,l}$ 을 l 번째 열로 갖는 t 번째 전송 구간에서의 $N \times L$ 파일럿 신호 행렬이다. 수신단은 \mathbf{X}_t 를 사전에 알고 있으며, 따라서 \mathbf{X}_t 및 \mathbf{Y}_t 를 이용하여 채널 행렬 \mathbf{H}_t 에 대한 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_t$ 를 얻는다.

III. 제안 결합 채널 추정 기법

제안 기법에서는 총 K 개의 전송 구간에서의 파일럿 신호들을 이용한 결합 신호 모델을 이용한다. 즉, 이전 $(K-1)$ 개의 전송 구간들에서 수신된 파일럿 신호들과 현재 t 번째 전송 구간에서 수신된 파일럿 신호들을 결합하고 이를 바탕으로 채널 추정을 진행한다. 이 때 현재 t 번째 전송 구간의 채널 \mathbf{H}_t 및 이전 $(t-k)$ 번째 전송 구간의 채널 \mathbf{H}_{t-k} ($0 \leq k \leq K-1$)간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_{t-k} = \mathbf{H}_t + \mathbf{D}_{t,k} \quad (3)$$

식 (3)의 $\mathbf{D}_{t,k}$ 는 \mathbf{H}_{t-k} 및 \mathbf{H}_t 간의 채널 변화 성분을 나타내며, $\mathbf{D}_{t,0}$ 은 영행렬 (all-zero matrix)이다.

식 (2) 및 (3)을 이용하여, $(t-K+1)$ 번째 전송 구간부터 t 번째 전송 구간까지의 파일럿 신호들에 대한 결합 신호 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{Y}}_t = \mathbf{H}_t \tilde{\mathbf{X}}_t + \tilde{\mathbf{W}}_t \quad (4)$$

식 (4)에서 $\tilde{\mathbf{Y}}_t = [\mathbf{Y}_{t-K+1}, \dots, \mathbf{Y}_t]$ 는 $M \times LK$ 결합

수신 신호 행렬을 나타내며, $\tilde{\mathbf{X}}_t = [\mathbf{X}_{t-K+1}, \dots, \mathbf{X}_t]$ 는 $N \times LK$ 결합 파일럿 신호 행렬을 나타낸다. 한편 $\tilde{\mathbf{W}}_t$ 는 결합 신호 모델에 대한 $M \times LK$ 잡음 행렬로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{W}}_t = \tilde{\mathbf{D}}_t + \tilde{\mathbf{N}}_t \quad (5)$$

$\tilde{\mathbf{N}}_t = [\mathbf{N}_{t-K+1}, \dots, \mathbf{N}_t]$ 는 $M \times LK$ 결합 AWGN 행렬을 나타내며, $\tilde{\mathbf{D}}_t$ 는 \mathbf{H}_t 와 \mathbf{H}_{t-k} ($0 \leq k \leq K-1$)와의 채널 응답 변화로 인해 발생하는 잡음 성분에 대한 $M \times LK$ 행렬로 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{D}}_t = [\mathbf{D}_{t,K-1} \mathbf{X}_{t-K+1}, \dots, \mathbf{D}_{t,0} \mathbf{X}_t] \quad (6)$$

즉, $\tilde{\mathbf{D}}_t$ 는 $(t-k)$ 번째 전송 구간으로부터의 채널 변화 성분 $\mathbf{D}_{t,k}$ 와 $(t-k)$ 번째 전송 구간에서의 파일럿 신호 행렬 \mathbf{X}_{t-k} 의 곱을 부분 행렬로 갖는다.

제안 기법은 이러한 결합 신호 모델을 기반으로 채널 추정을 수행한다. Ordinary LS 방식을 이용할 경우, 제안 기법은 다음과 같은 방식으로 채널 행렬 \mathbf{H}_t 에 대한 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_t$ 를 계산할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{H}}_t = \tilde{\mathbf{Y}}_t \cdot \tilde{\mathbf{X}}_t^H (\tilde{\mathbf{X}}_t \tilde{\mathbf{X}}_t^H)^{-1} \quad (7)$$

즉, 제안 기법은 이전 전송 구간에서의 채널 변화 성분을 잡음으로 모델링한 결합 신호 모델을 기반으로 채널 추정을 수행한다. 이 때 채널 변화에 따른 잡음의 상대적인 크기가 작을수록 보다 정확한 추정이 가능하다. 즉, 제안 기법은 각 전송 구간의 채널들에 대한 상관 계수 (correlation coefficient)가 높은 Slow Fading 채널 환경에서 우수한 검출 성능을 달성할 수 있다. 이러한 제안 기법이 적용 가능한 Slow Fading 채널 환경의 판단은 도플러 주파수 (Doppler frequency) 및 상관 시간 (coherence time) 등의 추정을 통해 수행될 수 있다.

