

초고밀도 네트워크를 위한 SDR 테스트베드 개발

강 동 수*, 최 계 원^o

Development of SDR Testbed for Ultra-Dense Networks

Dong Soo Kang*, Kae Won Choi^o

요 약

초고밀도 네트워크(UDN: ultra-dense network)는 매우 높은 밀도로 배치 된 복수의 기지국 간의 협력 통신을 통해 동일한 스펙트럼을 이용해 정보를 동시에 다수의 단말기로 송신 및 수신함으로써 단위 면적당 스펙트럼 효율을 최대화 할 수 있는 차세대 통신 기술이다. 본 논문에서는 초고밀도 환경에서의 UDN 구조의 스펙트럼 효율 향상과 UDN 코어 기술 검증을 위하여 소프트웨어 정의 라디오(SDR: software-defined radio) 플랫폼 기반으로 920 Mhz상에서 UDN 테스트베드를 설계 하였다. UDN 핵심 기술 검증을 위한 SDR 플랫폼은 1) 핵심 기술을 구현하는 소프트웨어 구조, 2) 무선 신호를 송수신 할 수 있는 하드웨어 구조, 3) 핵심 기술의 성능을 모니터링 할 수 있는 구조를 포함한다. 하드웨어 및 소프트웨어 플랫폼으로 각각 USRP 및 NI LabVIEW NXG 2.1v를 사용하였다. UDN의 다양한 기능을 LabVIEW의 함수 구조에 해당하는 virtual instrument (VI)로 구현하였다. 또한 단말 간의 간섭을 없애기 위해서 ZF(zero-forcing) 프리코딩을 사용하였다. 해당 프리코딩 매트릭스를 구하기 위해서 SVD(singular vector decomposition) 개념을 적용하여 타 단말에게 간섭을 미치지 않는 영공간(null space)를 계산하였다. LabVIEW 코드의 최상층 VI인 Simulator.vi에서 다양한 파라미터(modulation order, transmit power, basis vector size) 등을 수정할 수 있으며, 각 수신단의 비트에러율(BER: bit error rate), 신호 대 잡음 비(SNR: signal-to-noise), 채널 이득(channel gain) 및 신호 성상도(signal constellation) 등을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 실험을 통해 해당 요소들의 변화에 따른 결과 값들을 측정하여 확인하였다.

Key Words : UDN(ultra-dense network), SDR(software-defined radio), LabVIEW, Precoding

ABSTRACT

The ultra-dense network (UDN) is a next generation communication technology that can maximize spectral efficiency per unit area by simultaneously transmitting and receiving information through the same spectrum to multiple terminals through cooperative communication between a plurality of base stations arranged at very high density. In this paper, we design UDN test bed on 920 Mhz based on software defined radio (SDR) platform to improve spectral efficiency of UDN structure in ultra-high density environment and verify UDN core technology. The SDR platform for validating UDN core technologies includes: 1) a software structure that implements core technologies, 2) a hardware structure capable of transmitting and receiving wireless signals, and 3) a structure capable of monitoring the performance of core technologies. USRPs and NI LabVIEW NXG 2.1v are used as the

※ 이 논문의 일부는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행되었으며 (No.2018-0-01410, 고밀집 네트워크(UDN) 환경에서 고용량, 저비용 달성을 위한 무선전송 기술 개발) 일부는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (NRF-2017R1A2B4010285, 대규모 안테나 어레이 기반의 초저전력 셀룰러 IoT 네트워크 연구).

* First Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, ds.kang@skku.edu, 학생회원

^o Corresponding Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, kaewonchoi@skku.edu, 종신회원

논문번호 : 201902-471-D-RN, Received February 20, 2019; Revised April 1, 2019; Accepted April 23, 2019

hardware and software platforms, respectively. We have implemented various functionalities of the UDN by using the virtual instruments (VIs), which refer to functions in a LabVIEW software structure. The zero-forcing precoding is used to eliminate interference between terminals. The singular value decomposition (SVD) concept is applied to find out the null space that does not interfere with other terminals. We can modify the parameters such as modulation order, transmit power, and basis vector size, etc. in the top-level VI of the LabVIEW code and check the performance metrics such as bit-error rate (BER), signal-to-noise ratio (SNR), channel gain, and signal constellation of each receiver. We have conducted experiments that measure these performance metrics according to various parameters.

