The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 18, No. 5, pp.103-109, Oct. 31, 2018. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.5.103
JIIBC 2018-5-13

mmWave대역에서 고속 이동상태 5G MIMO 시스템 성능 분석

Performance Analysis of High-Speed 5G MIMO System in mmWave Band

이병진*, 주상임*, 김남일**, 김경석***

Byung-Jin Lee*, Sang-Lim Ju*, Nam-il Kim, Kyung-Seok Kim*****

요 약 5G 목표 중 하나는 기차와 같이 고속으로 이동하는 사용자에 대해 고속의 데이터 속도를 제공하는 것이다. 따라서, High speed train (HST) 시나리오와 같은 높은 이동성 시나리오는 5세대 통신 시스템의 전형적인 시나리오가 될 것으로 예상된다. HST가 급속하게 발전함에 따라 열차 승객에게 무선 통신 데이터를 전송 해야하며, 이용자들의 요구하는 통신 속도는 점차 증가하고 있다. HST 사용자는 현재 HST 통신 시스템의 기능을 벗어나는 위치 또는 속도에 관계없이 높은 네트워크 용량과 안정적인 통신 서비스를 요구한다. 따라서, 5세대 이동통신으로 사용될 mm대역에서 5G 이동통신 시스템에 맞춰 전송 frame을 구성하고 HST 통신 시스템을 구현하고 HST 시나리오에서 광대역 비 정지 MIMO HST 채널에 대한 성능을 분석한다.

Abstract One of the 5G goals is provide to high data rates for users moving at high speeds, such as trains. High mobility scenarios such as high speed train (HST) scenarios are expected to be typical scenarios for fifth generation communication systems. As the HST develops rapidly, it is necessary to transmit wireless communication data to train passengers, and the communication speed required by users is gradually increasing. HST users require high network capacity and stable communication services regardless of the location or speed of the HST communication system. Therefore, a transmission frame is constructed for the 5G mobile communication system in the mm band to be used for the fifth generation mobile communication, the HST communication system is implemented, and the performance of the wideband non-stationary MIMO HST channel is analyzed in the HST scenario.

Key Words : 5G communication, mmWave, High speed train, spatial multiplexing

I. 서 론

과거 2G부터 3G까지의 이동통신은 음성 위주의 서비스 및 데이터 서비스의 시작점을 제공하였던 반면에, 4G 이동통신에서는 본격적인 데이터 중심의 이동통신 서비스로의 큰 변화를 이루었다. 최근 콘텐츠별 무선 트래픽을 보면 동영상을 포함한 멀티미디어, 인터넷 등 몇 년 전만 해도 유선 통신에서만 제공 가능했던 서비스가 모바일 환경에서도 주된 콘텐츠로 자리 잡게 되는 큰 변화가 있었다. 이러한 서비스 이용 패턴의 변화는 무선 네트워크가 3G에서 4G로 진화함으로써 전송 속도가 급속도로 향상되었고, 모바일 서비스 시장에서 차별적인 고객

*정회원, 충북대학교 전파통신공학,
**정회원, 한국전자통신연구원(ETRI) 5G 기가통신연구소
접수일자 : 2018년 8월 23일, 수정완료 : 2018년 9월 23일
게재확정일자 : 2018년 10월 5일

Received: 23 August, 2018 / Revised: 23 September, 2018 / Accepted: 5 October, 2018
***Corresponding Author: kseokkim@cbnu.ac.kr
Department of Electrical and Electronic Engineering, Chungbuk National University, Korea

