

시변 채널 환경의 MIMO-OFDM 시스템을 위한 데이터 기반 채널 추정

하성영, 강유진, 전요셉
포항공과대학교

{sungyoungha, yujinkang, yoseb.jeon}@postech.ac.kr

Data-Aided Channel Estimation for MIMO-OFDM Systems over Time-Varying Channels

Sungyoung Ha, Yujin Kang, Yo-Seb Jeon
Pohang Univ. of Science and Technology (POSTECH)

요약

본 논문은 시변 채널 환경의 MIMO-OFDM 시스템을 위한 데이터 기반 채널 추정 기법들을 제시한다. 제시된 기법들의 공통 아이디어는 검출된 데이터를 가상의 복조 기준 신호로 활용하여 채널 추정 성능을 개선하고 시간에 따른 채널 변화를 보상하는 것이다. 이 아이디어를 바탕으로, 먼저 시간에 따라 변화하는 채널을 예측하고 갱신하는 칼만 필터 기반 추정 기법을 소개한다. 다음으로, 채널과 데이터를 반복적으로 추정하는 기댓값 최대화 알고리즘 기반 추정 기법을 소개한다. 모의 실험을 통해 시변 채널 환경에서 제시된 채널 추정 기법들이 기존의 채널 추정 기법보다 우수한 성능을 달성함을 보인다.

I. 서론

다중 입출력(multiple-input multiple-output, MIMO) 시스템은 여러 개의 송수신 안테나를 이용하여 데이터 전송률 및 통신 안정성을 높일 수 있는 획기적인 기술이다. 또한, 직교 주파수 분할 다중 방식(orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)은 다중 경로 채널의 심볼-간 간섭을 효과적으로 완화할 수 있는 기술이다. MIMO 시스템과 OFDM의 장점을 결합한 MIMO-OFDM 시스템은 무선 통신의 안정성과 전송 속도를 효과적으로 높이며 심볼-간 간섭을 완화할 수 있는 기술이며, 이러한 장점으로 인해 5G 표준의 핵심 요소 기술로 활용되고 있다. 그러나 시간에 따라 채널이 빠르게 변화하는 시변 채널 환경의 MIMO-OFDM 시스템에서는 채널 주파수 응답(channel frequency response, CFR)이 OFDM 심볼에 따라 크게 달라질 수 있다. 이 경우 한정된 수의 복조 기준 신호(demodulation-reference signal, DM-RS)만을 이용해 채널을 추정하는 기존의 채널 추정 방식은 상당한 추정 오류를 겪게 된다 [1]. 추정 오류를 감소시킬 수 있는 가장 간단한 방법은 DM-RS 수를 늘리는 것이지만, 이 방식은 데이터 전송을 위한 자원 수를 감소시켜 전체 시스템의 전송 용량에 손실을 야기한다. 따라서, 시변 채널 환경의 MIMO-OFDM 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 DM-RS 수를 늘리지 않고도 채널 추정 성능을 개선할 수 있는 추정 기법의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 시간에 따라 채널이 빠르게 변화하는 시변 채널 환경의 MIMO-OFDM 시스템을 위한 데이터 기반 채널 추정 기법들을 제시한다. 제시된 기법들의 공통 아이디어는 검출된 데이터를 가상의 DM-RS로 활용하여 채널 추정 성능을 개선함과 동시에 시간에

따른 채널 변화를 보상하는 것이다. 이 아이디어를 바탕으로, 먼저 칼만(Kalman) 필터 방식에 검출된 데이터를 적용하여 시간에 따라 변화하는 채널 주파수 응답을 예측하고 갱신하는 칼만 필터 기반 추정 기법을 소개한다 [2]. 다음으로 기댓값 최대화(expectation maximization, EM) 알고리즘을 이용하여 데이터 검출과 채널 추정을 반복적으로 수행하는 EM 기반 추정 기법을 소개한다 [3]. 모의 실험을 통해 시변 채널 환경에서 제시된 채널 추정 기법들을 활용하면 기존의 채널 추정 기법을 활용했을 때 보다 우수한 프레임 오류율(frame error rate, FER)을 달성할 수 있음을 보인다. 또한, EM 기반 채널 추정 기법이 더 높은 성능을 달성하며, 칼만 필터 기반 채널 추정 기법은 EM 기반 기법 대비 낮은 복잡도를 가짐을 보인다.