I. 서론

이동 통신에서는 하나의 주파수 대역에 다수의 사용자를 수용하기 위해 다중접속 기술을 사용한다. 그러나, 다중 접속을 사용하더라도 일정량 이상의 사용자가 동시에 접속하면 채널 포화가 일어나 정상적인 서비스가 어려워진다. 이동 통신에서는 제한된 주파수를 보다 효율적으로 사용하기 위하여 셀룰러 시스템을 사용하여 서비스를 제공하고 있다. 그러나 하나의 셀이 감당할 수 있는 최대 통화량이 정해져 있으므로, 최근 증가하는 무선 트래픽 수요의 문제를 극복하기 위한 해결 방안으로 5G/B5G 셀룰러 네트워크가 통신 업계 및 학계에서 주요 연구 주제로 대두되고 있다. 본 논문에서는 차세대 셀룰러 네트워크 기술 중 초고 밀도 네트워크(UDN: ultra-dense network)의 구현과 실험에 대해 다룬다.

UDN은 기지국이 매우 밀집하여 분포하는 구조를 가지고 있어 터미널과 기지국 사이의 거리가 짧아 낮은 전력 감쇄 및 짧은 전송 지연 경로를 통해 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있는 네트워크 구조이다. 본 논문에서는 소프트웨어 정의 라디오(SDR: software-defined radio)를 활용하여 최종적으로 UDN을 실현하기 위해 일차적으로 분산 안테나를 사용하여 테스트베드를 제작하고 성능을 검증한다. SDR은 하드웨어로 신호처리 등의 구성을 하는 전통적인 방식 대신에 컴퓨터 또는 임베디드 시스템의 소프트웨어를 통해 구현되는 무선 통신 시스템이다. 본 논문에서는 USRP(universal software radio peripheral)와 NI LabVIEW NXG를 UDN 테스트베드 구현을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 플랫폼으로 사용하였다.

구현 SDR 테스트베드에는 동기화(synchronization), 채널 추정(channel estimation), MU-MIMO (multi-user multiple-input multiple-output) 등의 기능적 모듈이 적용되었다. 이 중 시간/주파수 동기화를 위해 하드웨어에서는 클락 분배기

(Octoclock)를 사용하여 각 USRP에 동일 클락을 분배하였으며 소프트웨어에서는 Schmidl & Cox 알고리즘을 사용하였다. 채널 추정을 위해 참조 심볼(reference symbol)을 포함시켰으며 ML(maximum likelihood) 기법으로 OFDM 채널을 추정하였다. MU-MIMO에서는 안테나 간의 간섭을 없애기 위해 ZF 프리코딩(zero-forcing precoding) 기법을 사용하였다.

본 테스트베드를 사용하여 실험을 진행하였으며 1) 각 수신 안테나의 신호 성장도, 2) 수신 안테나들의 위치 변화에 따른 SNR의 변화, 3) 기저벡터 수 변화에 따른 SNR 변화, 4) 전송전력의 변화에 따른 안테나들의 SNR 변화 등의 결과를 도출하였다. 동영상에 본 UDN 테스트베드를 활용한 실험 영상을 게시하였다¹⁾.

II. SDR 플랫폼에 기반한 UDN 구현 기술 배경

2.1 동기화(synchronization)

다운링크 신호의 경우 기지국으로부터 전송된 신호를 수신하였을 때 시간 및 주파수 동기화를 맞추어야 한다. 본 논문의 테스트베드에서는 그림 1에 제시된 프레임 구조에서 가장 앞부분에 동기 심볼(synchronization symbol)을 넣어 수신단에서 이를 해석함으로써 시간 및 주파수 동기화를 가능하게 하는 Schmidl & Cox 알고리즘을 사용한다.

