

## 5G K-TestBench: 하드웨어 기반 5G 테스트벤치 연구

송훈근\*, 이현우\*

## 5G K-TestBench: A Study on the Hardware Based 5G Test Bench

Hoon-Geun Song\*, Hyeon-Woo Lee\*

요약

본 논문은 산업간 융합을 목표로 하는 5G 이동통신에 대한 하드웨어 기반 간이형 5G 테스트벤치 구현을 소개한다. 테스트벤치 구성을 위해 먼저 28GHz 대역 신호를 생성하기 위한 주파수 변환기를 설명한다. 개발된 주파수 변환기는 6GHz 이하에서 만들어진 5G IF 신호를 28GHz RF 신호로 변경하고 다시 28GHz RF 신호를 3GHz 대역 IF신호로 변경하는 기능을 제공한다. 개발된 주파수 변환기는 1 GHz 대역폭 범위에서 2 dB 이내의 주파수 평탄도를 제공한다. 시험 결과는 5G 1GHz 신호를 사용하여 검증하였다. 또한, NI(National Instrument)에서 제공하는 기저대역 시뮬레이터를 사용하여 New Radio(NR) 신호를 개발된 주파수 변화기와 연동하였다. 전체 구성은 3GHz 이하로 생성된 NR 신호를 28GHz RF 신호로 변경하여 혼안테나를 통해 송신하고 수신 혼안테나를 통해 전달된 28GHz RF신호를 다시 3GHz 이하로 변환하여 하드웨어 테스트 벤치의 구성을 검증하였다.

**Key Words** : 5G, Test Bench, mmWave, Up converter, Down convert, mmWave Fader

## ABSTRACT

This paper introduces a 5G mobile communication test bench implementation aimed at inter-industry convergence. For the hardware based 5G test bench configuration, we first describe the development of a frequency up and down converter for generating 28GHz RF signal. The developed frequency up and down converter provides a function to convert a 5G IF signal made at 6GHz or lower to a 28GHz RF signal and again convert a 28GHz RF signal to a 3GHz band IF signal. The developed frequency up and down converter provides frequency flatness within 2 dB in the 1 GHz frequency span. The test results were verified using a 5G 1GHz signal. In addition, using the baseband simulator provided by NI (National Instrument), the NR signal was interlinked with the developed frequency up and down converter. Using the hardware based 5G test bench, the NR signal generated at 3GHz or less is converted into a 28GHz RF signal, transmitted through the horn antenna, and the 28GHz RF signal transmitted through the receive horn antenna is converted back to 3GHz or less respectively.

※ 본 연구는 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 ‘범부처 Giga KOREA 사업’의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. GK18S0400, 개방형 5G 표준 모델 개발)

♣ First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-8982-8135)Korea Testing Laboratory, hgsong@ktl.re.kr, 정희원

\* College of SW Convergence, Dankook Univ. Korea, woojaa@dankook.ac.kr, 종신희원

논문번호 : 201807-D-197-RN, Received July 3, 2018; Revised January 3, 2019; Accepted February 11, 2019

## I. 서 론

이동통신용 무선통신 시험 규격을 만드는 3GPP RAN WG4에서는 5G 단말 시험방법을 Study Item<sup>[1]</sup>으로 논의하고 있으며, 밀리미터(mmWave)대역을 사용하는 단말은 OTA(Over The Air) 형태의 원거리장(Far-Field) 조건에서 시험하기로 결정하였다<sup>[2]</sup>. 또한 밀리미터를 지원하는 모든 단말들의 측정 정확도를 보장하기 위해서 Test Interface(TI)를 도입하기로 결정하였으며, 그 중에서 빔포밍(Beamforming) 특성으로 정확하게 측정하기 위해서 Beam Lock Function(BLF)을 필수적으로 지원하기로 결정되었다<sup>[3]</sup>. 단말 측정을 위해서 가장 먼저 단말 빔포밍 안테나와 기지국 시스템 시뮬레이터(System Simulator; SS)의 안테나 사이에 OTA 형태로 연결되어야 한다. 하지만 단말 빔포밍 안테나 구현 특성으로 고정된 빔포밍 방향이 유지되지 않고 조금씩 흔들리는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제는 BLF 기능을 사용하여 해결 가능하다. 물론 이러한 기능은 RRC(Radio Resource Connection)이 성립된 상태에서 제공되며, TI를 통해서 송신특성과 수신특성을 보다 단순한 시험시설로 시험할 수 있다.

