

NR SFN 기반 고속 철도 통신 시스템의 성능 평가

황인철*, 변일무*, 김태형**,
최수용*, 왕한호°

Performance Evaluation of NR-Based HST Communication Systems

Incheol Hwang*, Byun Il Mu*,
Taehyung Kim**, Sooyong Choi**,
Hanho Wang°

요 약

본 논문에서는 5세대 이동통신 (5G new radio, NR)에서 저지연 전송을 위하여 부반송파 간격 (subcarrier spacing, SCS)이 증가할 때, 기존 고속 열차 (high speed train, HST) 단일 주파수 네트워크 (single frequency network, SFN) 시스템이 심볼 간 간섭(inter-symbol interference, ISI) 문제로 목표 블록 오류율 성능을 달성할 수 없음을 밝혔다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전송 시간 당김(transmission time advance, TTA) 기법을 제안하였다. 현실적인 성능 평가 모델이 적용된 실험을 통하여 TTA를 적용하였을 때 NR HST SFN이 SCS가 증가하더라도 블록 오류율 측면에서 신뢰성 있는 저지연 전송을 할 수 있음을 보였다.

Key Words : HST, NR, Numerology, SFN, 5G

ABSTRACT

In this letter, when the subcarrier spacing (SCS) increases for low latency transmission in 5G new radio (NR), the existing high speed train (HST)

single frequency network (SFN) system, cannot achieve target block error rate (BLER) performance due to inter-symbol interference (ISI) problem. In order to solve the ISI problem, a transmission time advance (TTA) scheme is proposed. Simulation results using a realistic evaluation model show that the TTA-applied HST SFN can achieve the target BLER and provide reliable low latency transmission even if the SCS increases in NR.

1. 서 론

5세대 이동통신 (5G new radio, NR) 기반의 고속 철도 통신 시스템 (high speed train communication system, HST)에 대한 표준화 논의가 진행되고 있다^[1]. HST는 고속 철도 환경에서 열차 주행 정보, 안전 관련 정보, 영상 및 음성 데이터 등을 무선으로 전송하는 시스템이다. 고속 철도 환경에 NR 통신망을 적용하면 시속 500km/h 이상으로 달리는 고속열차에 저지연 고속 데이터 서비스를 제공할 수 있다.

HST 시스템은 기본적으로 단일 주파수 네트워크 (single frequency network; SFN) 전송 시나리오를 고려한다. SFN은 열차와 균일한 간격으로 설치된 복수의 remote radio head(RRH) 들로 구성되어 있으며, 하나의 주파수를 이용하여 동일한 데이터를 송신한다^[2]. SFN을 사용하면 빠른 이동체에 대한 핸드오버 지원이 필요 없으며 빔 방향 불일치 문제를 인접 RRH 신호를 수신하여 해결할 수 있다. 그러나, NR 시스템은 수비학(numerology)이 적용된 부반송파 간격 (subcarrier spacing, SCS) 설정에 따라 15kHz 내지 480kHz의 부반송파를 사용할 수 있어, 부반송파 간격 선택에 따라 RRH에서 송신되는 신호들 간 심볼 간 간섭(inter-symbol interference, ISI)에 의해서 SFN의 성능이 열화된다.

본 논문에서는 현재 3GPP 표준에서 논의되고 있는 NR HST 채널 모델과 SFN 전송 시나리오에 기반하여 HST 시스템의 성능을 평가하였다. 특히 ISI가 발

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : (0000-0003-3453-6658)Yonsei University Department of Electrical and Electronic Engineering, hic0530@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (0000-0002-0672-7775)Sangmyung University Department of Information and Telecommunication Engineering, hhwang@smu.ac.kr, 정회원

* (0000-0003-1241-4756)Korea Railroad Research Institute Train Control & Communication Research Team, ilmubyun@krii.re.kr, 정회원

