밀리미터파 시스템에서의 저복잡도 Blind SNR 추정기

박한영, 최지웅
대구경북과학기술원 전기전자컴퓨터공학과
prkhnyng@dgist.ac.kr, jwchoi@dgist.ac.kr

Low-Complexity Blind SNR Estimator for Millimeter-Wave Systems

Hanyoung Park, Ji-Woong Choi
Department of Electrical Engineering & Computer Science
Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST)

요 약

무선 통신의 원활한 서비스를 지원하기 위해 사용되는 다양한 어플리케이션들에서는 무선 전파 환경의 특성을 반영하기 위해 신호대잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)를 활용한다. 이때, 밀리미터파 대역의 전파 환경은 강한 경로 손실과 직진성으로 인해 전송 환경이 더 빠르게 변하며, 매번 채널 추정을 기반으로 SNR을 추정하면 계산복잡도 부담이 생긴다. 따라서, 본 논문에서는 파일럿 신호 없이 SNR을 실시간으로 추정할 수 있는 저복잡도 블라인드 방식의 추정기를 제안하였다.

Ⅰ. 서 론

무선 통신 시스템에서 전파 환경을 반영하는 다양한 파라미터들은 원활한 무선 연결을 위해 활용된다. 특히, 신호의 품질을 반영해주는 신호대잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)는 다양한 상황에서 적용된다. 예를 들어, 채널 추정 [1], 자원 할당 [2], 스케줄링 [3] 등에서 폭넓게 사용된다. 한편, 더 높은 데이터 전송률과 낮은 지연시간을 보장하기 위해 더 큰 대역폭이 필요하며 이를 위해 밀리미터파 대역의 사용이 고려되고 있다 [4]. 그러나 밀리미터파 대역은 고주파 신호의 특성으로 인해 경로 손실이 심하고 직진성이 강하여 채널이 변화하는 속도가 더 빠르며, 이를 대응하기 위해 더 자주 파일럿 신호를 전송하는 형태로 채널을 새로 추정하는 것은 실시간 연결성 지원에 어려움을 줄 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 파일럿 없이도 실시간으로 SNR을 추정할 수 있는 블라인드 방식의 저복잡도 추정기를 제안하였다.

Ⅱ. 본론

시스템 모델은 single-input multiple-output (SIMO) 업링크를 고려하며, 기지국 안테나 개수는 M이다. 수신 신호는

$$\mathbf{y}=\mathbf{h}s+\mathbf{n}, \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{h}$는 채널 벡터, s는 송신 신호, $\mathbf{n}$는 i.i.d. 가우시안 노이즈이다. 이때, 밀리미터파 채널은 다중경로가 적기 때문에 빔스페이스에서 희소성을 가진다. 빔스페이스로 변환된 수신 신호는

$$\mathbf{y}_b=\mathbf{F}\mathbf{y}=\mathbf{F}\mathbf{h}s+\mathbf{F}\mathbf{n}=\mathbf{h}_b s+\mathbf{n}_b, \tag{2}$$

이며, $\mathbf{F}$는 정규화된 이산푸리에변환 행렬, 노이즈는 빔공간에서도 가우시안이다. 이때, 빔스페이스에서의 채널이 희소하기 때문에 수신 신호 벡터도 빔스페이스에서 희소성을 띈다. 여기에 가우시안 노이즈가 더해지게 되면 신호가 존재하는 부분에서만 큰 값을 띄고 나머지 부분에서는 노이즈만 존재하게 된다.

제안 기법은 SNR을 추정하기에 앞서 노이즈의 전력을 추정하며, 이는 노이즈를 제외한 신호만 봤을 때 빔스페이스에서의 대부분의 성분이 0에 가깝다는 점을 활용한다. 우선, 수신된 노이즈가 포함된 신호 $\mathbf{y}$를 빔스페이스로 변환하고 이 벡터의 원소들의 절댓값의 제곱을 계산해 오름차순으로 정렬한다. 이후 정렬된 원소들에 대해 각 원소들의 바로 뒤 인덱스에 해당하는 원소와의 차를 구하여 변화량을 구하고, 만약 변화량이 임계값 이상이 되는 경우 그 이후의 인덱스에 해당하는 원소들은 신호가 포함된 원소들로 가정한다. 즉, 그 이전의 인덱스에 해당하는 원소들의 전력의 평균을 평균 노이즈 전력으로 가정한다.