원거리장 측정 거리는 단말의 어레이안테나(Array Antenna)크기의 제곱에 비례하고, 파장에 반비례한다. 따라서 원거리장 측정 거리는 단말의 어레이안테나 크기에 따라 변하게 되며 단말의 어레이 안테나 크기를 모를 경우에는 단말 전체 크기의 가장 긴 거리를 어레이 안테나 크기로 고려하여 원거리장 측정 거리를 확보해야 한다. 원거리장 측정거가 너무 클 경우에 측정환경을 구성할 수 없는 문제가 발생하여 3GPP RAN WG4에서는 화이트박스(White Box)방법을 논의하였다<sup>[4]</sup>. 화이트박스 방법은 단말에서 어레이안테나의 위치와 크기를 정확하게 정의한 후에 OTA 측정 환경에서 측정정확도가 보장되는 단말 거치 공간인(Quiet Zone)의 중심에 단말의 어레이 안테나 중심을 위치시켜 단말전체 크기를 사용한 원거리장 측정 거리보다 가까운 원거리장 측정거리를 사용할 수 있다. 이러한 화이트박스 방식을 사용하여 각국의 강제성 인증 시험들은 상대적으로 작은 크기의 원거리장을 측정 거리를 사용하여 무방향실(Fully Anechoic Chamber)에서 측정가능하다. 반대로 단말의 어레이 안테나 위치와 크기를 모르는 경우에 전체 단말 크기를 사용한 원거리장 측정 거리를 사용하게 되면, 공간 손실이 증가하게 되어 측정시스템의 안테나 시스템에서 측정하고자 하는 신호가 열잡음보다 작아지거나,

측정 시스템의 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio)보다 작아지는 경우가 발생할 수 있다. 화이트박스 방법을 사용하는 경우에도 어레이 안테나 크기가 클 경우에 원거리장 측정거리가 수 미터에 달하는 경우에는 다이내믹영역(Dynamic Range)이 넓은 전력증폭기(Power Amplifier)를 고려하거나 대체방법을 사용해야 한다.

3GPP RAN WG4 회의에서 5세대 이동통신 시스템의 복잡도와 대용량 데이터전송을 고려하여 캐리어 어그리게이션(Carrier Aggregation)없이 단일 캐리어 성분(Carrier Component)으로 단말의 최대 채널대역폭은 400 MHz로 정해졌다. 개발된 5G 테스트 벤치는 화이트박스 방식으로 6GHz 이하를 지원하는 기존 시험장비들을 사용하여 구성할 수 있는 높은 비용 효율성을 제공한다. 기존 장비들을 사용하기 위해서 3GPP RAN WG4에서 정한 1GHz 채널대역폭을 지원하는 주파수 변환기를 개발하였다. 5세대 밀리미터 대역을 사용하는 단말의 RF 구성은 일반적으로 중간주파수(Intermediate Frequency: IF) 단계와 RF(Radio Frequency)단계로 나누어 구성된다.<sup>[5]</sup> 기존 LTE(Long Term Evolution)에서 사용한 직접변환수신기(Direct Conversion)를 사용하지 않고 중간주파수를 사용하는 이유는 밀리미터대역이 가지는 높은 주파수로 인해서 믹서(mixer), 필터(filter), 대역필터(band pass filter)의 성능한계를 가지는 구현성 때문이다. 보통 중간주파수를 사용하여 기저대역 신호를 생성하고 여기에 2채배된 국부발진기(Local Oscillator)와 믹서를 통해 RF 신호인 밀리미터 신호를 생성하게 된다. 믹서 출력은 원하는 밀리미터 신호뿐만 아니라 원하지 않는 이미지신호들이 동시에 발생되게 된다. 사용하고자 하는 밀리미터 대역 바깥으로 발생하는 이미지 신호들 대부분은 대역필터로 제거가 가능하다. 따라서 밀리미터 대역인 1GHz 대역폭 내에 발생하게 되는 대역내 이미지 성분(in-band carrier leakage)들에 대한 제거 능력과 광대역인 1GHz 대역폭에서 밀리미터 대역 평탄도(Flatness or Wide-Band-Width of impairment)가 주파수 변환기의 중요한 성능이다.