경험을 제공하기 위한 많은 서비스들이 활발히 개발되었기 때문이다. 하지만, 이동 통신망의 진화는 여기에 그치지 않고 2020년 상용화를 목표로 한 새로운 5G 이동통신에 대한 논의가 국내외에 본격적으로 진행되고 있다 [1]. 5G 목표 중 하나는 기차와 같이 고속으로 이동하는 사용자에 대해 고속의 데이터 속도를 제공하는 것이다. 4세대까지의 이동통신 시스템은 6GHz 이하의 셀룰러 주파수를 사용하며 저속 이동환경에 최적화된 시스템이다. 즉, 4세대 이동통신의 요구조건은 저속(3km/h)환경에 최적화, 중속(~120km/h)까지는 좋은 품질을 제공하며 고속(~350km/h)에서는 통신접속이 끊어지지 않는 정도의 서비스에 한정되었다[2]. 이러한 4세대 이동통신의 요구조건은 스마트폰이 활성화되기 전에 ITU-R 및 3GPP 등에서 제시된 요구조건이다. 스마트폰 중심의 모바일 데이터 서비스 사용량이 매년 가파른 증가세를 보이며 4세대 LTE/LTE-A 이동통신 시스템까지 상용화가 되어 이동통신 가입자들이 모바일 데이터 서비스를 받고 있다. 중국의 화웨이는 광저우, 쉔젠, 홍콩 등에 GSM-R 기술을 도입한 이래 2010년 이후 상하이 고속열차에 LTE 기반 백홀 솔루션을 제공하고 있다. 2014년 화웨이 자료에 따르면 최대 430km/h로 달리는 상하이 고속열차의 30km 구간에서 평균 25Mbps 데이터 속도를 제공한다[3]. 러시아에서는 최근 모스크바 지하철에서 Wi-Fi 서비스를 제공하고 있다. 5GHz 주파수대를 사용하여 채널 당 40MHz를 지원하며 열차에 80Mbps를 제공한다. 지하철 내에서는 객차마다 AP를 설치하여 승객에게 Free Wi-Fi 서비스를 제공한다. Track line에 설치되는 안테나 간격은 900m 정도이며 열차 위에 2개의 안테나를 설치하여 2×2 MIMO를 지원한다[4]. 일본의 NTT는 고속열차와 지상의 무선 구간에서 Leakage Coaxial Cable(LCX)을 이용하고 차량 내부에 서는 WLAN을 통해서 AP를 제공한다. 일본의 NTT Series N700은 2009년부터 상용 서비스를 시작하여 현재 일본의 신간센에 적용되었으며, 270km/h의 고속철도 이동 속도에서 2 Mbps 데이터 전송속도를 제공한다. 이와 같이 최근 몇 년 동안, 250km/h 이상의 속도를 가진 High Speed Train (HST) 시스템이 중요한 발전을 이루었다. HST의 최대 속도는 향후 10 년 내에 500km/h에 쉽게 도달 할 수 있으며 승객 수는 급격히 증가 할 것으로 보고 되었다[5]. 결과적으로 높은 데이터 전송률과 신뢰성있는 통신 서비스에 대한 요구가 높아지고 있다[6,7]. 그러나 기존 무선 통신 시스템 (4 세대 시스템 포함)은 최대 250km/h의 모바일 속도 만 지원할 수 있습니다. 따라서 미래의 HST 시스템을 위한 신뢰성 있는 무선 통신 서비스는 제 5세대 (5G) 무선 통신 시스템[8]에서 중요한 문제로 고려되어왔다. 따라서, 본 논문은 5G 이동통신 시스템에 맞춰 5G New radio (NR) frame을 구성하고 mmwave대역에서 고속으로 이동하는 환경인 HST채널 조건하에서 mobile relay station (MRS)의 업링크 및 다운링크의 성능을 평가한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 고속 이동 시스템 모델을 설계하고, 3장에서는 고속 이동 시스템의 성능을 평가하며, 4장에서 결론을 맺는다.

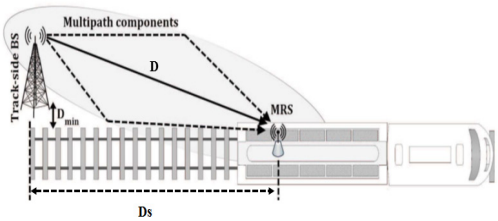

그림 1. 이동상태 mmWave HST 시스템 구성
Fig. 1. Movement status mmWave HST system configuration

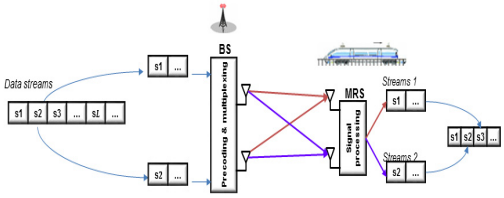

그림 2. SM MIMO HST 시스템 환경
Fig. 2. SM MIMO HST system environment

II. 시스템 모델

1. 시스템 구성

본 논문에서는 HST 시스템이 무선 서비스 품질을 개선하기 위해 MRS를 사용한다고 가정한다. spatial multiplexing (SM) MIMO HST 시스템이 N_t 개의 송신 안테나 요소와 N_r 개의 수신 안테나 요소를 갖추고 있다고 가정한다. 그림 1과 같이, BS는 $D_{\min}$로 표시되는 BS와 트랙 사이의 최소 거리를 고려한 트랙 사이드에 위치한다. BS와 MRS 간의 시간적 거리는

