

6G Upper Mid-Band 통신을 위한 파라미터 적응형 채널 예측

신상목, 최승혁, 심병효

서울대학교

{smshin,shchoi}@islab.snu.ac.kr, bshim@snu.ac.kr

요약

본 논문은 미래 6G 통신 시스템의 핵심 기술인 Upper mid-band(FR3) 대규모 MIMO(Massive MIMO) 환경에서 발생하는 채널 노화(Channel Aging) 문제를 해결하기 위해, 파라미터 적응형 채널 예측(PACP) 기법을 제안한다. Upper mid-band 시스템은 광대역 지원 및 신뢰성 있는 커버리지 확보에 유리하나, 상향링크 SRS 구간 동안 채널이 급격히 변화하여 획득한 CSI와 실제 하향링크 채널 간 불일치가 발생하는 문제가 있다. 기존 예측 기법들이 채널을 단일 개체로 간주하여 이러한 대역의 고유한 시변 특성을 간과하는 한계를 극복하고자, 제안하는 PACP 기법은 상향링크 채널을 다중 경로 기하학적 파라미터(GCPs; 방사각, 지연, 이득 등)로 분해하고 각 파라미터의 시간적 역학(Temporal Dynamics)을 개별적으로 예측한다. 이를 통해 기지국은 하향링크 전송을 위한 정교한 하이브리드 빔포밍 벡터를 선제적으로 생성할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 방식 대비 채널 NMSE를 3dB 이상 획기적으로 개선하였으며, 완벽한 CSI를 가정한 이상적인 시스템과 대등한 수준의 데이터 전송률을 달성함을 확인하였다.

I. 서론

본 논문에서는 최근 6G 통신의 핵심 주파수 대역으로 주목받고 있는 Upper mid-band(FR3, 7.125-24.25 GHz) 환경에서, 대규모 MIMO 시스템의 성능을 저하시키는 채널 노화(Channel Aging) 문제를 해결하기 위한 새로운 파라미터 적응형 채널 예측(PACP: Parameter-Adaptive Channel Prediction) 프레임워크를 제안한다.

FR3 대역은 광대역폭과 견고한 연결성을 동시에 제공하여 XR, 메타버스, 자율주행 등 데이터 집약적이고 지연에 민감한 6G 서비스를 위한 최적의 후보로 평가받는다 [1]. 그러나 높은 경로 손실을 극복하기 위해 필수적인 대규모 MIMO 빔포밍 기술은 정확한 채널 상태 정보(CSI)를 요구한다. 문제는 기존의 LS, LMMSE, 딥러닝 기반 채널 추정 기법들이 빠르게 변화하는 무선 환경에서 CSI 획득 시점과 실제 데이터 전송 시점 간의 시차로 인해 발생하는 채널 노화 현상을 피할 수 없다는 점이다 [3]. 예를 들어, 7GHz 대역에서 단말이 이동할 경우 코히어런스 시간이 프레임 길이보다 짧아져, 낡은(Outdated) CSI 기반의 빔포밍은 심각한 전송률 저하와 링크 실패를 초래한다 [2].

기존에도 시변 채널을 예측하려는 다양한 시도(Autoregressive 모델, 딥러닝 등)가 있었으나, 이들은 채널 전체를 단일 개체로 간주하여 예측을 수행한다는 한계가 있었다 [4]. 이러한 방식은 실제 무선 환경에서 다중 경로 성분들이 각기 다른 속도와 패턴으로 변화하는 세부적인 역학(Dynamics)을 포착하지 못한 [5].

이에 본 논문은 채널을 물리적으로 해석 가능한 **기하학적 파라미터(방사각, 지연, 경로 이득 등)**로 분해하고, 각 파라미터의 고유한 시간적 변화 특성에 맞춰 개별적으로 미래 값을 예측하는 PACP 기법을 제안한다. 이 기법은 크게 1) 수신된 SRS 신호로부터 경로별 파라미터를 추출하는 채널 분해, 2) 각 파라미터의 동적 특성을 모델링하는 개별 예측, 3) 예측된 파라미터로 미래 채널을 복원하여 빔포밍을 수행하는 채널 재구성 3단계 과정을 거친다.