개발된 주파수 변환기를 사용할 경우에, 고비용의 신호 생성기 및 신호분석기를 대체할 수 있으며, 산업계에서 기존에 구비된 6GHz 이하의 신호생성기와 연동하여 효율적으로 간이형 5G 테스트 벤치를 구성할 수 있다. 본 논문에서는 5세대 밀리미터 이동통신 시스템에서 OTA 형태로 RF 특성을 연구하기 위한 주파수 변환기와 NI USRP<sup>[6]</sup>가 제공하는 기저대역 시스

템과 연동하여 가장 간단한 형태의 하드웨어기반 5G 테스트벤치 시스템을 소개한다.

## II. 본 론

개발된 28GHz 주파수 변환기의 시스템 블록도는 그림 1과 같으며, 2채배기와 광대역 RF 믹서(RF Mixer)를 사용하는 구조이다. 국부발진기에서 12.5GHz 신호를 2채하여 25 GHz 신호를 생성한다. 이렇게 생성된 신호와 중간주파수에서 생성된 5세대 변조신호 믹서에 입력하여 밀리미터 신호를 생성한다. 업컨버터(Up Converter)와 다운컨버터(Down Converter)에서 2채배된 25 GHz를 사용하며, 중간 주파수는 3GHz를 사용한다. 업컨버터 출력은 원하는 밀리미터 출력인 28GHz와 이미지 출력인 22GHz가 생성되고, 다운컨버터는 28GHz 밀리미터 신호를 3GHz 중간주파수신호로 변환한다. 업컨버터 출력에 나타나는 28GHz(+) 신호와 22 GHz RF(-) 신호는 대역필터(Band Pass Filter)를 사용하여 제거한다.(그림 1) 마찬가지로 다운컨버터는 밀리미터 신호와 25GHz 국부발진신호 그리고 믹서에 의해 발생된 원하지 않는 신호를 제거하기 위해 대역필터를 사용한다.