II. 본론

본 논문에서는 N_t 개의 송신 안테나, N_r 개의 수신 안테나, 그리고 N_{sc} 개의 부반송파를 MIMO-OFDM 시스템을 고려한다. 이 시스템에서 n 번째 OFDM 심볼 및 k 번째 부반송파의 수신 신호는 다음으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}[n, k] = \mathbf{H}[n, k]\mathbf{x}[n, k] + \mathbf{v}[n, k]$$

위 식에서 $\mathbf{H}[n, k]$ 는 CFR 행렬을, $\mathbf{x}[n, k]$ 는 송신 신호를, $\mathbf{v}[n, k] \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 는 가우시안 잡음 신호를 나타낸다. 특별히, 시간에 따라 채널이 변화하는 시변 채널 환경을 고려하여, $\mathbf{H}[n, k]$ 는 다음의 식으로 표현된다고 가정한다.

$$\mathbf{H}[n, k] = \epsilon \mathbf{H}[n-1, k] + \sqrt{1-\epsilon^2} \mathbf{Z}[n, k]$$

위 식에서 $\mathbf{Z}[n, k]$ 는 채널과 같은 분산을 가지는 복소수 가우시안 랜덤 행렬이며, ϵ 은 이전 채널과의 시간 상관 계수이다. ϵ 은 Jakes 모델에 의하여 0차 Bessel 함수로 계산할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 채널 추정 기법들은 먼저 공통

적으로 선형 채널 추정 기법을 통해 DM-RS 위치에 대한 CFR을 추정한다. 다음으로 보간(interpolation) 기법을 사용하여 자원 블록 내 나머지 위치에 대한 CFR을 추정한다. 추정된 CFR을 바탕으로 MIMO 검출기를 통해 모든 위치에 대한 데이터를 검출한다.

본 논문에서 제시하는 칼만 필터 기반 채널 추정 기법에서는 DM-RS가 전송된 이후의 OFDM 심볼들에 대해 칼만 필터를 이용하여 CFR 예측 및 갱신을 수행한다. DM-RS 전송 이전의 OFDM 심볼들에 대해서는 DM-RS로 추정한 CFR을 그대로 사용한다. 본 방식에서는 AR(autoressive) 모델을 바탕으로 n 번째 OFDM 심볼의 CFR을 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{h}_n = \text{vec}(\mathbf{H}[n, k_1], \mathbf{H}[n, k_2], \dots, \mathbf{H}[n, k_K]) = \phi_1 \mathbf{h}_{n-1} + \mathbf{u}_n$$

위 식에서 k_i 는 채널 추정을 수행중인 자원 블록의 i 번째 부반송파 인덱스이고, $\mathbf{u}_n \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \Sigma)$ 이다. 또한, ϕ_1 과 Σ 는 Yule-Walker 방정식으로 계산할 수 있다. 다음으로 수신 신호는 $\mathbf{y}_n = \bar{\mathbf{X}}\mathbf{h}_n + \mathbf{w}_n$ 로 가정한다. 이 식에서 $\bar{\mathbf{X}} = \text{blkdiag}(\bar{\mathbf{X}}_{k_1}, \dots, \bar{\mathbf{X}}_{k_K})$ 이며, $\bar{\mathbf{X}}_{n,k} = \hat{\mathbf{x}}^T[n, k] \otimes \mathbf{I}_{N_r}$, $\hat{\mathbf{x}}[n, k]$ 는 검출된 데이터 신호, \otimes 는 크로네커 곱, 그리고 \mathbf{w}_n 은 가우시안 잡음이다. 채널 예측 모델을 기반으로 n 번째 OFDM 심볼의 CFR은 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{h}}_n = \phi \hat{\mathbf{h}}_{n-1}, \quad \mathbf{P}_n = \phi \mathbf{P}_{n-1} \phi^H + \Sigma$$