II. 본론

본 논문에서는 제안하는 파라미터 적응형 채널 예측(PACP) 프레임워크는 상향링크 SRS 전송 사이의 공백 구간에 대한 미래 채널을 정밀하게 예측하여, 끊임 없는 통신과 선제적(Proactive) 빔포밍을 수행하는 것을 목표로 한다. PACP의 핵심 아이디어는 채널의 기하학적 파라미터(방사각, 지연, 경로 이득 등)가 서로 다른 시간적 역학(Temporal Dynamics)을 갖는다는 점에 착안하여, 이를 분해하고 병렬적으로 예측하는 것이다. 전체 과정은 크게 1) 기하학적 채널 분해, 2) 파라미터별 병렬 예측, 3) 채널 재구성 및 빔포밍의 3단계로 구성된다.

1. 기하학적 채널 분해

첫 번째 단계에서 기지국은 수신된 상향링크 SRS 신호를 경로별 기하학적 파라미터(GCPs)로 분해한다. 기존 방식은 채널 전체를 하나의 뭉치로 간주하여 경로의 생성과 소멸이나 구조적 변화를 반영하지 못하는 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 본 기법은 전체 채널을 희소 다중 경로 모델(Sparse multipath model)에 기반하여 각도, 지연, 이득 등으로 분해한다.

구체적으로, 수신 신호 행렬과 후보 파라미터 세트 간의 잔차를 최소화하는 최적화 문제를 푼다. 이때 국소 최솟값(Local Minima)에 빠지는 것을 방지하기 위해 Multi-start 순차적 이차 계획법(SQP)을 도입한다. 우선 거친 그리드 탐색(Coarse grid search)으로 초기 시드를 선별하고, 이후 SQP를 통해 파라미터를 정밀하게 갱신함으로써 계산 복잡도를 낮추면서도 정확한 파라미터 추출을 수행한다.

2. Transformer 기반 병렬 파라미터 예측

두 번째 단계에서는 추출된 과거의 파라미터 시퀀스를 입력받아 미래 시점의 파라미터를 예측한다. 이때 시계열 학습에 특화된

Transformer 인코더 구조를 활용하되, 물리적 특성이 다른 각 파라미터(각도, 지연, 이득, 위상)를 개별적으로 학습하는 병렬 예측(Parallel Parameter Prediction, P3)구조를 채택한다.

독립적인 손실 함수(Loss Function): 각 파라미터는 물리적 단위와 스케일이 다르므로, 단일 회귀 문제로 결합하지 않고 독립적인 헤드(Head)로 분리하여 학습한다. 각도와 위상은 MSE 기반, 급격한 변화가 잦은 지연은 강건한 Huber Loss, 스케일 차이가 큰 경로 이득은 로그 스케일 MSE를 적용하여 최적화의 안정성을 확보한다.

3. 채널 재구성 및 하이브리드 빔포밍

마지막 단계에서는 예측된 기하학적 파라미터들을 결합하여 미래 시점의 채널을 재구성한다. 이렇게 복원된 채널은 실제 전송 시점의 채널과 높은 유사도를 가지며, 기지국은 이를 바탕으로 하이브리드 빔포밍 벡터를 선제적으로 계산한다. 재구성된 채널을 통해 하향링크 전송률(Sum-rate)을 최대화하는 RF 및 기저대역 프리코더를 설계함으로써, 채널 노화로 인한 성능 열화를 방지하고 고속 이동 환경에서도 안정적인 통신을 보장한다.

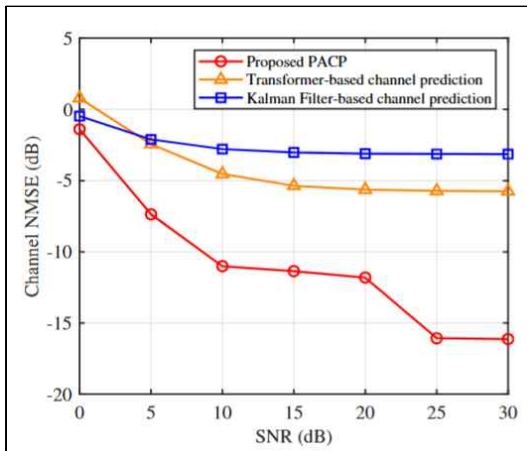


그림 1 Channel NMSE vs. SNR.