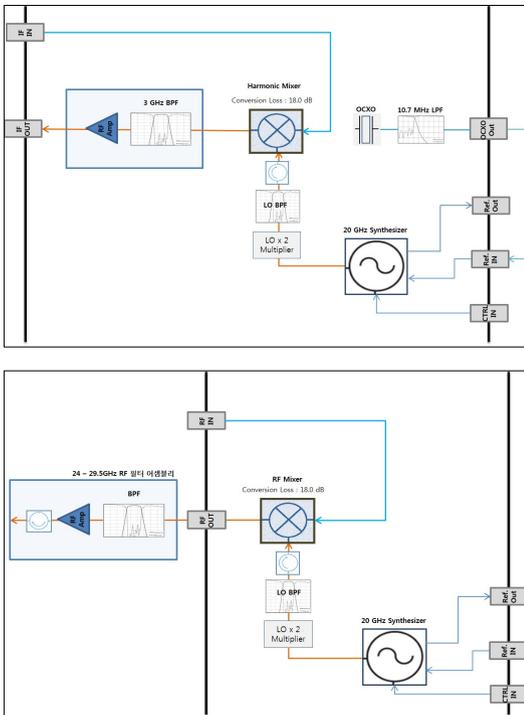


그림 1. 주파수 변환기 구성도  
Fig. 1. Up Converter and Down Converter block diagram

그림. 2는 기저대역 주파수인 3 GHz에서 대역폭 1GHz 5G 신호를 28GHz 밀리미터신호로 변환한 업컨버터출력이며, 밀리미터 대역 평탄도는 1.79 dB를 가진다. 밀리미터 대역 평탄도 기저대역 주파수와 국부발진기를 조정하여 보다 낮은 주파수 평탄도 값을 찾을 수 있다. 그림. 3은 다운컨버터 출력으로, 기저대역신호를 관찰하면 3GHz에서 평탄도가 2.03dB인 반면에, 2.98 GHz에서 0.47dB로 보다 좋은 평탄도가 관찰된다. 업컨버터와 다운컨버터에서 모두 국부발진기를 조정하여 최적의 주파수 평탄도를 찾을 수 있다. 그림. 2.에서 살펴본 것과 같이 원하지 않는 이미지 출력들과 주파수 평탄도는 국부발진기와 하모닉 믹서에 의해 그 성능이 결정된다.

복조기성능에 영향을 주는 오류벡터크기(Error Vector Magnitude)는 국부발진기와 믹서에 의해 발생하는 위상잡음(Phase Noise)에 민감하다. 믹서의 위상잡음은 제어할 수 없기 때문에, 국부발진기의 위상잡음을 정밀하게 조정하여 복조기 성능을 열화시키지 않게 하여야 한다. 따라서 국부발진기 선택에 있어서 위상잡음을 보다 엄격하게 적용하여 선택하여야 한다. 현재까지 모든 이동통신 시스템에서 국부 발진기에서

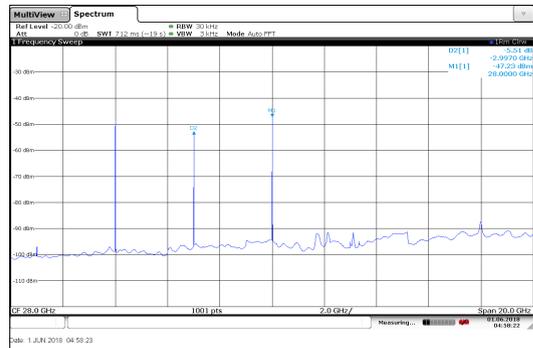
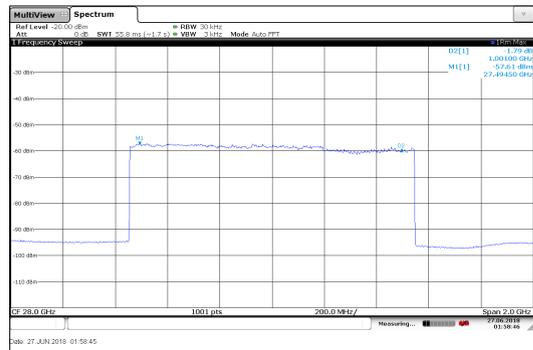


그림 2. 28GHz, 1GHz 대역폭 주파수 평탄도와 불요방사  
Fig. 2. RF Flatness over 1 GHz and the Unwanted Emission and 28GHz RF Signal (1GHz)

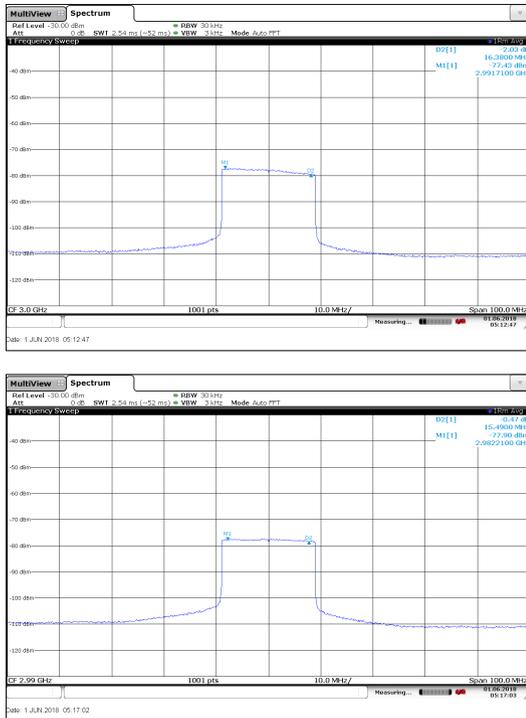


그림 3. 3GHz와 2.98GHz IF 신호에서 주파수 평탄도  
Fig. 3. IF Signal at 3GHz and 2.98 GHz(100MHz)