위 식에서 \mathbf{P}_n 은 에러 공분산 행렬이다. 예측된 채널 및 수신 신호를 바탕으로 n 번째 OFDM 심볼의 CFR을 다음과 같이 갱신한다.

$$\hat{\mathbf{h}}_n = \hat{\mathbf{h}}_n + \mathbf{K}_n(\mathbf{y}_n - \bar{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{h}}_n), \quad \mathbf{P}_n = \mathbf{P}_n - \mathbf{K}_n \bar{\mathbf{X}} \mathbf{P}_n$$

위 식에서 $\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n \bar{\mathbf{X}}^H (\bar{\mathbf{X}} \mathbf{P}_n \bar{\mathbf{X}}^H + \mathbf{I}_{N_t \times N_r})^{-1}$ 은 칼만 이득을 나타낸다.

본 논문에서 제시하는 EM 기반 채널 추정 기법에서는 12개의 부반송파와 14개의 OFDM 심볼로 이루어진 자원 블록 내의 모든 CFR이 \mathbf{H} 로 동일하다고 가정한다. 이 경우, 수신 신호 행렬은 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}[n_1, k_1], \dots, \mathbf{y}[n_L, k_K]] = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V}$ 로 표현할 수 있으며, n_l 은 추정하고자 하는 자원 블록의 l 번째 OFDM 심볼 인덱스이고, 송신 신호 행렬은 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}[n_1, k_1], \dots, \mathbf{x}[n_L, k_K]]$ 이다. 본 기법에서는 EM 알고리즘을 이용하여 \mathbf{H} 와 \mathbf{X} 에 대한 최대 우도 추정치를 결정한다. 먼저 i 번째 E-step에서는 다음과 같이 추정하려는 변수의 기댓값을 계산한다.

$$Q(\mathbf{X}|\mathbf{X}^i) = \mathbb{E}[\log f(\mathbf{Y}|\mathbf{H}, \mathbf{X})|\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{H}}, \mathbf{X}^i]$$

위 식에서 f 는 확률밀도함수이다. 다음으로 i 번째 M-step에서는 E-step에서 구한 기댓값을 최대화하는 \mathbf{X} 를 다음 수식을 통해 계산한다.

$$\mathbf{X}^{i+1} = \underset{\mathbf{X}}{\text{argmax}} Q(\mathbf{X}|\mathbf{X}^i)$$

이때 i 번째 추정된 채널 $\hat{\mathbf{H}}^i$ 의 추정 오류를 \mathbf{E}^i 라고 한다면 에러 공분산 행렬은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{Q}^i = \mathbb{E}[(\mathbf{E}^i)^H \mathbf{E}^i] = N_r \left(\frac{1}{\sigma^2} \mathbf{X}^i (\mathbf{X}^i)^H + \frac{1}{\sigma_e^2} \mathbf{I} \right)^{-1}$$

이때 $\mathbf{Q}^i = (\mathbf{V}^i)^H \mathbf{V}^i$ 로 두면, M-step에서 채널 $\hat{\mathbf{X}}^i$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}^{i+1}[n, k] = \underset{\mathbf{x}}{\text{argmin}} \|\hat{\mathbf{y}}[n, k] - [\hat{\mathbf{H}}^i \mathbf{V}^i]^T \mathbf{x}\|^2$$

위 식에서 $\hat{\mathbf{y}}[n, k] = [\mathbf{y}[n, k]^T \mathbf{0}^T]^T$ 이다. M-step에서 채널 $\hat{\mathbf{H}}^i$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{H}}^i = \underset{\mathbf{H}}{\text{argmax}} f(\mathbf{Y}|\mathbf{H}, \mathbf{X}^i) f(\mathbf{H}|\hat{\mathbf{H}})$$

앞서 설명한 E-step과 M-step을 반복하면 최종적인 채널 추정치 및 검출 데이터를 확보할 수 있다.

