

고속철도 통신 고도화를 위한 기술적 제약 분석 및 표준화 동향

안재일, 김동성, 윤일환, 주유민, 이지욱, 권보규, 김도엽*

인천대학교

jaeil2@inu.ac.kr, ehdtjddl7932@naver.com, jack4652@naver.com, 22joomin@inu.ac.kr,
applemango1159@naver.com, skdliqhrb@inu.ac.kr, *doyup@inu.ac.kr

Technical Constraint Analysis and Standardization Trends for Enhancing High-Speed Railway Communications

Bogyu Kwon, Yumin Joo, Jaeil An, Jiwook Lee, Dongsung Kim, Il-hwan Yun, Do-Yup Kim*

Incheon National Univ.

요약

본 연구는 고속철도 환경에서 발생하는 도플러 효과 및 핸드오버 실패 등 주요 기술적 제약 사항을 분석하고, 이를 해결하기 위한 차세대 무선 통신 기술의 적용 가능성을 다룬다. 특히, FRMCS 표준을 기반으로 인공지능을 활용한 예측 이동성 관리와 지능형 빔 제어 및 다중 연결 기법의 효용성을 고찰한다. 본 연구는 이러한 분석을 통해 철도 운영의 안정성을 확보하고, 향후 국내외 철도 통신 체계 고도화 및 표준화 방향 설정을 위한 기술적 근거를 제공하고자 한다.

I. 서론

최근 전 세계적으로 철도 산업의 디지털 전환이 가속화됨에 따라, 열차 제어 자동화, 실시간 관제 고도화 및 대용량 승객 서비스 제공을 위한 정 보통신기술의 중요성이 비약적으로 증대되고 있다. 이에 따라 기존 음성 중심의 GSM-R 및 LTE-R 시스템은 초저지연·초고신뢰·고가용성 (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication, URLLC)을 만족하는 FRMCS(Future Railway Mobile Communication System) 및 5G/6G 기반 차세대 철도 통신망으로 빠르게 진화하고 있다[1]. 그러나 시속 300~500 km/h로 주행하는 고속철도(High-Speed Railway, HSR) 환경은 기존 이동통신 시스템이 전제하는 채널 안정성, 셀 체류 시간 및 이동성 관리 구조가 더 이상 유효하지 않은 극한의 통신 환경을 형성한다. 고속 이동에 따른 단말과 기지국 간 상대 속도 증가는 심각한 도플러 주파수 편이를 유발하며, 이는 OFDM(Orthogonal frequency division multiplexing) 기반 무선 시스템의 직교성을 봉괴시켜 부반송과 간 간섭(Inter-Carrier Interference, ICI)을 초래한다. 특히 mmWave 및 6 GHz 이상 고주파 대역을 활용하는 차세대 철도 통신 환경에서는 채널 코히런스 시간이 수 ms 이하로 단축되어 물리 계층의 불안정성이 더욱 심화된다[2]. 이러한 물리 계층의 급격한 성능 열화는 셀 경계 구간에서의 빈번한 핸드오버 실패로 직결되며, 이는 열차 제어 신호 지연, 패킷 손실 및 연결 단절을 야기하여 철도 통신 시스템의 신뢰성을 근본적으로 저하시킨다. 기존의 임계값 기반(Non-AI) 반응형 핸드오버 방식은 신호가 임계 수준 이하로 저하된 이후에야 동작하는 구조적 한계로 인해 고속 주행 환경에서 충분한 대응이 어렵다는 점이 실험적으로 보고되고 있다[3]. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 인공지능 기반 예측 이동성 관리, Massive MIMO 기반 빔 추적 (Beam Tracking), 그리고 다중 연결(Multi-connectivity) 기술이 차세대 철도 통신의 핵심 기술로 부상하고 있다. 특히 단말의 이동 궤적 및 시간 축 신호 변화를 학습하여 핸드오버를 선제적으로 수행하는 예측 기반 핸드오버 기법은 고속철도 환경에서 기존 방식 대비 실패율을 현저히 감소시키는 효과를 보이는 것으로 보고되었다[3]. 또한 열차 간 직접 통신을

활용한 T2T(Train-to-Train) 데이터 오프로딩 기법[4]과 O-RAN 기반의 다중 애이전트 자원 관리 기법[5]은 네트워크 부하 완화 및 자원 활용 효율 극대화를 위한 유망한 대안으로 평가된다. 본 논문에서는 고속철도 환경에서의 도플러 기반 이동성 봉괴 현상을 분석하고, AI 기반 예측 핸드오버, Massive MIMO 기반 지능형 빔 추적, 다중 연결 및 지능형 자원 관리 기술의 적용 가능성과 성능 개선 효과를 통합적으로 고찰한다. 이를 통해 FRMCS 및 5G/6G 기반 차세대 철도 통신망의 표준화 및 설계 방향 설정을 위한 기술적 근거를 제시하고자 한다.

