

다중사용자 상향링크 환경을 위한 적응형 다중안테나 채널추정 기법

김 경 준*, 최 경 준*, 이 진 념*, 김 광 순*

Adaptive Multi-Antenna Channel Estimation Scheme for Uplink Multiuser Environments

Kyung Jun Kim*, Kyung Jun Choi*, Jinnyeong Lee*, Kwang Soon Kim*

요 약

본 논문은 LTE-A 시스템과 같은 상향링크 다중사용자 환경에서 시변채널을 적절한 복잡도와 좋은 성능으로 추정할 수 있는 적응형 다중안테나 채널추정 기법을 제안하였다. 제안하는 채널추정기가 다양한 시변채널 환경 및 트래픽 패턴에서도 좋은 채널 트래킹 성능을 제공할 수 있음을 보인다.

Key Words : adaptive channel estimation, LTE-A, MIMO-OFDM, MU-MIMO

ABSTRACT

In this letter, an adaptive multi-antenna channel estimation scheme is proposed for uplink multiuser environments such as LTE-A systems to accurately estimate time-varying channels within an affordable complexity. It is confirmed that the proposed channel estimator can achieve accurate channel tracking performance even when various time-varying channel environments and traffic patterns are provided.

I. 서 론

지금까지 단일사용자 OFDM 시스템을 위한 LMS (least mean square) 및 RLS(recursive least-squares)와 같은 적응형 채널추정 기법들에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다^[1]. 하지만 LTE-A 시스템과 같이 다양한 시변채널 및 트래픽 환경에서의 다중사용자 스케줄링까지 고려하는 다중사용자 상향링크 환경에서 다중안테나 채널추정을 위해서는 채널상관행렬 정보를 요구하지 않고 순시적으로 채널을 추정하는 LS(least-squares)와 DFT (discrete Fourier transform) 기반 채널추정기와 같은 비교적 간단한 추정기가 시간 및 주파수 내삽법과 함께 이용되어 왔다^[2]. 그러나 LS 추정기는 가장 간단하나 충분한 성능을 보장해주지 못하고 DFT 기반 추정기는 가상부반송파로 인한 채널누수 영향을 받으며 MMSE (minimum mean square error) 추정기는 채널상관행렬 정보를 순시적으로 얻기 어렵고 복잡하다는 문제가 있다^[3]. 또한 채널상관행렬 정보를 업데이트 해나가는 기존 적응형 채널추정기^[1]는 다중사용자 스케줄링과 가상부반송파 사용으로 인한 채널누수 영향을 고려하지 않아 실제 상용 시스템으로 바로 적용하는 것이 불가능하다^[1,3].

본 논문에서는 상향링크 다중사용자 환경에서 각 사용자 채널의 상관 특성을 추적하고 이를 이용하는 적응형 다중안테나 채널추정 기법을 제안한다.

II. 시스템 모형

본 논문에서는 LTE-A 시스템과 같은 OFDM 기반의 시스템 상향링크를 가정한다. 채널추정을 위한 파일럿 신호는 매 슬롯의 가운데 위치한 하나의 OFDM 심볼을 이용하여 전송하는 것을 가정한다. 기지국과 단말의 안테나 개수는 각각 N_R 과 N_T 이며 DFT 크기와 전치순환(cyclic prefix)의 길이는 각각 N 과 G 이다. 또한 자원의 기본적인 단위인 한 FB(frequency block)를 구성하는 부반송파의 개수는 N_{FB} 이다.

셀 내 실제 활동하고 있는 전체 사용자 집합을 \mathbf{U} 라고 하고 단말들은 목표 SNR(signal-to-noise ratio), ρ_{dB} 를 만족하도록 개루프 송신전력제어를 수행한 후

* 이 논문은 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신-방송연구개발사업의 일환으로 수행하였음.[B0126-15-1012,IoT 환경에서 촉감통신 서비스 실현을 위한 차세대 초저지연/고효율 무선접속기술 연구]

♦ First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, kimkj@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, ks.kim@yonsei.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, kjchoi@dcl.yonsei.ac.kr, jinlee@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2015-06-186, Received June 15, 2015; Revised June 29, 2015; Accepted June 29, 2015