$D(t)=\sqrt{D_{\min}^2+D_s^2(t)}$ 와 같이 정의된다. 여기서 $D_s(t)$는 철도 트랙면에서 $D(t)$의 투영을 나타낸다. 그림 3은 multiple-confocal-ellipses geometry-based stochastic model (GBSM)을 나타낸다[9]. 이러한 타원은 채널 모델의 여러 탭들을 나타낸다. 다른 탭의 경우, LoS로 표시되는 직접파와 SB (single-bounced)으로 표시된 단일 반사 신호를 고려한다. 2 x 2 SM MIMO 모델을 그림 2과 같다.

SM 시스템에 대한 자세한 아이디어는 [10]에서 소개되었다. Rx에서 Tx 및 Nr 수신 안테나에서 Nt 개의 송신 안테나를 사용하는 MIMO 시스템이 있다고 가정하면, 디지털 변조기로 M 차수 quadrature-amplitude modulation (QAM) / quadrature phase shift keying (QPSK) 변조 방식이 사용된다. 매 시간마다, m = log2 (Nt) + log2 (M) 비트가 전송 될 수 있으며, 여기서 m은 비트 / 심볼로 SM 시스템의 스펙트럼 효율로 정의된다. 비트 시퀀스 (0001)가 전송되고, 첫 번째 두 비트 00이 송신 안테나로서 Tx1을 선택하는데 사용되고 안테나 인덱스에 의해 운반된다고 가정하자. 다른 두 비트 01은 복소 심볼 S2에 매핑된다. Rx 측에서는 활성 송신 안테나의 인덱스와 송신 심볼 S2를 결합하여 원본 데이터를 검색한다[11]. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다. $\boldsymbol{S}$는 Tx 송신 벡터를 나타내며, 이 송신 벡터는 $N_t\times 1$이다. 매 순간마다 오직 하나의 송신 안테나가 활성화되어 있으므로, $\boldsymbol{S}$에서 하나의 요소만이 활성화되어있으며,$\boldsymbol{S}=[0,0,\cdots,S,\cdots,0,0]_{N_t}^T$, 여기서 $[\bullet]^T$는 transpose operation이다. 수신측에서 수신벡터 y(t)는 $N_r\times 1$이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t)=H(t)\otimes S(t)+n(t) \tag{1}$$

여기서 $\otimes$는 convolution operation이며, $n(t)$는 $N_r\times 1$의 크기를 갖는 complex additive white Gaussian noise (AWGN) vector이며, 실수 부와 허수 부 모두 $N_0/2$와 같은 양면 파워 스펙트럼 밀도를 갖는다[10]. 그리고 $H(t)$는 $N_r\times N_t$ channel matrix이고 다음과 같다.

$$H(t)=\begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & h_{1,2}(t) & \cdots & h_{1,N_t}(t) \\ h_{2,1}(t) & h_{2,2}(t) & \cdots & h_{2,N_t}(t) \\ \vdots & \vdots & h_{q,p}(t) & \vdots \\ h_{N_r,1}(t) & h_{N_r,2}(t) & \cdots & h_{N_r,N_t}(t) \end{bmatrix} \tag{2}$$
$$p=1,\cdots,N_t,\quad q=1,\cdots,N_r$$