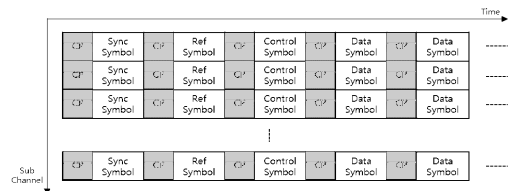


그림 1. 프레임 구조
Fig. 1. Frame Architecture

2.2 채널 측정(channel estimation)

무선 채널에서는 주파수에 따른 딜레이가 시간에 따라 지속적으로 변하기 때문에 광대역 이동 통신 시스템에서 OFDM 신호의 복조(demodulation)를 수행하기 전, 각각의 서브캐리어(subcarrier)의 채널 이득에 대한 동적인 측정이 필요하다^[2]. 그림 1과 같이 채널 측정을 위해 지속적으로 OFDM 심볼의 모든 서브캐리어에 대해 참조 심볼을 삽입하였다. 수신단에서는 참조 심볼을 이용하여 ML 기법으로 전체 서브캐리어의 채널을 추정한다. 추정된 채널 이득은 수신단에서 데이터 심볼을 보정하는데 사용되며 MU-MIMO 프리코딩에도 사용된다.

2.3 MU-MIMO

UDN 환경에서는 각각의 단말이 주변에 배치된 다수의 안테나로부터 신호를 수신한다. 공간적으로 흩어진 다수의 안테나를 활용하여 여러 단말을 동시에 지원해야 하며 이 때 각 단말로 전송되는 신호 사이에 간섭을 제거하는 것이 매우 중요하다. 이는 기존 단일 기지국에 적용되는 MU-MIMO 기법을 확장함으로써 구현할 수 있다. 실제 MU-MIMO 시스템에서는 수신단에서 무선을 사용하여 CSI (channel state information)의 피드백이 필요하다. 하지만, 본 테스트베드는 송신단과 수신단은 하나의 하드웨어에 연결되어 있다. 그러므로 하드웨어 내부적으로 피드백을 진행하므로 무선으로 송신하지 않아도 된다. 추후에는 송신단과 수신단을 분리하여 무선으로 피드백 과정을 처리할 것이다. 또한 본 논문에서는 MU-MIMO 구현을 위해 제시된 ZF 프리코딩 기법을 사용한다^[3]. 해당 알고리즘에서는 각 단말마다 SVD(singular value decomposition)을 통해 다른 단말로의 간섭을 최소화하는 영공간(null space)를 생성한다. 해당 영공간에 속해있는 벡터 중 일부 벡터를 기저 벡터(basis vector)로 선정해 원하는 단말로의 전력을 최대화하는 가중치를 곱해 전송한다.

III. SDR 플랫폼 하드웨어 및 소프트웨어 구성

3.1 SDR 플랫폼 하드웨어 구성

그림 2에 제안하는 UDN SDR 시스템의 하드웨어 구성도를 제시하였다. UDN SDR 시스템의 각 안테나는 RF 동축 케이블을 통해 공간적으로 떨어진 장소에 분산되어 배치된다. SDR 플랫폼의 각 구성요소에 대한 설명은 아래와 같다.

USRP (Universal Software Radio Peripheral)

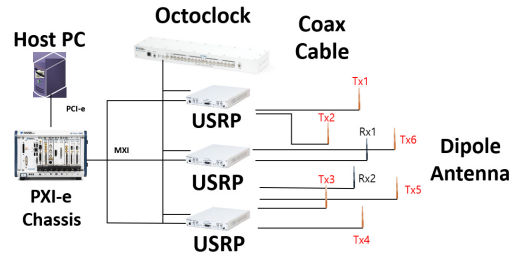


그림 2. UDN SDR 시스템 구성
Fig. 2. UDN SDR System Architecture

RIO: 2x2 MIMO RF 트랜시버와 LabVIEW로 프로그래밍 가능한 DSP 기반 Kintex 7 FPGA를 탑재하고 있으며 테스트베드에서는 FPGA를 이용한 신호처리 및 기저대역 디지털 신호와 RF(radio frequency) 신호의 변환을 수행한다.

PXI Express Chassis: 다수의 안테나로 구성된 송수신단을 구현하기 위해 다수의 USRP를 사용하였으며 PXI Express Chassis는 이들 USRP를 통합하여 Host PC와 연결하는 역할을 수행한다.