** (0000-0002-9344-510X)Yonsei University Department of Electrical and Electronic Engineering, xogud117@yonsei.ac.kr, 학생회원; (0000-0001-7413-1765)csyong@yonsei.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 201909-189-A-LU, Received September 3, 2019; Revised September 20, 2019; Accepted September 20, 2019

생활 수 있는 부반송과 간격에 대하여는 전송 시간 당김(transmission timing advance, TTA) 기법을 제안하였으며, TTA를 통해서 NR 기반 HST 시스템에서 신뢰성 있는 저지연 전송이 가능함을 블록 오류율(block error rate, BLER)을 통하여 검증하였다.

II. NR HST 시스템

2.1. NR 기반 저지연 HST 시스템 모델

NR 기반의 HST 시스템은 SFN 전송 시나리오를 고려한다. SFN 전송 시스템은 등간격으로 설치된 RRH들과 열차에 설치된 중계기인 mobile relay station(MRS)로 구성된다^[1]. 복수의 RRH들은 하나의 주파수를 통해 MRS에게 동일 신호를 송신한다.

그림 1은 SFN 전송 시나리오로 동작하는 HST 시스템을 보여준다. RRH들은 열차 선로의 양 측에서 교대로 위치한다^[3]. 일반적인 HST 성능 평가 환경에서 RRH 간 거리를 580 m로 설정한다^[1]. 열차의 직선 이동을 고려하여 열차 진행 반대 방향으로 단방향 송수신 빔포밍이 사용된다^[4]. MRS는 진행방향에서 가까운 순서대로 K 개의 RRH로부터 신호를 수신하고, 가장 가까운 RRH로부터 수신되는 신호에 동기를 맞춘다. 그림 1에서 $K=2$ 이고 MRS는 RRH2와 RRH3으로부터 신호를 수신하고 있다. 6 GHz 이상에서 도플러 편이로 인한 수신 성능 열화 방지 및 저지연 통신 지원을 위해 부반송과 간격은 60 kHz 이상을 사용한다^[4].

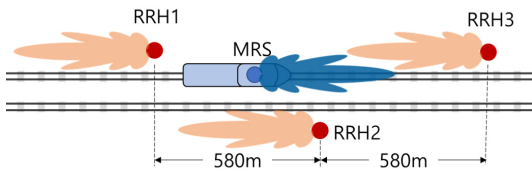


그림 1. NR 기반 고속 철도 통신 시나리오
Fig. 1. NR HST scenario

III. NR SFN 시스템의 문제점 및 해결방안

3.1 NR HST의 심볼 간 간섭 문제

SFN 전송 시나리오에서, MRS의 진행 방향에서 MRS로부터 $k+1$ 번째 가까운 RRH에 대한 전파지연을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_k = k \frac{d_r}{c} + \frac{\tilde{d}_0}{c}, k=0,1,2...K-1 \quad (1)$$

여기서 \tilde{d}_0 과 d_r 은 각각 MRS와 가장 가까운 RRH 사이의 거리와 인접한 RRH 간의 거리를 의미한다. K 는 MRS에 데이터를 전송하는 RRH의 수이며 c 는 빛의 속도이다. (1)에서 MRS는 진행 방향에서 가장 가까운 RRH에 동기를 맞추고 있기 때문에 τ_0 의 값은 실질적으로 0이다. 따라서 RRH로부터 수신되는 신호의 최소 전송 지연 시간은 $\tau_1 = d_r/c$ 가 된다.

3GPP HST 성능 평가 환경 설정 값으로부터 d_r 는 580 m이며, RRH로부터 수신한 신호들 간의 지연 시간 차이는 $d_r/c = 1.93\mu s$ 가 된다. HST 시스템에서 60kHz SCS를 사용할 때 OFDM 심볼의 순환 보호구간(cyclic prefix, CP)의 길이는 약 1.17 us에 불과하므로 ISI가 발생하게 된다. 6GHz 이상(above 6GHz)의 반송파 주파수에서 60kHz 이상의 SCS를 사용하도록 되어 있으므로, SFN을 사용하게 되면 60GHz 이상의 모든 SCS에서 ISI가 발생한다.