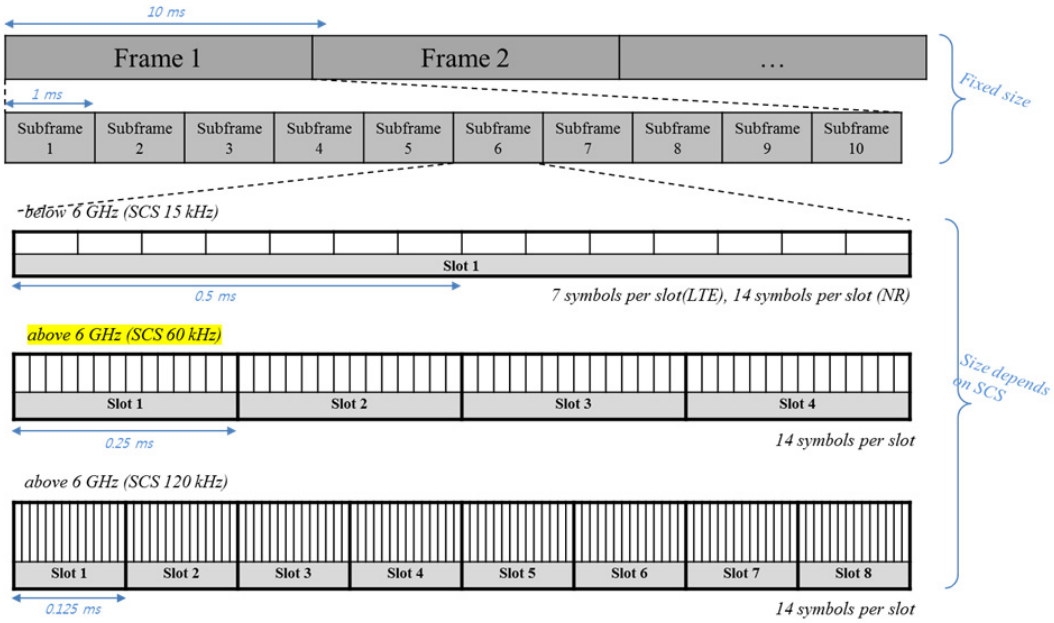

그림 3. 5G NR frame 구조
Fig. 3. 5G NR frame structure

식(2)에서 $h_{p,q}(t)$는 p번째 Tx와 q번째 Rx간의 channel impulse response이며 $h_{p,q}(t) = h_{p,q}^{LOS}(t) + h_{p,q}^{NLOS}(t)$으로 나타낼 수 있으며, 여기서 $h_{p,q}^{LOS}(t)$와 $h_{p,q}^{NLOS}(t)$는 다음과 같이 정의된다.

$$h_{p,q}^{LOS}(t) = \Omega_{p,q}\sqrt{\frac{K_{p,q}}{K_{p,q}+1}e^{-2\pi f_c \tau_{p,q}(t)}e^{j2\pi f_s(t)\cos(\alpha^{LOS}-\gamma_R)}} \tag{3}$$

$$h_{p,q}^{NLOS}(t) = \Omega_{p,q}\sqrt{\frac{1}{K_{p,q}+1}\sum_{z=1}^{Z}\frac{1}{\sqrt{Z}}e^{-\psi_z 2\pi f_c \tau_{p,q,z}(t)}e^{j2\pi f_s(t)\cos(\alpha^z-\gamma_R)}} \tag{4}$$

여기서 $\Omega_{p,q}$는 p,q번째 서브채널을 통해 전송되는 전력이며, K는 Rice factor, f_s는 Doppler shift이며 $f_s(t) = f_d\cos\theta(t)$이다. f_d는 maximum doppler frequency이며, $\cos\theta(t) = \frac{D_s/2 - vt}{D_{\min}^2 + (D_s/2 - vt)^2}$이며, vt는 이동속도이다. 위상 ψ_z는 구간 [-π, π]에 균일하게 분포되고 도착 각도 (AoA)와 독립적인 랜덤 변수이다. $\tau_{p,q}(t)$는 서브채널을 통과하는 전파의 딜레이이다. 본 논문의 시스템은 350 km/h의 이동체 속도를 가정한다. 그리고 BS와 철로의 거리는 2 m, 안테나의 셀 커버리지는 1 km를 가정한다.

2. 물리계층 구성

LTE의 경우에는 시스템의 최대 대역폭이 20MHz로 한정되어 있었다. 하지만 NR 표준에서는 5MHz부터 최대 400MHz까지 채널 대역폭을 지원하므로 주파수 대역별로 사용하는 부반송파 간격을 확장하여 적용한다. 5G NR frame의 구조는 그림 3과 같이 각 부반송파에 따라서 2의 승수로 간격이 확장되며, 이에 반비례하여서 심볼의 길이가 줄어든다. 주파수 대역/대역폭에 따라서 15kHz, 30kHz, 60kHz, 120kHz까지 확장이 되었으며, 스케줄링의 기본 단위를 슬롯으로 정의하고 한 슬롯에 OFDM 심볼의 수는 14 심볼로 제한하고 있다. 본 논문에서는 사용한 부반송파의 간격은 6GHz 이상대역에서 사용하는 60kHz를 사용하였으며, 심볼의 길이는 슬롯당 0.25ms이다.