Octoclock: 각 USRP는 자체 로컬 발진기(local oscillator)를 이용해 클락을 생성하므로 USRP 간에 샘플 및 주파수 동기가 맞지 않을 수 있다. Octoclock에서 클락을 생성하여 각 USRP에 분배함으로써 동기화를 제공한다.

Antenna: 920 Mhz용 Dipole 안테나를 사용한다.

3.2 소프트웨어 구성

UDN 소프트웨어 구성에서 전체 LabVIEW VI 코드는 최상위 VI, 데이터 유형 VI, 송신 VI, 수신 VI 등으로 분류된다.

그림 3은 최상위 VI인 Simulator VI로, USRP 설정 및 전반적인 송/수신 처리로 구성되어 있다. Simulator VI에서는 송신 및 수신 신호 처리, MU-MIMO 프리코딩 등이 병렬로 처리되며 각 VI 간의 데이터 교환은 데이터 대기열(queue)를 통해 비동기적으로 이루어진다.

그림 4는 전송 관련 VI이며 한 프레임을 전송하는데 필요한 정보(프레임 번호, 프리코딩 행렬, 변조 순서, 전송 데이터)가 포함된 프레임 데이터를 생성한다.

그림 5에 보여지는 것처럼, 생성된 프레임 데이터는 동기화 신호를 생성하는 Sync Sequence.gvi, 참조 신호를 생성하는 Ref Modulator.gvi, 제어 신호를 생성하는 Control Modulator.gvi, 사용자 데이터 신호를 생성하는 Data Modulator.gvi, 주파수 도메인 신호를 시간축 신호로 변경하는 Time Domain Convert.gvi를

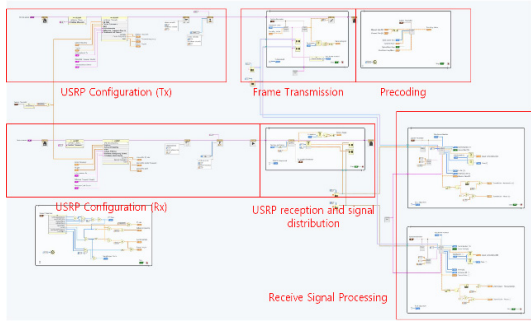


그림 3. Simulator.gvi Diagram
Fig. 3. Simulator.gvi Diagram

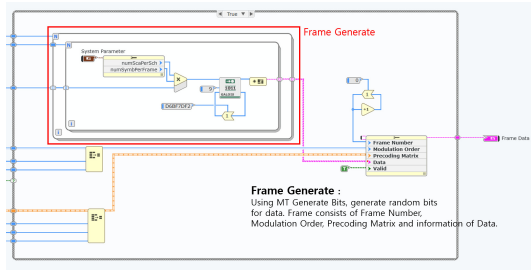


그림 4. Frame Generator.gvi Diagram
Fig. 4. Frame Generator.gvi Diagram

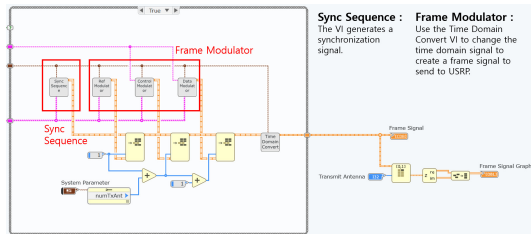


그림 5. Frame Modulator.gvi Diagram
Fig. 5. Frame Modulation.gvi Diagram

통해 USRP로 전송되는 프레임 신호로 변환되어 USRP로 전달되며 USRP에서는 기저대역 신호를 RF 신호로 변환하여 안테나를 통해 전송한다.

수신측에서는 USRP를 통해 수신된 시간축 기저대역 신호에서 프레임을 추출하기 위해 동기화를 우선적으로 수행한다. 제안된 소프트웨어 구조에서는 동기화를 수행하는 별도의 VI가 논문에서 제안된 동기화 방법을 사용하여 각 프레임의 시작 지점에 있는 참조 심볼을 찾아낸 후 주파수 동기를 맞추고 프레임 신호를 다음 단계인 Frame Demodulator.gvi로 입력한다 [4].

그림 6은 Frame Demodulator.gvi의 구조를 나타내며 해당 VI 내부에서는 채널 측정을 위한 Channel Estimation.gvi, 제어 정보 해석을 위한 Control

Demodulation.gvi, 사용자 데이터 해석을 위한 Data Demodulation.gvi가 순차적으로 수행된다.