4. 모의 실험 결과 분석

그림 1은 SNR 변화에 따른 채널 예측 성능을 나타낸다. 성능 평가 지표로는 예측 채널의 정규화된 평균 제곱 오차(NMSE)를 사용하였다. 실험 결과, 제안하는 PACP 기법은 모든 SNR 범위에서 기존 채널 예측 기법들에 비해 일관되게 우수한 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 구체적으로 SNR이 15 dB인 경우, PACP는 기존의 칼만 필터(KF) 기반 예측 기법 대비 5 dB 이상의 NMSE 감소 효과를 보인다. 이는 기존 기법들이 채널 전체를 해석하기 난해한 하나의 단일 상태 벡터(Monolithic state vector)로 간주하여 처리하는 반면, PACP는 각도, 지연, 이득 등 개별 기하학적 파라미터(GCPs)가 갖는 고유하고 명확한 시간적 진화 특성을 분해하여 효과적으로 학습했기 때문이다. 또한, 단순 Transformer 기반의 채널 예측 기법과 비교해서도 PACP는 약 5 dB 이상의 NMSE 성능 이득을 달성하며 그 우수성을 입증하였다.

III. 결론

본 논문에서는 6G Upper mid-band 통신 시스템에서 발생하는 급격한 채널 변화와 이에 따른 성능 저하를 극복하기 위해, 새로운 파라미터 적응형 채널 예측(PACP) 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 Upper mid-band 채널이 희소한 다중 경로 성분으로 표현될 수 있다는 점에 착안하여, 상향링크 SRS 신호로부터 기하학적 채널 파라미터(각도, 지연, 이득 등)를 추출한다. 이후 각 파라미터의 고유한 동적 궤적을 개별적으로 학습 및 추적함으로써, 상향링크 전송 슬롯 사이의 시변 채널을 연속적이고 정밀하게 예측한다. 기지국은 이렇게 예측된 파라미터들을 결합하여 하향링크 MIMO 채널 행렬을 재구성함으로써, 다중 경로 성분의 변화를 직접적으로 반영한 물리적으로 타당한 추론을 수행할 수 있다. 모의실험 결과를 통해, 제안하는 PACP 기법이 기존 채널 예측 방식 대비 채널 NMSE 및 데이터 전송률 측면에서 현저한 성능 향상을 달성함을 입증하였다. 본 연구 결과는 향후 로봇, 시멘틱 통신, 비지상 네트워크 등 고속 이동성과 초신뢰성이 요구되는 다양한 6G 응용 분야에서 동적 채널 예측을 위한 핵심 원천 기술로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kang, M. Mezzavilla, S. Rangan, A. Madanayake, S. B. Venkatakrishnan, G. Hellbourn, M. Ghosh, H. Rahmani, and A. Dhananjay, "Cellular wireless networks in the upper mid-band," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 2058 - 2075, 2024.
- [2] S. Shin, I. Keum, J. Jeong, W. Shin, and B. Shim, "Grid-free beam management for 6g millimeter-wave communications," in *ICC 2025-IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2025, pp. 2754 - 2759.
- [3] A. Bazzi, R. Bomfin, M. Mezzavilla, S. Rangan, T. Rappaport, and M. Chafii, "Upper mid-band spectrum for 6g: Vision, opportunity and challenges," *arXiv preprint arXiv:2502.17914*, 2025.
- [4] D. Burghal, Y. Li, P. Madadi, Y. Hu, J. Jeon, J. Cho, A. F. Molisch, and J. Zhang, "Enhanced ai-based csi prediction solutions for massive mimo in 5g and 6g systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 117 810 - 117 825, 2023.
- [5] Z. Wan, Z. Gao, B. Shim, K. Yang, G. Mao, and M.-S. Alouini, "Compressive sensing based channel estimation for millimeter-wave full-dimensional mimo with lens-array," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 2337 - 2342, 2019.