Ⅲ. 시뮬레이션 결과 및 분석

1. 다운링크 성능분석

고속 이동상태의 5G MIMO 시스템의 성능을 분석하기 위해서 사용된 다운링크 시뮬레이션 블락도 및 파라미터는 다음 그림 4와 표1과 같다. 5G 규격에 맞게 CP-OFDM을 사용하였으며, 부 반송파의 간격은 60kHz로 설정하였으며, 채널 코드로 LDPC를 적용하였다. resource block의 수는 100개이며, carrier frequency는 28GHz이다. 이동속도는 350km/h이고 code rate은 0.8을 적용하였다. 시스템의 대역폭은 80MHz이며, 1x1의 1x1 single antenna 및 2x2 spatial multiplexing의 throughput 및 spectral efficiency 성능을 분석하였다.

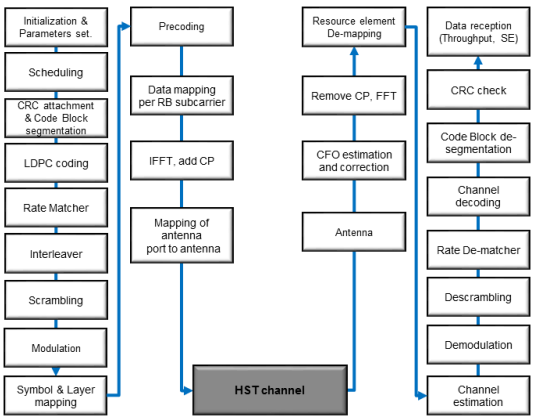

그림 4. 다운링크 시뮬레이션 블락도
Fig. 4. Downlink simulation block diagram

표 1. 다운링크 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Downlink simulation parameters

Parameters	Setting
Waveform Type	CP-OFDM
Subcarrier Spacing	60 kHz
Channel Coding	LDPC
Set number of RB	100
Channel model	HST channel
Carrier frequency	28 GHz
SNR range	0 : 10 : 30
Velocity	350 km/h
Initial distance	1000 m
BS-Railway track distance	2 m
Code rate	0.8
Modulation order	QPSK, 16QAM, 64QAM
Transmission mode	1x1 single antenna port 2x2 spatial multiplexing

그림 5는 각 변조방식에 따른 평균 throughput의 결과를 나타낸다. QPSK의 경우 최대 29Mbps, 16QAM의 경우는 56Mbps의 성능을 나타내며, 차량 속도에 따라 64QAM 변조를 사용할 수 있다고 한다면 113Mbps의 throughput에 도달 할 수 있다. 그림 6의 평균 spectral efficiency 측면에서 보면, 64QAM의 경우 최대 1.42 bps/Hz의 효율을 나타내며, 16QAM은 0.71 bps/Hz, QPSK는 0.36 bps/hz를 나타낸다. 그림에서 0dB ~ 5 dB의 낮은 SNR 영역에서 QPSK 변조를 사용하는 것이 더 좋으며 15dB 이상의 SNR에서는 64QAM의 효율이 더 높음을 확인 할 수 있다. 그림 7는 2x2 SM MIMO의 각 변조방식에 따른 평균 throughput의 결과를 나타낸다. QPSK의 경우 최대 59Mbps, 16QAM의 경우는 113Mbps의 성능을 나타내며, 64QAM는 210Mbps의 throughput에 도달 할 수 있다. 그림 8의 평균 spectral efficiency 측면에서 보면, 64QAM의 경우 최대 2.63bps/Hz의 효율을 나타내며, 16QAM은 1.42bps/Hz, QPSK는 0.74bps/hz를 나타낸다. 마찬가지로 그림에서 0dB~9dB의 낮은 SNR영역에서는 QPSK 변조를 사용하는 것이 더 좋으며 15dB 이상의 SNR에서는 64QAM의 효율이 더 높음을 확인 할 수 있다. 1x1과 비교해보면 SNR이 증가할수록 약 2배에 가까운 throughput 성능을 달성한다. 이는 안테나 사이의 독립적 인 페이딩으로부터 이득을 이용하기 위해 여러 신호를 동일한 안테나로 보내고 공간 멀티플렉싱 상이한 데이터 스트림들로 2개의 상이한 안테나들로부터 신호들을 송신함으로써 동작하며, 이는 수신기 또는 송신 안테나들의 수의 최소 배수만큼 성능을 증가시킨다.