전송한다고 가정한다. 또한 기지국은 적절한 스케줄링 알고리즘을 통하여 서브프레임 단위로 사용자들의 트래픽 부하 정보와 사운드 신호를 통해서 얻은 전체 사용자들의 공간 상관성과 모든 FB별 채널 상태와 같은 정보들을 바탕으로 먼저 주파수영역 다중화를 통해 다중사용자 다중안테나 사용자 그룹들을 구분한다. 이렇게 주파수영역 다중화를 통해 t 번째 슬롯에서 총 $N_F[t]$ 개의 주파수대역을 나누고 그 중 주파수대역 f 를 할당 받은 사용자 그룹 집합 $\mathbf{U}^{(f)}[t] (\subset \mathbf{U})$ 를 위한 FB개수를 $m^{(f)}$ 라고 하면 파일럿 신호의 길이는 $P^{(f)} = m^{(f)}N_{FB}$ 이 되며 해당 사용자 그룹 내에선 다시 파일럿 신호들 간의 직교성을 보장해 주기 위하여 Zadoff-Chu 시퀀스와 같이 낮은 PAPR(peak-to-average power ratio)을 가지는 $P^{(f)} \times 1$ 주파수영역 기본시퀀스 \mathbf{p} 를 레이어별로 서로 다른 순환천이 값을 사용하여 단순 위상 회전하는 코드영역 다중화를 적용한다^{2,3)}. 또한 t 번째 슬롯의 f 번째 주파수대역에서 동시에 전송되는 총 레이어의 개수는 $N_L^{(f)}[t] = |\mathbf{U}^{(f)}[t]|N_T \leq N_R$ 이다.

주파수대역 f 에 할당된 g 번째 사용자의 인덱스를 $u^{(f,g)} (\in \mathbf{U}^{(f)}[t])$ 라고 하면 그 때 기지국의 j 번째 수신 안테나와 g 번째 사용자의 $i (\in \{1, 2, \dots, N_T\})$ 번째 레이어를 위한 t 번째 슬롯에서의 $G \times 1$ 복소 가우시안 채널충격응답을 $\mathbf{h}_{j,i}^{(f,g)}[t]$ 로, 다시 이를 DFT 연산을 통해 얻은 $N \times 1$ 채널주파수응답을 $\mathbf{g}_{j,i}^{(f,g)}[t] = [g_{j,i}^{(f,g)}[t,0] \ g_{j,i}^{(f,g)}[t,1] \ \dots \ g_{j,i}^{(f,g)}[t,N-1]]^T$ 라고 표현하며, 채널 상관 함수는 다음과 같다.

$$R^{(f,g)}[t; \Delta t; k; \Delta k; i, j; \hat{i}, \hat{j}] = E\{g_{j,i}^{(f,g)}[t, k] (g_{j,i}^{(f,g)}[t + \Delta t, k + \Delta k])^*\}. \quad (1)$$

이 때 동기화가 완벽하다고 가정하면 전치순환 제거 후 t 번째 슬롯에서 기지국의 j 번째 수신 안테나에서의 $N \times 1$ 시간영역 수신 신호 벡터는 아래와 같다.

$$\mathbf{y}_j[t] = \sum_{f=1}^{N_F[t]} \sum_{g=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \sqrt{Y^{(f,g)}[t]} \mathbf{x}_i^{(f,g)} \otimes \mathbf{h}_{j,i}^{(f,g)}[t] + \mathbf{n}_j[t], \quad (2)$$

여기서 $Y^{(f,g)}[t]$ 와 $\mathbf{x}_i^{(f,g)}$ 는 각각 주파수대역 f 에 할당된 g 번째 사용자의 거리감쇄, 음영 효과와 송신 전력제어와 관련된 영향이 모두 고려된 전송된 신호의 평균 수신 전력과 i 번째 레이어를 위한 순환천이된 $N \times 1$ 시간영역 송신 신호 벡터이며 $\mathbf{n}_j[t]$ 는 $N \times 1$ 복소 가우시안 백색 잡음 벡터이다.

