시간 및 주파수 클러스터링을 활용한 K-means 기반 블라인드 채널 추정 기법

김유민, 이훈, 김효성, 김태형*
순천향대학교
kym@sch.ac.kr, 20194132@sch.ac.kr, 20194154@sch.ac.kr, *th.kim@sch.ac.kr

Blind Channel Estimation Method Based on K-means Algorithm Using Time and Frequency Clustering

Kim Yumin, Lee Hun, Kim Hyoseong, Kim Taehyoung*
Soonchunhyang Univ.

요 약

차세대 이동통신 서비스인 5G NR(New Radio)는 초저지연, 높은 신뢰도, 높은 데이터 전송률 등을 달성하기 위해 매우 높은 수준의 요구조건을 충족해야 한다. 수신 신호에 대한 정확한 채널 추정은 신호의 품질 향상을 위한 필수적인 기술 중 하나로써, DM-RS(demodulation reference signal)에 기반한 채널 추정 기술이 표준 기술로 채택되었다. DM-RS는 데이터 정보와 함께 전송되어 무작위로 발생하는 무선 채널의 특성에 효과적으로 대응할 수 있으나, DM-RS 전송에 따른 무선 자원 소모로 인하여 데이터 전송률 측면에서 일부 손실을 야기할 수 있다. 이를 해결하기 위해 DM-RS 없이 데이터만을 활용하여 채널을 추정하는 K-means 군집화 알고리즘에 기반한 블라인드 채널 추정 기법이 소개된 바 있으나, 채널 추정의 최소 대상을 단일 RB(resource block)로 제한한 한계가 있다. 본 논문에서는, 종래 기술의 채널 추정 한계를 해결하기 위해, 무선 페이딩 환경에 따른 추가적인 클러스터링(clustering)을 고려한 향상된 K-means 군집화 알고리즘 기반의 채널 추정 기법을 제안한다.

Ⅰ. 서 론

3GPP(3rd Generation Partnership Project)는 차세대 이동통신 서비스인 5G NR(new radio)에 대한 사용 사례로 eMBB(enhanced mobile broadband), mMTC(massive machine type communications), URLLC(ultra-reliable and low latency communications)등의 세가지 서비스를 제시한다[1]. 이와 같은 서비스들은 기존 LTE(long-term evolution) 대비 높은 데이터 전송률, 저지연, 높은 신뢰도, 높은 수준의 접속 밀도 등의 매우 높은 수준의 요구사항들을 충족해야 한다.

무선 통신 시스템에서 채널 추정은 수신 신호의 복조를 위해 요구되는 필수적인 기술이다. 효과적인 채널 추정을 위해 복조 참조 신호인 DM-RS(demodulation reference signal) 기반의 채널 추정 기술이 표준 기술로 채택되었다. DM-RS는 항상 데이터 정보와 함께 시간 및 주파수 자원에 할당되어 전송되므로 무작위로 변화하는 채널 특성에 효과적일 수 있으나, 반드시 데이터 정보와 함께 전송되어야 하므로 데이터 전송률 측면에서 일부 손실을 야기할 수 있다. 이를 해결하기 위한 연구 결과 중 하나로, DM-RS 전송 없이 데이터만을 이용하여 채널을 추정하는 K-means 군집화 알고리즘 기반의 블라인드 채널 추정 기법이 제안되었다[2]. [2]에서는 채널 추정을 위한 군집화에 RB(resource block)을 최소 단위로 선택하여 수행하였고, 해당 RB 내에서는 무선 페이딩 계수가 동일한 것으로 가정하였다. [2]의 제안 기술은 높은 지연확산 및 도플러 효과에 의해 채널이 시간 및 주파수 영역에서 크게 변화할 경우 채널 추정 성능이 크게 떨어지는 한계가 있다.

본 논문에서는 무선 페이딩 환경에서 DM-RS 전송 없이 보다 효과적으로 채널을 추정할 수 있는 클러스터링(clustering) 기반 블라인드 채널 추정 알고리즘을 제안한다. 제안 기술은 시간 축으로 복수 개의 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 심볼, 주파수 축으로 복수 개의 부반송파를 최소단위로 설정하여 클러스터링을 수행한 후, 각 클러스터 별로 K-means 군집화 알고리즘 기반의 채널 추정 기술을 적용한다. 이를 통해 시간 및 주파수 축에서 변동성이 큰 채널 환경에서도 효과적으로 채널 추정이 가능하다. 또한, 시뮬레이션을 통해 채널 추정 성능을 최대화하는 최적의 클러스터링 방식을 고찰한다.