II. 본론

본 연구에서는 고속철도 환경의 300~500 km/h의 빠른 이동 속도로 인해 발생하는 도플러 효과는 매우 강력하고, 이는 무선 링크의 안정성을 저해하는 근본적인 원인이 된다[3]. 단말과 기지국 간 상대 속도 v 가 존재할 때 발생하는 도플러 주파수 편이 f_d 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

(f_c : 반송파 주파수, v : 단말 이동 속도, c : 광속, θ : 입사각)

$$f_d = f_c \frac{v}{c} \cos\theta \quad (1)$$

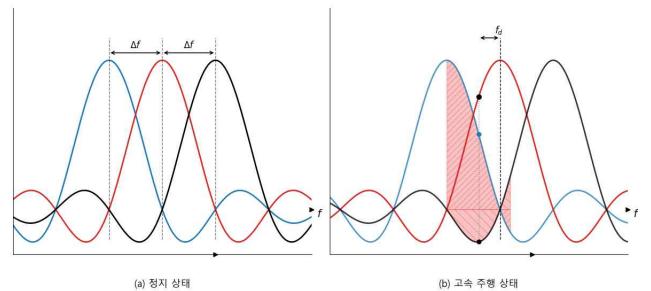


그림 1. 부반송파 직교성 비교 [2]

(a) 정지 상태, (b) 고속 주행 시 도플러 편이 발생 상태
예를 들어, 속도가 400 km/h이고, $f_c = 3.5$ GHz인 환경에서 최대 도플러는 약 1.3 kHz 수준에 달하며, 이는 채널이 매우 빠르게 변하는

'Time-selective channel' 환경을 초래한다. 이러한 환경에서 350 km/h 이상으로 주행 시 채널이 변하지 않는 시간은 수 ms이하로 단축되며, 이는 현대 무선 통신의 기반인 OFDM 시스템의 직교성을 봉괴시켜 부반송과 간 간섭을 유발하게 된다[2]. 그림 1은 이러한 현상을 시각적으로 보여준다. 정지 상태(a)에서는 부반송과 간 직교성이 유지되나, 고속 주행 시 (b)에는 오플러 편이로 인해 주파수 축이 이동하면서 인접한 부반송과 구간을 침범하는 간섭(ICI)이 발생함을 나타내는 그림이다.

결국 원하는 신호 세기 대비 간섭 세기를 나타내는 C/I 수치가 급격하게 떨어지게 되는데, 분석 결과 고속철도는 도시철도 대비 C/I 가 무려 12dB나 낮아지는 심각한 품질 저하를 보인다고 한다. 이러한 결과는 채널 안정성이 떨어진다고 볼 수 있다.

이동 속도(km/h)	기존 방식(Non-AI) 실패율	AI 기반 예측 방식 실패율
60 km/h	24.6%	약 5.1%
120 km/h	27.8%	약 9.4%
350 km/h	39.1%	약 10%
500 km/h	39.9%	약 10.2%

표 1. 이동 속도 별 핸드오버 실패율 비교

이러한 물리 계층의 불안정성은 철도 통신에서 가장 치명적인 문제인 핸드오버(Handover) 실패로 직결된다. 핸드오버 판단의 주요 지표로는 RSRP(Reference Signal Received Power)와 RSRQ(Reference Signal Received Quality)가 활용된다. RSRP는 단말이 수신하는 개별 리소스 요소(RE)의 평균 전력으로 신호의 절대적인 세기를 의미하며, RSRQ는 다음의 수식을 통해 산출되는 상대적인 신호 품질 지표이다.

(RSSI: 간섭과 노이즈를 포함한 전체 수신 신호 강도, N: RSSI 측정 대역폭 내의 리소스 블록)

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI} \quad (2)$$

고속철도 환경에서는 강력한 도플러 효과로 인해 부반송과 간 간섭이 발생하며 이는 수식의 분모인 RSSI를 급격히 증가시켜 결과적으로 RSRQ를 저하시키는 주요 원인이 된다. 또한 고속 주행 중에는 단말의 셀 내 체류 시간이 수초 단위로 매우 짧아지고, RSRP 및 RSRQ 값이 매우 빠르게 변동하기 때문에, 기존의 비 AI 기반 방식으로는 핸드오버 트리거 조건을 안정적으로 판단하기 어렵다. 그림2와 표1은 이동 속도 증가에 따른 핸드오버 실패율 변화를 비교한 것이다. 실제로 기존의 반응형(Non-AI) 방식은 속도가 증가함에 따라 실패율이 가파르게 상승하여 500 km/h로 주행 시 39.9%의 핸드오버 실패율을 보였다. 이를 해결하기 위해 LSTM(Long Short-Term Memory) 및 GRU 등 딥러닝 모델을 활용하여 RSRP/RSRQ의 변화 패턴을 학습하고, 미래의 신호 품질을 선제적으로 예측하여 셀 전환을 시도하는 기술이 연구되고 있다. 실제 데이터 분석 결과에 의하면, 이러한 AI 기반 예측 방식을 도입할 경우 동일한 500 km/h 속도 환경에서도 핸드오버 실패율을 약 10.2% 수준으로 대폭 개선할 수 있음을 확인하였다.