그림 7은 MU-MIMO의 ZF 기법의 적용을 위한 Precoding.gvi의 구조를 나타낸다. 채널 이득 측정 결과를 기반으로 하나의 수신 안테나를 제외한 다른 안테나에 대한 간섭을 최소화할 수 있는 직교 기저 벡터를 SVD를 통해 생성한 후, 간섭 크기가 작은 기저 벡터를 정해진 개수만큼 선택하여 목표 수신 안테나로의 빔포밍을 위한 전력 로딩을 수행하여 프리코딩 행렬을 생성한다.

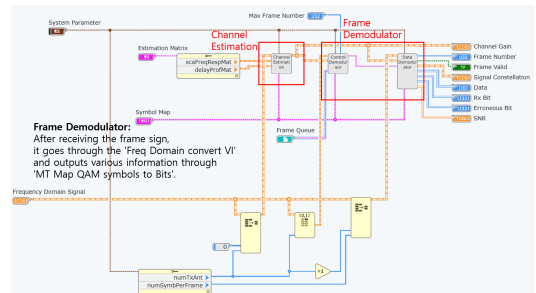


그림 6. Frame Demodulator.gvi Diagram
Fig. 6. Frame Demodulator.gvi Diagram

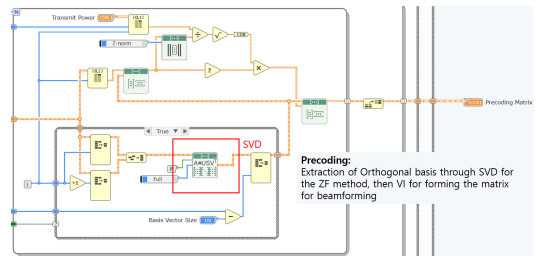


그림 7. Precoding.gvi Diagram
Fig. 7. Precoding.gvi Diagram

IV. 실험 결과

본 실험에서 사용된 테스트베드를 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 그림 9는 Octoclock, USRP RIO와 PXI-e Chassis가 연결된 테스트베드 기기이며 그림 10은 테스트베드의 안테나 배치로서 가운데에 각각 사용자 단말을 나타내는 수신 안테나 2개를 위치시키고 그 주변을 6개의 송신 안테나가 둘러싸게 했으며, 외부 요인에 방해받지 않도록 마이크로파 흡수체 벽을 설치하고 다음과 같이 4가지 실험을 진행하였다.



그림 8. 테스트베드 기기
Fig. 8. Testbed equipments

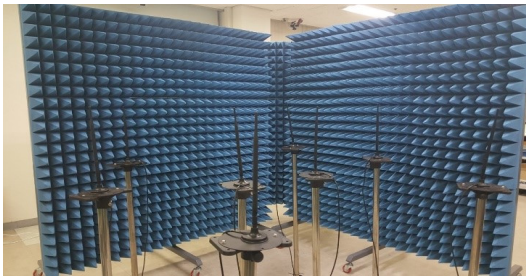


그림 9. 테스트베드 안테나 배치
Fig. 9. Testbed antenna configuration

4.1 변조 방식에 따른 성상도

본 테스트베드에서는 QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM의 변조 방식을 사용할 수 있으며 각 변조 방식에 대한 성상도를 실험을 통해 구하였다. 총 6개의 분산된 송신 안테나에서 1개의 안테나를 가진 2개