III. 적응형 채널추정 기법

그림 1은 상향링크 다중사용자 환경을 위한 적응형 다중안테나 채널추정 기법을 보여주며 제안하는 채널 추정기는 스케줄러와 사용자 $u (\in \mathbf{U})$ 별로 채널상관행렬들을 저장하는 저장기를 포함한다. 여기서 $\mathbf{F}^{(f)}$ 를 $N \times N$ 유니터리 DFT 행렬을 주파수대역 f 내 부분송파 인덱스 집합에 대응하는 열만 취해 얻은 $P^{(f)} \times N$ 소행렬 그리고 $\mathbf{L}^{(f)} = (\mathbf{F}^{(f)})^H \mathbf{F}^{(f)}$ 를 $N \times N$ 채널 누수 행렬이라고 하자³⁾. 그 때 $\mathbf{y}_j[t]$ 를 DFT 연산, 주파수영역 인덱스 집합 선택, LS 채널추정, 그리고 IDFT 연산 이후 얻은 t 번째 슬롯의 f 번째 주파수대역을 위한 기지국의 j 번째 안테나에서의 $N \times 1$ 채널충격응답 추정치는 아래와 같다.

$$\hat{\mathbf{h}}_j^{(f)}[t] = 1/P^{(f)} (\mathbf{F}^{(f)})^H \text{diag}(\mathbf{p}^*) \mathbf{F}^{(f)} \mathbf{y}_j[t] = 1/P^{(f)} \mathbf{L}^{(f)} \mathbf{h}_j^{(f)}[t] + \mathbf{w}_j^{(f)}[t], \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{h}_j^{(f)}[t]$ 는 $N \times 1$ 결합된 정확한 채널충격응답 벡터이고 $\mathbf{w}_j^{(f)}[t] = 1/P^{(f)} (\mathbf{F}^{(f)})^H \text{diag}(\mathbf{p}^*) \mathbf{F}^{(f)} \mathbf{n}_j[t]$ 는 $N \times 1$ 시간영역 잡음 벡터이다. 이후 내용에선 단지 주파수대역 f 내 부분송파에만 집중하기에 인덱스 f 는 없애도록 하겠다. 그 때 \mathbf{P}_j 를 딜레이(delay)영역에 대한 $N \times N$ 적응형 MMSE 후처리 행렬이라고 하면 \mathbf{P}_j 는 다음과 같은 식으로 얻을 수 있다.

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{P} \mathbf{R}_j (\mathbf{L} \mathbf{R}_j + 1/\hat{\rho} \mathbf{I}_N)^{-1}, \quad (4)$$

여기서 $\hat{\rho}$ 는 추정된 수신 SNR이며 \mathbf{R}_j 는 사용자별로 저장된 $\{\mathbf{R}_j^{(u)}[t-1] | u \in \mathbf{U}[t]\}$ 를 할당된 사용자의 순서에 따라 블록 대각화하여 얻은 결합된 채널상관행렬이다. 또한 $0 \ll \lambda^{(u)} < 1$ 는 사용자 u 를 위한 망각 요소, $\Delta = N/N_L[t] \geq G$ 는 t 번째 슬롯에서의 순환천이 간격, $\hat{\mathbf{h}}_j^{(u)}[t]$ 를 후처리 후 사용자 u 의 모든 레이어들을 결합하여 얻은 $N_T \Delta \times 1$ 채널충격응답 추

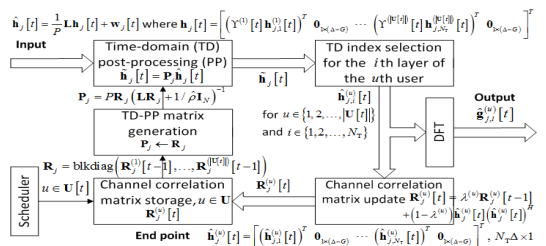


그림 1. 제안하는 적응형 다중안테나 채널추정기 구조
Fig. 1. Structure of a proposed adaptive multi-antenna channel estimator

정치라고 하면 $u \in \mathbf{U}[t]$ 인 사용자의 채널상관행렬은 $\mathbf{R}_j^{(u)}[t] = \lambda^{(u)} \mathbf{R}_j^{(u)}[t-1] + (1-\lambda^{(u)}) \hat{\mathbf{h}}_j^{(u)}[t] (\hat{\mathbf{h}}_j^{(u)}[t])^H$ 과 같이 업데이트하여 저장기에 저장한다.