안정적인 통신 품질 확보를 위해서는 예측 기반 핸드오버 외에도 Massive MIMO 기반의 범 추적 기술이 필수적으로 요구된다. 특히 6 GHz 이상의 고주파 대역으로 갈수록 범 폭이 좁아지고 각도 오차에 민감해져 범 부정렬 문제가 빈번하게 발생하므로, 실시간 위치 정보와 딥러닝 기반의 CSI 예측을 통해 범의 방향을 열차에 정확히 맞추는 기술이 뒷받침되어야 한다. 또한 터널이나 교량 등 전파 차폐 구간에서의 끊김 없는 연결을 위해 DC(Dual Connectivity)를 포함한 다중 연결 기술을 통해 기지국 간 이중화된 링크를 제공함으로써 안정성을 강화해야 한다. 아울러 최근에는 열차 간 접촉 시간을 활용한 T2T(Train-to-Train) 기반 데이터

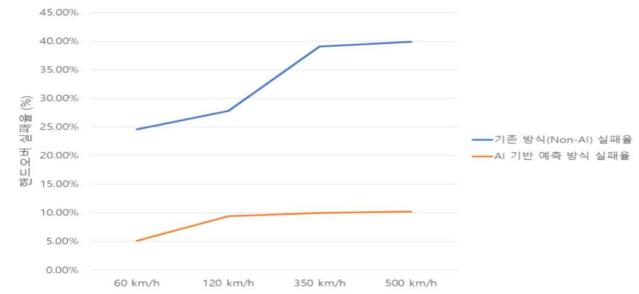


그림 2. 이동 속도 증가에 따른 핸드오버 실패율 비교 [6]

오프로딩과 Multi-Agent 기반 O-RAN 자원 관리 기법 등이 네트워크 부하를 경감하고 효율성을 높일 수 있는 차세대 철도 통신의 핵심 기술로 주목받고 있다[4][5].

III. 결론

본 연구에서는 고속철도의 디지털 전환에 따른 통신망 고도화의 필요성을 역설하고, 시속 300~500 km/h의 초고속 주행 환경에서 발생하는 기술적 한계점과 이를 극복하기 위한 차세대 철도통신 기술 동향을 심도 있게 분석하였다. 첫째, 고속 이동성 환경에서 발생하는 물리적 제약 사항인 도플러 편이와 빈번한 핸드오버 문제를 수식적으로 모델링하여 통신 품질 저하의 원인을 명확히 규명하였다. 분석 결과, 열차의 속도가 증가함에 따라 핸드오버 주기는 급격히 감소하며, 이는 기존 LTE-R 망의 제어 평면 부하를 가중시켜 통신 단절 확률을 높이는 주요 원인이 됨을 확인하였다. 둘째, 이러한 문제를 해결하기 위해 유럽의 FRMCS 표준화 동향과 더불어 예측 기반 핸드오버, 지능형 범 트래킹, 그리고 다중 연결성(Multi-connectivity) 기술의 적용 가능성을 검토하였다. 특히, 열차의 주행 정보를 활용한 예측 알고리즘은 기존의 반응형 핸드오버 방식보다 자연 시간을 획기적으로 단축할 수 있는 핵심 대안임을 도출하였다. 결론적으로, 안정적인 철도 통신 환경 구축은 단순한 데이터 전송 효율의 향상을 넘어, 열차 제어의 안전성과 승객 서비스의 질을 결정짓는 필수 인프라이다. 본 연구에서 제시한 분석 모델과 기술적 대안들은 향후 5G/6G 기반의 초연결 철도망 설계 및 최적화 과정에서 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 김종기, "스마트 철도 통신 표준화 동향과 지향점," *한국철도기술연구원 기술보고서*, pp. 1-6, 2023.
- [2] Park, J. J., Lee, J., Kim, K. W., Kwon, H. K., and Kim, M. D., "Empirical millimeter-wave wideband propagation characteristics of high-speed train environments," *ETRI J.*, vol. 43, no. 3, pp. 377-388, 2021.
- [3] Lu, Y., Zhang, C., Chen, D., Zhang, W., and Xiong, K., "Handover enhancement in high-speed railway 5G networks: A LSTM-based prediction method," in *Proc. ICCCNT*, 2022, pp. 1-6.
- [4] Saki, M., Abolhasan, M., Lipman, J., and Jamalipour, A., "Mobility model for contact-aware data offloading through train-to-train communications in rail networks," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 597-609, 2020.
- [5] C.-H. Lai, L.-H. Shen, and K.-T. Feng, "Intelligent load balancing and resource allocation in O-RAN: A multi-agent multi-armed bandit approach," in *Proc. PIMRC*, 2023.
- [6] W. Li, W. Chen, S. Wang, Y. Zhang, M. Matthaiou, and B. Ai, "AI-Driven Mobility Management for High-Speed Railway Communications: Compressed Measurements and Proactive Handover," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 30, no. 4, pp. 34-40, 2023.