표 1에는 SCS와 RRH의 간격에 따라 5G SFN의 ISI 발생 여부가 음영으로 표시되어 있다. T_{CP} 와 $d_{r,min}$ 는 각각 SCS 별 CP의 길이 및 ISI가 발생하지 않는 최소 RRH 간격이다. 이 표에 제시된 결과로부터 NR HST의 SFN은 SCS 증가를 통해서 저지연 전송을 하기 위하여 SCS에 증가에 반비례하여 RRH 간격을 감소시켜야 한다. 즉 설치해야 하는 RRH 수가 SCS 증가에 비례하여 증가한다.

표 1. RRH간격과 SCS를 고려한 SFN의 ISI 발생 여부
Table 1. ISI occurrence of SFN considering RRH interval and SCS

SCS \ d_r	145.0m	290.0m	580.0m	$d_{r,min}$
60kHz	$T_{CP} > \tau_1$	$T_{CP} > \tau_1$	$T_{CP} < \tau_1$	351.6m
120kHz	$T_{CP} > \tau_1$	$T_{CP} < \tau_1$	$T_{CP} < \tau_1$	175.8m
240kHz	$T_{CP} < \tau_1$	$T_{CP} < \tau_1$	$T_{CP} < \tau_1$	87.9m

3.2 전송 시간 당김 기법

본 논문에서는 NR 기반의 HST 시스템에서 ISI 문제를 해결하기 위해 TTA 기법을 제안한다. 제안하는 TTA 기법은 RRH들의 전송 시점을 전파 지연(τ_k)에 비례하여 당김으로써 모든 RRH들로부터 전송된 신호가 CP 길이 이내에서 MRS에 수신되도록 한다. 제안

기법에서 MRS의 전방에서 $k+1$ 번째 가까운 RRH의 전송 지점을 다음과 같이 조절한다.

$$T_k = T_0 - k \frac{d_r}{c}, k = 0, \dots, K-1 \quad (2)$$

여기서 T_0 는 MRS와 가장 가까운 RRH의 전송 지점을 의미한다. (2)의 당김 시간은 단순한 사칙연산에 의해서 구해지므로 TTA 구현 복잡도는 매우 낮다. 또한 MRS가 가장 가까운 RRH에 동기를 맞추고 있으므로, 가장 가까운 RRH가 변경될 때 (2)를 1회만 계산해 주면 된다.

IV. NR HST 성능 평가

NR HST의 SFN 시나리오에서 TTA가 적용 여부에 따른 시스템의 성능을 BLER 척도로 평가하였다. 메시지 길이에 따른 채널 코딩 성능 개선 효과를 최소화하기 위하여 최소 TBS(transport block size)를 사용하였다. SCS 120kHz로 실험하였으며 나머지 실험 설정은 기존 연구와 동일하다 [4]. 열차의 MRS와 RRH들과의 상대적인 위치는 그림 1과 같이 $K=2$ 를 고려하였다. 열차의 속력은 500 km/h를 가정하였다. 9번 channel quality indicator(CQI)에 해당하는 16QAM 코드율 2/3을 사용하였다. Least square(LS) 채널 추정 기법을 사용하였다.

그림 2는 열차의 위치에 따른 BLER 성능을 보여 준다. 열차가 A 구간(0m에서 460m 사이)에 있을 때, MRS는 RRH2로부터 가장 강한 세기의 신호를 받는다. 따라서 MRS가 RRH2에 가까워짐에 따라 BLER이 감소함을 관찰할 수 있다.

그러나 열차가 B구간에서 RRH2에 접근하면서 두 가지 이유로 BLER 성능이 열화된다. 첫 번째 이유는 송신-수신 빔 정렬의 훼손이고 두 번째 이유는 RRH3

에 의한 ISI가 증가이다.