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 성능 평가를 위해 LTE-A 시스템과 같이 $N = 1024$, $G = 72$, $N_{\text{FB}} = 12$, $m = 25$, $N_T = 2$, $|\mathbf{U}[t]| = 2$, $N_R = 4$, 그리고 $\rho = 20\text{dB}$ 로 설정하였으며 3GPP (3rd generation partnership project) SCM (spatial channel model) 채널모델을 사용하였다^[2]. 시변채널 환경을 위하여 길이 $T_s (= 0.5\text{ms})$ 인 매 슬롯마다 업데이트되는 식 (1)에서의 시간 변수 t 에 대한 1차 AR (autoregressive) 채널모델을 가정하였으며 정규화된 도플러 주파수는 $f_m = T_s v / \gamma$ 이다. 여기서 γ 는 파장이며 v 는 단말의 이동속도로 도심 속 도보와 테헤란로 환경을 모형화하기 위하여 3km/h와 60km/h를 각각 고려하였다. 또한 스케줄러에 의해 각각 전송 간격이 20ms와 버스트(burst)하게 전송하는 VoIP 및 FTP와 같은 2가지 트래픽 패턴 역시 고려하였다.

그림 2는 특정 사용자에 대하여 DFT 기반 채널추정기^[3], 채널상관행렬을 완벽하게 알고 있는 MMSE 채널추정기와 제안하는 적응형 채널추정기의 계단응답특성을 이동속도 3km/h와 60km/h에 대해 시간 변화에 따라 비교해 보았다. 결과로부터 제안하는 채널추정기가 기존 DFT 기반 추정기보다 우수하며 MMSE 추정기 성능에 수렴해 감을 볼 수 있다. 이 때 안테나 당 복잡도는 기존 DFT 기반 추정기는 $O(N \log_2 N)$, MMSE 추정기는 $O(N^{2.373})$, 그리고 제안하는 추정기는 $O((N_T |\mathbf{U}[t]| G)^{2.373})$ 이었으며 단말로부터의 피드백 오차가 없고 기지국에서 정규화된 ZF (zero-forcing) 빔포밍을 사용한다고 가정하였을 시 제

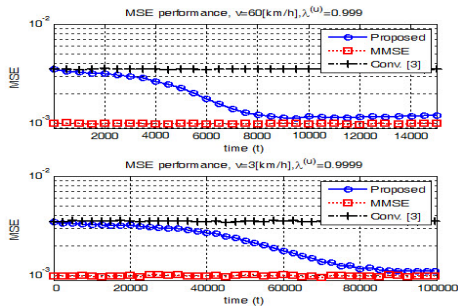


그림 2. 시간에 따른 MSE 성능비교
Fig. 2. MSE performance comparison with the time

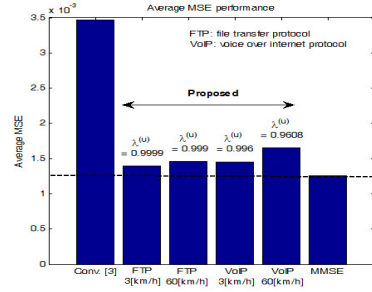


그림 3. 다양한 환경에서 평균 MSE 성능비교
Fig. 3. Average MSE performance comparison with various environments

안하는 추정기의 수렴전후의 달성 전송률(achievable rate)은 각각 14.35과 15.32이었다.

그림 3은 채널의 상관 행렬이 시간에 따라 변하는 경우에 이동속도, 트래픽 패턴, 채널 환경에 따른 시변채널 트래킹 성능을 평균 MSE(mean square error)로 비교한다. 채널상관행렬의 코히런스 시간은 속도가 3km/h와 60km/h에 따라 각각 5sec와 10sec라고 설정하였다. 또한 같은 속도에서의 FTP와 VoIP에 따른 $\lambda^{(u)}$ 는 이동속도와 트래픽 패턴을 고려해서 정하였다. 결과로부터 실제 시스템의 다양한 채널환경과 트래픽 패턴에서도 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 상향링크 다중사용자 환경을 위한 적응형 다중안테나 채널추정 기법을 제안하였으며 모의실험 결과를 통해서 다양한 시변채널 환경 및 트래픽 패턴에서도 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있었다.

References

- [1] D. Schafhuber, G. Matz, and F. Hlawatsch, "Adaptive Wiener filters for time-varying channel estimation in wireless OFDM systems," in *Proc. IEEE ICASSP*, vol. 4, pp. 688-691, Hong Kong, Apr. 2003.
- [2] 3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access, *Physical channels and modulation*, 3GPP TS 36.211 v11.0.0, Oct. 2012.
- [3] K. J. Kim, K. J. Choi, and K. S. Kim, "DFT-based channel estimation scheme for the uplink of LTE-A systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 2, pp. 307-309, Feb. 2015.