만들어진 캐리어 주파수 이동은 주파수 영역에서 위상잡음으로 나타나게 된다. 이 위상잡음의 크기를 통해서 해당 시스템의 안정도를 측정할 수 있다. 보통 주파수 영역에서 dBc/Hz 로 표시하며, 해당 위상잡음이 시스템 성능에 직접적으로 영향을 주게 된다. 보통 각 모듈레이션 별로 위상 잡음에 대한 허용치를 제한하고 있으며 높은 변조방식에서 보다 작은 허용치를 허용한다. 다르게 말해서 높은 데이터 전송률을 선택하는 경우에 보다 작은 위상잡음을 허용한다.

사용된 국부발진기의 위상잡음 및 제원은 표 1. 과 같다. 더불어, 국부발진기 출력에 대역필터(Band Pass Filter)를 사용하여 국부발진기 자체에서 발생하는 하모닉성분을 제거하였다.

그림 4.는 엷다운 컨버터를 고려한 테스트 벤치 개념도이다. 기저대역(Baseband)는 현재 NI USRP<sup>[5]</sup> 시스템을 가정하여 구성하였다. 현재 송신 및 수신에 대한 독립적인 구성으로 고려하고 있으며, 28GHz 대역에서 물리적 특성을 파악 할 수 있는 구성을 고려하고 있다.

송신단 업컨버터출력에 전력증폭기(Power Amplifier)를 사용하여 공간손실을 극복할 수 있도록

표 1. 국부 신호합성기 규격  
Table 1. Local Synthesizer Specification

Parameter	Value	Units
Phase Noise	-60	dBc/Hz, @ 100 Hz from 10 GHz
	-102	dBc/Hz, @ 1 kHz from 10 GHz
	-115	dBc/Hz, @ 10 kHz from 10 GHz
	-115	dBc/Hz, @ 100 kHz from 10 GHz
	-115	dBc/Hz, @ 1 MHz from 10 GHz
	-133	dBc/Hz, @ 10 MHz from 10 GHz
Resolution	0.001	Hz
Output RF Range	up to 13	dBm

설계하였으며, 해당 전력 증폭기는 12 GHz에서 30GHz를 지원하는 광대역 전력증폭기를 채택하였다. 해당 광대역 전력 증폭기의 이득은 32 dB이고 P1dB(1dB Gain Compression Point)는 23 dBm 그리고 잡음지수(Noise Figure)는 2 dB를 가진다. 먼저 5G 변조신호는 3 GHz 미만 주파수에서 대역폭 400MHz 안쪽으로 생성한다. 그리고 PAPR(Peak to average power ratio)을 감안하여 기저대역 출력 전력을 1 dBm 으로 설정한다. 송신 RF 케이블 손실 (Cable Loss) 및 업컨버전 손실을 고려하여 혼안테나 (Horn Antenna) 입력에 10 dBm 신호를 인가할 수 있도록 한다. 5G 규격에서 28GHz의 공간 손실을 극복하기 위해서 어레이 안테나에 의한 빔포밍 기술이 사용된다. 본 논문에서 제안한 테스트 벤치는 어려가 없는 이상적인 빔포밍을 가정하여 설계되었기 때문에 혼안테나를 사용하였다. 현재 구성은 기저대역 출력전력이 1 dBm이지만 실질적인 테스트벤치 구성에서 추가적인 손실을 고려하여 기저대역 출력은 제어 가능해야 한다. 현재 NI USRP<sup>[5]</sup> 시스템은 최대 출력 20