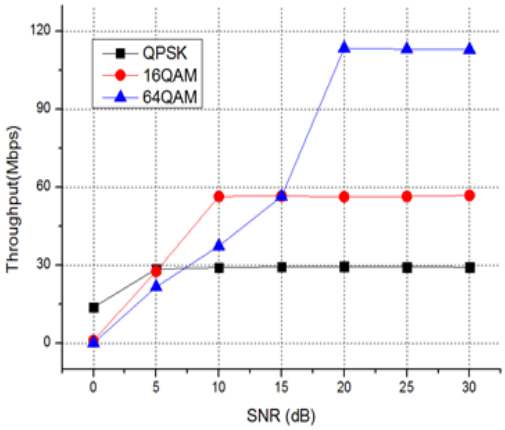

그림 5. 1x1 throughput 성능
Fig. 5. 1x1 throughput performance

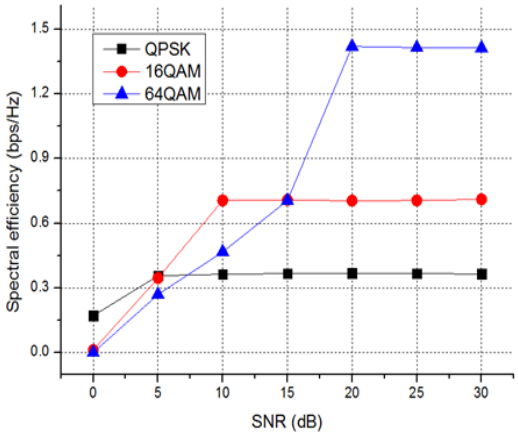

그림 6. 1x1 spectral efficiency 성능
Fig. 6. 1x1 spectral efficiency performance

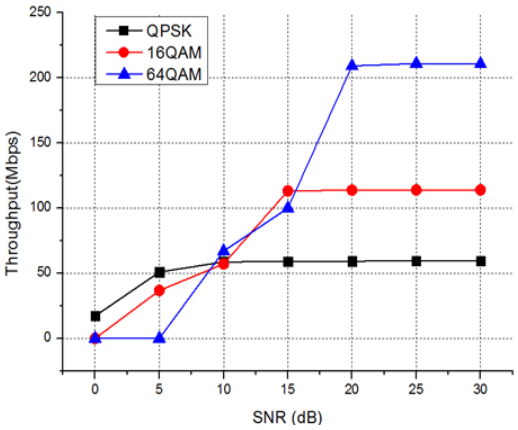

그림 7. 2x2 throughput 성능
Fig. 7. 2x2 throughput performance

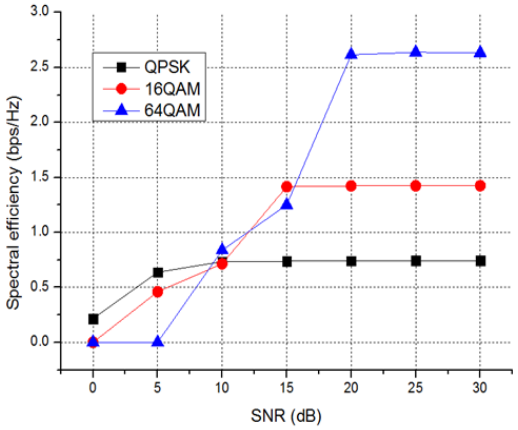

그림 8. 2x2 spectral efficiency 성능
Fig. 8. 2x2 spectral efficiency performance

Ⅳ. 결론

무선 네트워크가 3G에서 4G로 진화하기 위해 요구되는 전송 속도가 급속도로 향상되었고, 2020년 상용화를 목표로 한 새로운 5G 이동통신에 대한 논의가 국내외에 본격적으로 진행되고 있다. 5G 목표 중 하나는 기차와 같이 고속으로 이동하는 사용자에 대해 고속의 데이터 속도를 제공하는 것이다그 중, HST 시나리오가 5G의 일반적인 시나리오 중 하나로 인식 되었기 때문에 관련 5G 핵심 기술과 HST 시나리오의 해당 채널 모델링에 더 많은 관심을 기울여야한다. 본 논문에서는 mmWave대역에서 비 고정 광대역 HST 채널 모델 하에서 고속이동 시스템을 시뮬레이션 하였다. 5G 환경에 맞춰 downlink의 프레임을 설계하였으며, 1x1 및 SM을 적용하여 2x2가 고려되었다. 고속이동에 따른 throughput 성능 및 spectral efficiency 성능을 평가 하였다. 시뮬레이션 결과는 350km./h의 이동속도에서 64QAM 기준 1x1은 113Mbps와 1.42 bps/Hz의 성능을 나타냈으며, 2x2는 210Mbps와 2.63 bps/Hz의 성능을 나타냈다. 향 후, HST 상단의 광대 한 공간은 MRS 측에 대형 안테나 배열을 배치 할 가능성을 두고 수십 또는 수백 개의 안테나가 장착 된 대규모 MIMO 시스템을 고려할 필요가 있다. 앞으로는 2x2에 국한되지 않고 더 많은 안테나 시스템이 발달이 되면 더 높은 throughput을 달성할 거라 예상한다.

References

[1] RWS-120052, Report of 3GPP TSG RAN workshop on Release 12 and onwards, Ljubljana, Slovenia, June 2012.

[2] ITU-R M.1645, Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000, 2003.

[3] Huawei Technologies Co., LTD, Huawei Digital Railway Solution Brochure, 2013.

[4] Maxima Telecom, “Wi-Fi in the Wubway: The Last Chance to Get Massive Mobile Data Traffic,” Train Communications System, June 2015, London.

[5] D. Xin. (2010). Record-Breaking Train on Track. [Online]. Available: http://www.chinadaily.com.cn/china/2010-12/04/content-11651930.html

[6] D. T. Fokum and V. S. Frost, “A survey on methods for broadband Internet access on trains,” IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 12, no. 2, pp. 171 - 185, 2nd Quart., 2010.
DOI: 10.1109/SURV.2010.021110.00060