그림 1. 시간 및 주파수 자원 클러스터링 예시.

Ⅱ. 시스템 모델

5G NR 물리계층에서는 상향링크 및 하향링크 전송에 사용되는 제어정보, 데이터 정보, 채널 정보, 동기화 정보 등을 위한 물리 채널 및 신호들이 정의되어있다. 상기와 같은 물리계층 채널 및 신호는 전송 이전에 디지털 변조된 후 시간 및 주파수 자원에 할당된다. 이들은 시간 및 주파수 자원에 할당될 때, 시간 축으로 단일 혹은 복수 개의 슬롯(slot)들로 구성될 수 있고, 주파수 축으로 단일 혹은 복수 개의 RB로 구성될 수 있다[3].

데이터 정보는 QPSK(quadrature phase shift keying)로 변조되어 무선 페이딩 채널을 통과한다. l번째 OFDM 심볼의 k번째 부반송파를 통해 수신한 신호 $Y_{k,l}$은 다음과 같이 주어진다.

$$Y_{k,l} = H_{k,l}X_{k,l} + N_{k,l} \quad (1)$$

$H_{k,l}$는 TDL-A 채널, $X_{k,l}$는 송신 신호, $N_{k,l}$은 평균이 0이고 분산이 1인 가산성 백색 가우시안 잡음을 의미한다. 이후 간결함을 위하여 인덱스 k와 l은 제거하고 기술한다.

Ⅲ. 제안하는 블라인드 채널 추정 기법

본 절에서는 제안 기술에 대하여 구체적으로 기술한다. 그림 1은 시간-주파수 자원에 대한 클러스터링 예시이다. Y를 수신한 단말은 이를 OFDM 복조한 후에 지연확산과 단말의 속도를 고려하여 적절히 복수 개의 그룹으로 클러스터링을 수행한다. 예를 들어, 단말의 이동 속도가 빠른 경우, 단일 슬롯 내에서 14개의 OFDM 심볼들을 다수의 그룹으로 클러스터링을 수행한다. 지연확산의 영향이 큰 경우, 주파수 축에서 부반송파들에 대한 다수의 그룹으로 클러스터링을 수행한다. 각 클러스터링 내의 무선 자원들은 K-means 군집화 알고리즘을 통해 네 가지 QPSK 심볼 중 하나로 특정되는데, 이는 하기 수식에 기반하여 수행된다.

$$X = e^{\frac{j(2l-1)\pi}{4}}, (l = 1, \cdots, 4). \quad (2)$$

식 (2)에서, l는 QPSK 심볼 수를 의미한다. 각 클러스터링에 대하여 K-means 군집화 알고리즘을 통해 다음과 같이 채널을 추정한다. Y는 QPSK 변조가 적용되었으므로 4개 군집의 중심점을 도출한다. 이때 결정된 군집의 중심점으로 인해 Y에 작용한 잡음이 상쇄되는 효과를 가진다. 추정된 채널 $\hat{H}$는 $\hat{H} = Y/X$ 로 계산되어 하나의 중심점에 대해 4개의 채널을 추정할 수 있다. $\hat{X} = Y/\hat{H}$이므로 추정된 16개의 채널마다 추정된 송신 신호 $\hat{X}$을 구하고, 이를 실제 송신 신호와 비교하여 BER(bit error rate)을 산출한다. 각 군집에서 BER이 가장 낮은 채널을 해당 군집의 최종적으로 추정한 채널 $\tilde{H}$로 결정한다. 상기와 같은 과정은 모든 군집에 대해 수행되며, 본래의 채널과 추정한 채널 간의 MSE(mean square error)를 통해 성능을 분석한다. MSE는 하기 수식에 기반한다.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}|H_{i,j} - \tilde{H}_{i,j}|^2\right). \quad (3)$$

식 (3)에서, n은 클러스터링의 개수이고, m은 군집의 수이다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안 기술의 우수성을 시뮬레이션을 통해 증명한다. 무선 채널 모델로 TDL(tapped-delay line)-A 모델을 사용하였고, 제안 기술의 클러스터의 크기는 모두 동일한 것을 가정하였다[4].