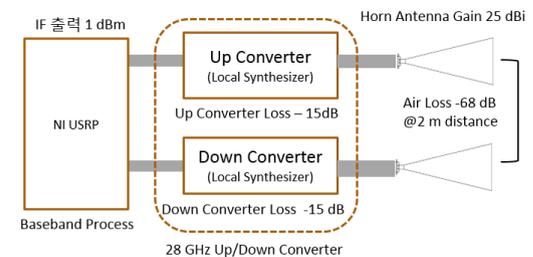


그림 4. 기저대역과 주파수변환기를 사용하는 개념도  
Fig. 4. A conceptual block diagram between the NI baseband equipment and Up/Down Converter

dBm을 지원한다. 혼안테나는 25 dBi 이득을 가지고 있으며, 30 GHz 그리고 2m 거리에서 FSPL(Free Space Path Loss)는 68 dB이다. 다운컨버팅 손실은 &#8211;15dB이며, 수신 케이블 손실은 송신 케이블 손실과 같은 8 dB 손실을 고려한다. 전체적인 송신부분과 수신부분의 RF 경로 손실 값은 표 2에 정리하였다.

현재 30GHz 대역에서 2m 길이의 케이블 손실은 -8dB를 사용하였지만, 실질적으로 30GHz 대역으로 RF 케이블이 연결되는 부분은 업 컨버터 출력에서 혼안테나 연결부분 그리고 마찬가지로 수신 다운 컨버터 입력에서 혼안테나 연결부분이다. 기저 주파수 대역(4GHz 이하) 에서 손실은 작고, 업/다운 컨버터와 혼안테나 간 연결되는 RF 케이블의 길이를 2m에서 1m로 구성할 경우, -3dB로 줄어 들게 된다. 물론 기저 대역에 사용되는 RF 케이블 손실을 -2dB로 고려하면, RF 케이블 손실은 -5 dB로 송수신단에서 각각 3 dB씩 추가 여유를 확보할 수 있다. NI USRP<sup>[5]</sup>에서 제공하는 Analogue-to-digital Converter(ADC)는 14 bits이며 Spurious-free dynamic range(sFDR)이 88dB로 수미터 거리에서 충분한 수신 성능을 보장한다. 추가 전력증폭기[RFLUPA27G34GB, RF-LAMBDA]를 사용할 경우 실외 환경 100m 거리까지 가능한 테스트 벤치를 구성할 수 있다.

그림 5. 는 업/다운 컨버터와 NI USRP<sup>[5]</sup> 시스템을 사용한 테스트 벤치 구현을 나타낸다. 그림 4.에서 나타난 바와 같이, NI USRP에 5G 물리계층을 구현하고 혼안테나와 28 GHz 업/다운 컨버터와 연동하여

표 2. RF 경로 손실 계산  
Table 2. RF Path Loss Calculation

	Measure Point	Value	Unit
TX	IF output	1	dBm
	Up Converter Loss	-15	dB
	TX RF Cable Loss	-8	dB
	Amplifier Gain	32	dB
	Amplifier Output	10	dBm
Air Loss	Horn Antenna Gain	25	dBi
	2 m distance	-68	dB
RX	Horn Antenna Gain	25	dBi
	RX RF Cable Loss	-8	dB
	Down Converter Loss	-15	dB
	IF input power	-31	dBm
	sFDR	88	dB

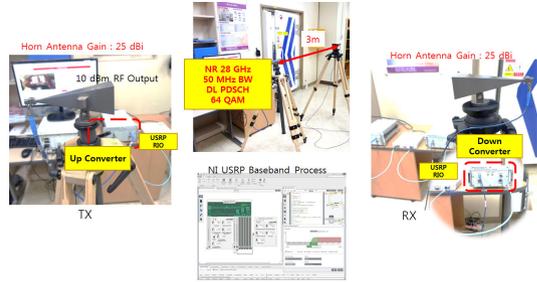


그림 5. NI USRP 기저대역과 주파수변환기를 사용한 28GHz Test Bench 구현  
Fig. 5. Utilizing NI USRP platform to build 5G Test Bench with external Up/Down Converter for 28 GHz