첫 번째 이유에 대해서, 일반적인 HST SFN 시나리오에서 송신빔과 수신빔은 열차의 진행 방향과 평행하므로 열차가 RRH에 접근함에 따라 송신빔의 주엽을 수신빔의 부엽에서 수신하게 되고 부엽의 패턴에 따라 수신 신호 강도가 약해지다 강해지는 현상이 반복(B1~B3)된다. 두 번째 이유에서, SCS 증가에 따른 CP 길이의 감소는 RRH3의 신호에서 ISI가 발생하도록 만들기 때문에 RRH2에 접근할수록 ISI에 의한 성능 열화 정도가 증가한다.

반면, 제안하고 있는 TTA 기법을 사용하면 전 구간에서 약 0.01의 BLER 성능을 얻을 수 있음을 관찰할 수 있다. 이는 제안 기법을 사용하면 MRS가 모든 RRH의 송신 신호를 동일한 시간에 수신하게 되어 ISI가 발생하지 않기 때문이다. 이를 통하여, 제안 기법을 이용하면 NR의 넓은 대역의 SCS를 사용해도 저지연 전송이 가능함을 알 수 있다.

TTA를 사용하면 T_{K-1} 만큼의 전송 지연이 추가로 발생할 수 있으나, SCS 증가에 따른 전송 지연 개선 효과가 더 크다. K 가 증가하면 송신 RRH 증가로 수신 신호 강도는 개선되지만 T_{K-1} 도 같이 증가하므로 목표 BLER을 달성하기 위한 최소의 K 값을 찾는 연구를 추가로 진행할 계획이다.

V. 결론

본 논문에서는 NR에서 저지연 전송을 위해 SCS가 증가할 때, 기존 HST SFN 시스템이 ISI 문제로 기대했던 BLER 성능을 달성할 수 없음을 밝혔다. 이러한 ISI 문제를 해결하기 위하여 TTA를 제안하였으며, 현실적인 성능 평가 모델이 적용된 실험을 통하여 TTA를 적용하였을 때 NR기반 HST SFN이 SCS가 증가하더라도 BLER 측면에서 신뢰성 있는 저지연 전송을 할 수 있음을 보였다.

References

- [1] F. Hasegawa, A. Taira, G. Noh, Bing Hui, H. Nishimoto, A. Okazaki, A. Okamura, J. Lee, and I. Kim, "High speed Train communications standardization in 3GPP 5G NR," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 44-52, Mar. 2018.
- [2] K. Ko, S. Park, J. Kim, and S. Choi.

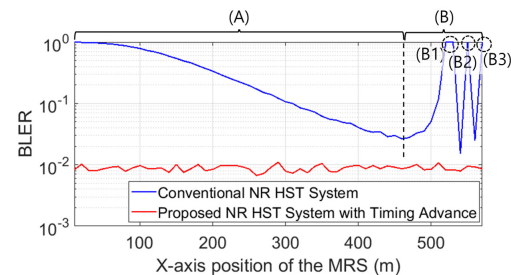


그림 2. X축에서 MRS의 위치에 따른 NR HST 시스템의 블록오류율 성능
Fig. 2. BLER performance of NR HST system with respect to X-axis position of the MRS

- “Possibility analysis of communication system development for high speed scenario in LTE,” in *Proc. KICS Summer Conf.*, p. 107, Jun. 2017.
- [3] 3GPP TR 38.802, “*Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects*,” Rev. 14.0.0.
- [4] G. Noh, B. Hui, J. Kim, H. S. Chung, and I. Kim, “DMRS design and evaluation for 3GPP 5G new radio in a high speed train scenario,” *GLOBECOM 2017*, pp. 1-6, Singapore, 2017.
- [5] 3GPP TR 38.901: “*Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*”