[7] C.-X. Wang, S. Wu, L. Bai, X. You, J. Wang, and C.-L. I, “Recent advances and future challenges for massive MIMO channel measurements and models,” Sci. China Inf. Sci., vol. 59, no. 2, pp. 1 - 16, Feb. 2016.
DOI: 10.1007/s11432-015-5517-1

[8] C.-X. Wang et al., “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 122 - 130, Feb. 2014.
DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736752

[9] A. Ghazal, C.-X. Wang, B. Ai, D. Yuan, and H. Haas, “A nonstationary wideband MIMO channel model for high-mobility intelligent transportation systems,” IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 16, no. 2, pp. 885 - 897, Apr. 2015.
DOI: 10.1109/TITS.2014.2345956

[10] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 57, no. 4, pp. 2228 - 2241, Jul. 2008.
DOI: 10.1109/TVT.2007.912136

[11] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, “Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis,” IEEE Commun. Lett., vol. 12, no. 8, pp. 545 - 547, Aug. 2008.
DOI: 10.1109/LCOMM.2008.080739

저자 소개

이 병 진(정회원)

• 2013년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
• 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파통신공학과 통합과정

<주관심분야 : 전파채널 모델링, 5G Massive MIMO, IR-UWB 레이더, 가시광 통신, 복합재난 모델링 기술>

주 상 임(정회원)

• 2014년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 공학사
• 2016년 2월 : 충북대학교 전파공학과 공학석사
• 2016년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파공학과 박사과정

<주관심분야 : 디지털라디오, 가시광 통신, MIMO-OFDM>

김 남 일(정회원)

• 1996년 : 충북대학교 전자공학과 공학사
• 1998년 : 충북대학교 전자공학과 공학석사
• 2009년 : 충북대학교 전자공학과 공학박사
• 1999년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 미래이동통신연구본부 책임연구원

<주관심분야 : 기지국 가상화, 4G/5G 이동통신 시스템, 무선전송방식>

김 경 석(정회원)

• 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
• 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
• 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원
• 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사
• 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 정교수

<주관심분야 : 5G Massive-MIMO, 전파채널모델링, 복합 재난 모델링 기술, 위성보안망분석, Cognitive Radio, 전력선통신, 가시광통신, 디지털라디오, 전파감시/관리시스템>

※ 본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2016-0-00183, 컴퓨팅이 융합된 가상화 기반 5G 이동통신 액세스 플랫폼 기술 개발)