5G 28 GHz 밀리미터 신호를 생성한다. 현재 송신 부분 구성은 50MHz 대역폭에서 64QAM을 3GHz로 기저대역에서 생성하고, 주파수 변환기를 사용하여 28GHz로 변환하여 혼안테나로 전송한다. 약 3m 거리에서 수신 혼안테나로 수신하고 주파수 변환기로 3GHz 기저대역 신호로 변경한 후에 NI USRP<sup>[5]</sup>를 사용하여 데이터 신호를 복조하였다.

### III. 계 획

5G K-Simulator과제는 (<http://5gopenplatform.org>) 5G Link Simulator, System Simulator, Network Simulator 그리고 Application Layer를 포함한 소프트웨어로 그리고 5G K-Test Bench는 NI USRP와 주파수 변환기로 개발되고 있다. 본 논문에서 구현한 5G 하드웨어 테스트 벤치와 인터페이스 툴을 통해 5G K-Simulator<sup>[7,8]</sup>와 연결되어 실제 실내의 채널 환경을 반영할 예정이며 이를 통해 수신 알고리즘 검증 및 연구에 활용될 예정이다. 또한 NI USRP가 가지고 있는 GPS 기능을 활용하여 실외환경에서 반사, 투과, 회절 등 실내외 환경의 전파 전달 특성을 도출이 가능하다. 개발된 5G K-Test Bench에서 고속도플러 효과(doppler-like)를 생성하여 향후 5G K-Simulator와 연

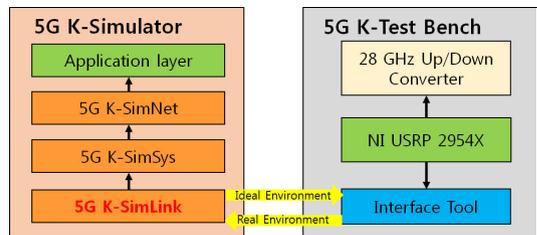


그림 6. 5G K-Simulator와 5G K-Test Bench간 상호검증  
Fig. 6. Mutual Verification between 5G K-Simulator and 5G K-Test Bench



그림 7. 5G K-Test Bench를 위한 밀리미터 웨이브 페이더  
Fig. 7. mmWave Fader for 5G K-Test Bench

동하여 고속환경에서 성능연구를 진행할 예정이다. 고속도플러 환경을 생성하기 위한 간단한 개념도는 그림 7이며, 그림 8에서 위쪽은 3GHz에서 임펄스 (Impulse Signal) 신호이며 그림 8에서 아래쪽은 그림 7에 소개한 회전하는 팬을 통해 전달받은 신호이다. 그림 8에서 전달받은 신호들중 첫 번째 이동된 신호는 팬회전에 의해 약 17Hz 만큼 주파수 이동이 관찰되었다. 모터의 속도와 팬모양을 변경하여 다양한 주파수이동을 생성할 수 있다. 이와 별도로, 산업계에서는 본 논문에서 제안한 구조의 주파수 변환기를 기존 신호생성기 혹은 신호분석기와 연동함으로써 효율적인 성능시험 및 검증에 활용할 수 있다.

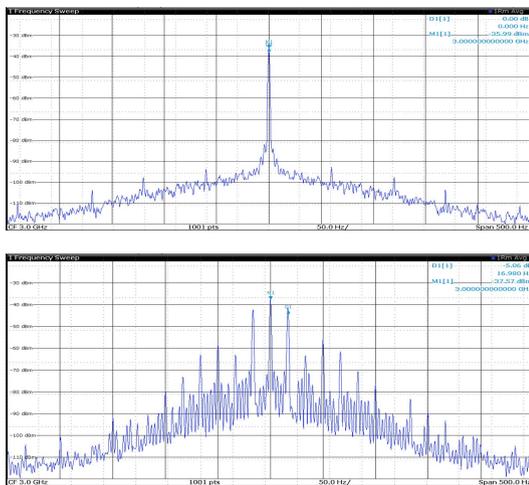


그림 8. 예, 5G K-Test Bench용 mmWave Fader  
Fig. 8. An example, mmWave Fader for 5G K-Test Bench