한편, 제안 기법에서 결합 전송 구간의 수 K 가 증가할수록 식 (7)에서의 행렬 크기 증가로 인해 채널 추정 과정에서의 연산량이 증가할 수 있다. 따라서 제안 기법은 채널의 변화 속도가 매우 느리며 연산량에 대한 부담이 상대적으로 없는 전이중 (full-duplex) 다중 안테나 기지국에서의 자기 간섭 채널 (self-interference channel) 추정 등에 적합하게 활용

될 수 있다.^[4]

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $N = M = L = 8$ 인 환경을 고려하였으며, 정규화된 8×8 Hadamard 행렬을 파일럿 신호 행렬 \mathbf{X}_l 로 사용하였다. 파일럿 신호의 AWGN 대비 SNR (Signal-to-Noise Ratio)은 10 dB로 가정되었다. 채널 환경으로 송수신 안테나간 상관관계가 없고 시간 상관관계만이 존재하는 레일리 감쇄 채널 (Rayleigh fading channel) 환경을 고려하였다. 이 때 각 전송 구간에서 m 번째 수신 안테나 및 n 번째 송신 안테나간의 채널 응답 $h_t(m, n)$ 의 시간 상관 계수 $E[h_t(m, n)h_{t+1}^H(m, n)]$ 는 c 로 정의하였다.

그림 1에서는 c 에 따른 통상적인 LS 및 MMSE 추정 기법 ($K=1$) 및 LS 기반 제안 기법 ($K \geq 2$)의 채널 추정치의 평균 오류 자승 (squared error) 값 $E[\|h_t(m, n) - \hat{h}_t(m, n)\|^2]$ 을 비교하고 있다. 기존에 알려진 바와 같이, 통상적인 LS 추정의 경우 c 에 관계없이 SNR에 해당하는 오류 자승 값을 얻으며 통상적인 MMSE 추정의 경우 SNR에 대한 반영을 통해 LS 대비 약간의 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.^[1] 한편 c 가 작은 경우, 즉 Fast Fading 채널에서는 신호 모델에서의 채널 변화에 의한 잡음이 증가하게 된다. 따라서 K 가 증가하여 결합 신호 모델의 크기가 커질수록 제안 기법의 성능 열화가 발생할 수 있다. 하지만 c 가 증가할수록 이러한 채널 변화에 따른 잡음 성분의 크기는 점차 감소한다. 따라서 제안 기법은 큰 c 값을 가지는 Slow Fading 채널에서 통상적인 LS

및 MMSE 추정 방식 대비 K 가 증가할수록 보다 우수한 성능을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 MIMO 시스템의 채널 추정 성능 향상을 위해 이전 전송 구간의 파일럿 신호들을 현재 전송 구간의 채널 추정에도 활용하는 결합 채널 추정 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해 채널 변화에 따른 잡음 성분이 상대적으로 작아지게 되는 Slow Fading 채널 환경에서 제안 기법이 기존 방식 대비 보다 우수한 채널 추정 성능을 달성할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 결합 신호 모델에서의 추정 방식으로 Ordinary LS 방식을 고려하였으나, Generalized LS 또는 MMSE 방식을 적용하여 Fast Fading 채널 환경에서의 채널 추정 성능의 향상을 도모할 수 있다. 이러한 방식들을 제안 기법에 적용하기 위해서는 결합 신호 모델에서 채널 변화에 의한 추가적인 잡음 성분의 공분산 행렬 (covariance matrix)에 대한 분석이 필요하다. 이와 같은 연구들은 향후 과제로 남는다.

References

- [1] M. Biguesh and A. B. Gershman, "Training-based MIMO channel estimation: a study of estimator tradeoffs and optimal training signals," *IEEE Trans. Sig. Process.*, vol. 54, no. 3, pp. 884-893, Mar. 2006.
- [2] K. Kim, et al., "Adaptive multi-antenna channel estimation scheme for uplink multiuser environments," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1293-1295, Jul. 2015.
- [3] H. Ji, et al., "Overview of full-dimension MIMO in LTE-Advanced Pro," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 176-184, Feb. 2017.
- [4] E. Park, et al., "Resource allocation for full-duplex systems with imperfect co-channel interference estimation," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 4, pp. 2388-2400, Apr. 2019.

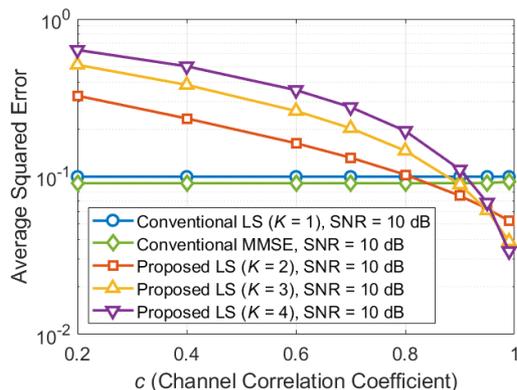


그림 1. 채널 상관 계수에 따른 채널 추정 성능
Fig. 1. Channel estimation performance according to the channel correlation coefficient