그림 2는 단말의 속도가 50km/h이고, 지연확산이 50ns일 때, 기존 기법, 제안된 기법(4개 클러스터), 제안된 기법(420개 클러스터)의 SNR에 따른 MSE 성능을 나타낸다. 그림 2에서, 모든 채널 추정 기법은 SNR의 증가에 따른 MSE의 감소를 확인하였으며, 제안된 기법(4개 클러스터)이 기존 기법 대비 약 3dB 성능 향상을 보였다.

그림 3은 단말의 속도가 120km/h이고, 지연확산이 300ns일 때, 각 기법의 SNR에 따른 MSE 성능을 나타낸다. 모든 채널 추정 기법은 그림 2와 같이 SNR의 증가에 따른 MSE가 감소함을 확인하였다. 그림 3에서, 제안된 기법(70개 클러스터, 420개 클러스터)은 전 구간에서 기존 기법 대비 더 높은 성능이 나타나는 것을 확인하였다. 제안된 기법(70개 클러스터)의 경우, 420개 클러스터의 경우보다 3dB 우수함을 보인다. 그림 2와 3을 통해 보다 정확한 채널 추정에 있어 K-means 군집화 알고리즘을 위한 데이터 수가 중요함을 확인하였다. 즉, 특정 채널 특성에 따라 적절한 클러스터 설정이 필요함을 확인하였다.

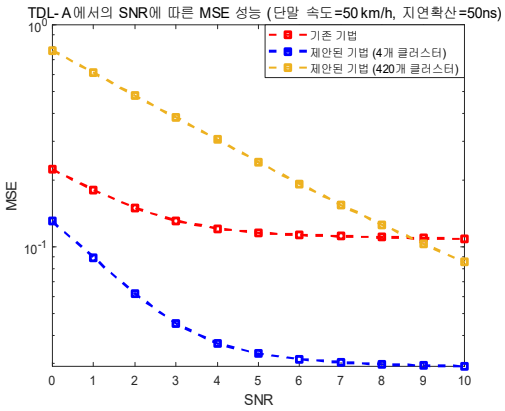

그림 2. 각 기법의 SNR에 따른 MSE 성능(단말 속도=50km/h, 지연확산=50km/h).

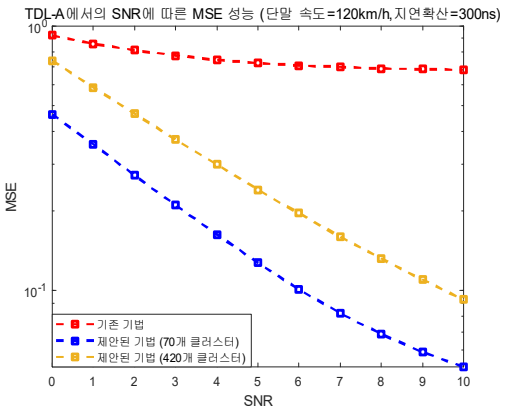

그림 3. 각 기법의 SNR에 따른 MSE 성능(단말 속도=120km/h, 지연확산=300ns).

Ⅴ. 결론

본 논문에서는, DM-RS 전송 없이 채널 추정이 가능한 K-means 기반의 블라인드 채널 추정 기술을 제안하였다. 제안 기술은 시간 및 주파수 축으로 추가적인 클러스터링을 적용함으로써, 무선 페이딩 환경에서도 효과적으로 채널 추정이 가능하도록 개선하였다. 또한, 변화하는 채널 특성을 고려하여 최적의 클러스터링 방식이 존재함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2022R1F1A1064106).

참 고 문 헌

[1] Y. Kim, Y. Kim, J. Oh, H. Ji, J.Yeo, S. Choi, H. Ryu, H. Noh, T. Kim, F. Sun, Y. Wang, Y. Qi, and J. Lee, "New Radio (NR) and Its Evolution Toward 5G-Advanced," IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 3, pp. 2-7, June 2019.

[2] 왕한호, "군집화 알고리즘을 이용한 채널 추정 기법 및 성능 평가", 한국정보기술학회논문지, vol. 16, no. 2, pp. 61-66, 2018.

[3] NR; Physical Channels and Modulation, V17.2.0, Release 17, 3GPP Standard TS 38.211, Jun. 2022.

[4] TSG RAN; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, V17.0.0, Release 17, document TR. 38.901, 3GPP, Mar. 2022.