#### IV. 결론

본 논문에서 하드웨어 기반 5G 테스트벤치를 소개하였다. 6GHz 이하를 지원하는 일반적인 NI USRP 장비에 28GHz 주파수변환기를 연동하여 최소한의 기

본 5G 테스트벤치를 구성하고 검증하였다. 해당 테스트벤치는 향후 5G K-Simulator와 연동하여 실제 채널 환경과 RF 소자 특성을 고려한 연구 및 개발에 활용될 예정이다. NI USRP에서 제공하는 GPS신호를 활용하고 추가로 고출력 전력증폭기를 사용하면 약 100m에서 5G 테스트벤치를 활용할 수 있다. 또한 개발된 주파수 변환기는 독립적으로 산업계 생산시설에서 필요한 양산 검증에 효율적으로 적용하여 경제적 효율성을 제공할 수 있다.

#### References

- [1] 3GPP TR 38.810 v2.2.0, 3rd Generation Partnership Project; *Technical Specification Group Radio Access Network; Study on test methods for New Radio*; (Release 15), Jun. 2018.
- [2] 3GPP TR 38.803 v1.1.0, 3rd Generation Partnership Project, “*RF and co-existence aspects.*”
- [3] R4-1712665, “*Enhanced UE beamlock definition,*” 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting 85, Reno, Nevada, 27 Nov #8211; 1 Dec. 2017.
- [4] R4-1708200, “*Black Box vs White Box Testing for NR,*” 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting 84, Berlin, Germany, 21 Aug. #8211; 25 Aug. 2017.
- [5] National Instruments, “*Getting Started Guide, NI USRP-2950R/2952R/2953R/2954R,*” 37635 5B-01, Apr. 2016.
- [6] R4-1810979, “*FR2 Spurious emissions,*” 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting 88, Gothenburg, Sweden, 20 Aug. #8211; 24 Aug. 2018.
- [7] S. Cho, S. Chae, M. Rim, and C. G. Kang, “*System level simulation for 5G cellular communication systems,*” 2017 ICUFN, pp. 296-299, Jul. 2017.
- [8] Y. Kim, S. Han, C. Chu, J. Bae, D. Kim, J. Lim, E. Park, J. Baek, and Y. Han, “*Open 5G-K simulators and unified platform,*” *KICS Winter Conf.*, pp. 350-351, Nov. 2018.

송 훈 근 (Hoon-Geun Song)



1998년 2월 : 한양대학교 공학  
사  
2000년 2월 : 한양대학교 공학  
석사  
2000년~2002년 : LG전자  
2002년~2006년 : 삼성전자 통신  
연구소 책임연구원  
2006년 3월~현재 : 한국산업기

술시험원 책임연구원

<관심분야> 이동통신 국제표준, 3G/4G/5G

이 현 우 (Hyeon-Woo Lee)



1985년 2월 : 서울대학교 공학  
사  
1989년 8월 : 서강대학교 MBA  
1994년 3월 : KAIST 공학석사  
2003년 8월 : KAIST 공학박사  
1984년 12월~2009년 2월 : 삼  
성전자 통신연구소 수석연구원

2009년 3월~2013년 2월 : 지식경제부 차세대 이동통  
신 PD, 한국산업기술평가관리원

2013년 3월~12월 : 전자부품연구원 전문위원

2013년 5월~현재 : 단국대학교 국제대학 모바일시스  
템 공학 부교수

2008년 3월~현재 : TTA 5 STC 의장

2013년 5월~현재 : 5G Forum 대외협력위원장

<관심분야> 이동통신 국제표준, 3G/4G/5G, 정보통  
신기술 전략 및 정책