모의 실험을 통해 앞서 제시된 칼만 필터 기반 채널

추정 기법과 EM 기반 채널 추정 기법의 성능을 비교한다. 채널의 power-delay profile은 Extended Vehicular A (EVA)로 가정하며, 송신 안테나와 수신 안테나는 각각 $N_t = 2$ 와 $N_r = 8$ 로 설정한다. 송신 신호는 4-QAM이며, 채널 코딩은 (672,336) LDPC 코딩을 가정한다. 데이터 검출을 위해 선형 최소 평균 제곱 오차(linear minimum mean square error, LMMSE) 방식을 적용한다. 모든 자원 블록마다 1개의 DM-RS가 3번째 OFDM 심볼에서 전송된다고 가정한다. 부반송파의 수는 1024이며, 수신기의 속력은 120km/h로 가정한다. EM 알고리즘의 반복 횟수는 10으로 설정한다.

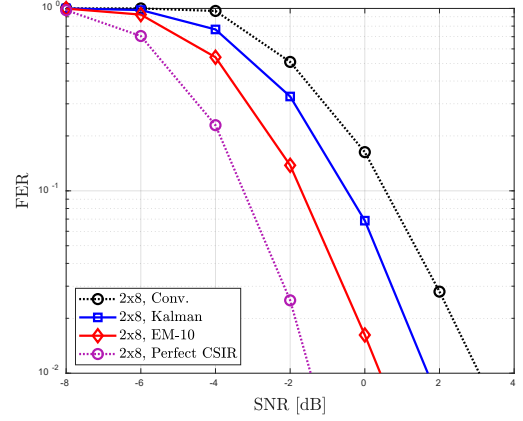


그림 1. 제안된 채널 추정 기법의 성능 평가

그림 1은 앞서 제시된 데이터 기반 채널 추정 기법들을 FER 관점에서 평가한 것이다. 시변 채널 환경에서 제시된 채널 추정 기법들은 기존의 DM-RS 기반 채널 추정 기법 보다 우수한 FER 성능을 달성한다. 특별히, FER=10⁻¹ 기준에서, 칼만 필터 기반 기법은 약 1dB 정도, EM 기반 기법은 약 2dB 이상의 성능 이득을 달성한다. EM 기반 기법이 칼만 필터 기반 기법 대비 높은 성능을 나타내지만, 동시에 더 높은 계산 복잡도를 요구한다.

III. 결론

본 논문에서는 시변 채널 환경의 MIMO-OFDM 시스템에서 칼만 필터 또는 EM 알고리즘을 이용한 데이터 기반 채널 추정 기법들을 제시하였다. 제시된 기법들은 기존의 채널 추정 기법 대비 우수한 성능을 나타내며, DM-RS 수를 늘리지 않고도 MIMO-OFDM 시스템의 채널 추정 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다. 또한, EM 기반 채널 추정 기법은 칼만 필터 기반 채널 추정 기법 대비 높은 채널 추정 성능을 보이지만, 동시에 더 높은 복잡도를 요구함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Wang, J. G. Proakis, E. Masry, and J. R. Zeidler, "Performance degradation of OFDM systems due to Doppler spreading," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 6, pp. 1422-1432, June 2006.
- [2] C. Min, N. Chang, J. Cha, and J. Kang, "MIMO-OFDM Downlink Channel Prediction for IEEE802.16e Systems Using Kalman Filter," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Networking Conf. (WCNC)*, 2007, pp. 942-946.
- [3] C. Cozzo and B. L. Hughes, "Joint Channel Estimation and Data Detection in Space-Time Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 8, pp. 1266-1270, Aug. 2003.