SNR 추정을 위해서는 신호 전력 추정도 필요한데, 이는 수신 신호 전체 전력에서 추정된 노이즈 전력을 빼는 방식으로 구한다. 이를 수식으로 정리하면

$$\hat{P}=\max\{\sum_{m=1}^{M}|y_m|^2-M\hat{N_0},0\}, \tag{3}$$

여기서 y_m은 $\mathbf{y}$의 m번째 원소, $\hat{N_0}$는 앞서 추정된 평균 노이즈 전력이다. 이를 기반으로 SNR은 다음과 같이 추정된다.

$$\widehat{\mathrm{SNR}}=\frac{\hat{P}}{M\hat{N_0}}. \tag{1}$$

시뮬레이션은 10000번의 시도를 통해 진행되었으며, 기지국 안테나 개수는 64개로 가정하였다. 비교군으로는 기존의 저복잡 블라인드 추정 기법인 [5]의 알고리즘을 사용하였다. 그림 1은 SNR에 따른 SNR 추정치를 나타낸다. 제안 기법은 SNR을 다소 과대평가하며, 기존 기법은 SNR을 과대평가한다는 특징이 있다. 전체적인 추정 오차를 봤을 때 제안 기법은 아주 작은 오차를 보여 기존 기법보다 더 실제 SNR에 가까운 값으로 추정한다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 빠르게 변화하는 밀리미터파 대역의 전파 환경에 실시간으로 대응할 수 있도록 하는, 파일럿 없이 작동 가능한 블라인드 방식의

저복잡도 SNR 추정 기법을 제안하였다. 제안 기법은 SNR을 다소 과대평가하는 경향이 있으나 오차가 매우 작으며, 기존 기법 대비 개선된 추정 성능을 보였다. 추후 연구에서는 해당 기법 기반의 추정치를 다른 응용기술에 사용했을 때의 실용성에 대한 분석을 제안할 계획이다.

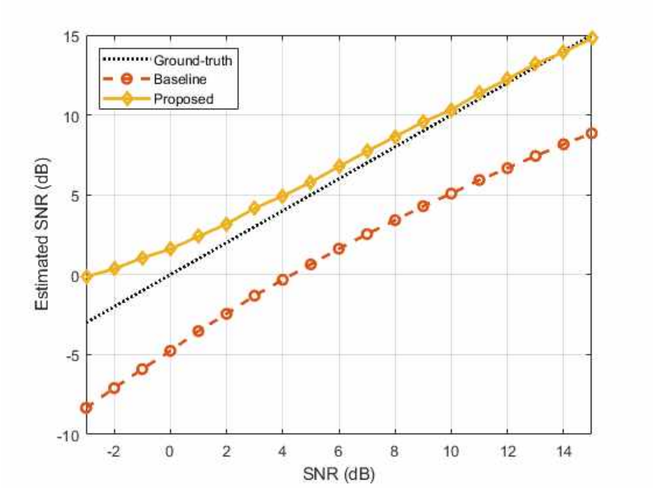

그림 1. SNR에 따른 추정 SNR

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00442085, 자율주행 차량 서비스 보호를 위한 V2X 무선통신 인프라 보안 핵심기술 개발, No. RS-2024-00398157, AI-Native 응용서비스 지원 6G 시스템 기술개발).

참 고 문 헌

[1] H. Park and J.-W. Choi, ."Binary Hypothesis Testing-Based Low-Complexity Beamspace Channel Estimation for mmWave Massive MIMO Systems," *arXiv preprint arXiv:2508.01007*, 2025.

[2] G. Femenias and F. Riera-Palou, "Scheduling and Resource Allocation in Downlink Multiuser MIMO-OFDMA Systems," IEEE Trans. Commun. vol. 64, no. 5, pp. 2019-2034, 2016.

[3] H. Park and J.-W. Choi, "Queue-Aware Optimization-Based Scheduling for mmWave Multi-User MIMO Indoor Small Cell," IEEE Commun. Lett., vol. 29, no. 10, pp. 2303-2307, 2025.

[4] *5G; NR; Base Station (BS) Radio Transmission and Reception*, Jun 2025, document TS 38.104, 3GPP, Version 19.1.0.

[5] A. Gallyas-Sanhueza and C. Studer, "Low-Complexity Blind Parameter Estimation in Wireless Systems with Noisy Sparse Signals," IEEE Trans. Wireless Commun. vol. 22, no. 10, pp. 7055-7071, 2023.