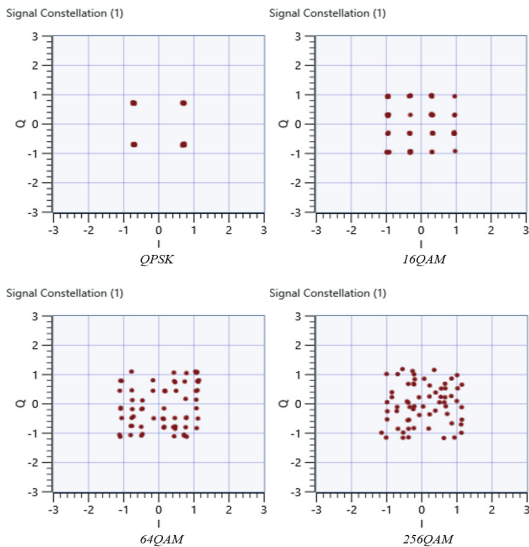


그림 10. 신호 성상도
Fig. 10. Signal Constellation

의 단말로 다운 링크 전송을 하는 상황에 대한 실험을 진행하였다. 그림 10에서처럼 다른 안테나에 대한 간섭을 제거하면서 대상 안테나로의 전력을 최대화하는 ZF 기법이 사용되어 각 변조 방식에 대한 성상도가 수신단에서 명확하게 나타나는 것을 확인하였다.

4.2 수신 안테나의 위치변화에 따른 SNR

그림 9에서처럼 2개의 수신 단말이 가운데 위치하고, 6개의 송신안테나가 바깥을 둘러싸고 있는 상황에서 한 개의 수신 단말 위치만 변경시키면서, 빔포밍 변경 없이 위치를 변화시킬 때의 SNR과 위치 이동 후 ZF 빔포밍을 수행하였을 때 SNR을 구하였다.

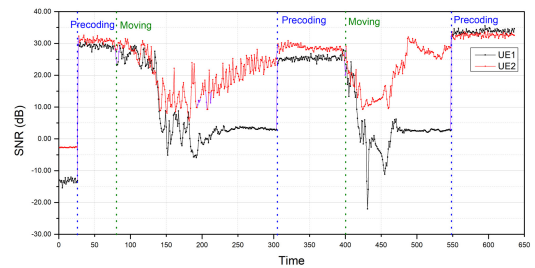


그림 11. 수신안테나 위치변화에 따른 SNR 변화 그래프
Fig. 11. Graph of SNR variations with the change of Rx antenna position

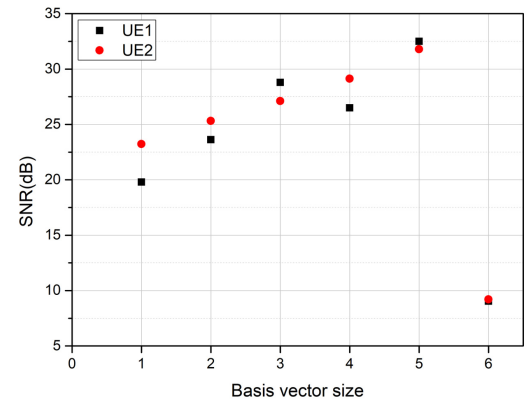


그림 12. 기저 벡터 개수 변화에 따른 SNR 변화 그래프
Fig. 12. Graph of SNR change with change of basis vector size

그림 11는 x축이 시간이고 y축이 SNR인 그래프이다. 처음에는 2개의 수신 안테나 모두 SNR 값이 낮게 측정되었지만 첫 번째 ZF 빔포밍 후에 30 dB에 근접한 값이 측정되었다. 그 후 다시 단말 2를 이동시켰으며 이 때 SNR이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이후 ZF 빔포밍 시에 SNR 값이 올라가는 것이 측정되었다. 이처럼 안테나의 위치를 변화시켜서 안테

나 간의 간섭이 발생하더라도 ZF 빔포밍을 사용하면 해당 지점에서의 프리코딩 행렬을 다시 생성하여 안테나 간의 간섭을 없앨 수 있는 것을 확인하였다.

4.3 기저 벡터 개수에 따른 SNR

그림 12은 ZF 빔포밍 시 사용되는 기저벡터 개수에 따른 SNR의 크기를 나타낸 그래프이다. 총 6개의 송신안테나를 사용하여 2개의 단말로 전송하므로 각 단말마다 다른 단말에 영향을 미치지 않는 영공간 (null space)의 차원은 5가 된다. 따라서 5개의 기저 벡터를 사용할 때 까지는 SNR을 증가시킬 수 있지만 모든 가능한 6개의 기저 벡터로 빔포밍을 하는 경우 다른 단말에 간섭을 미치게 된다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 기저 벡터 개수가 5개 일 때 까지는 점차적으로 SNR의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있지만, 6개 인 경우에는 SNR이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

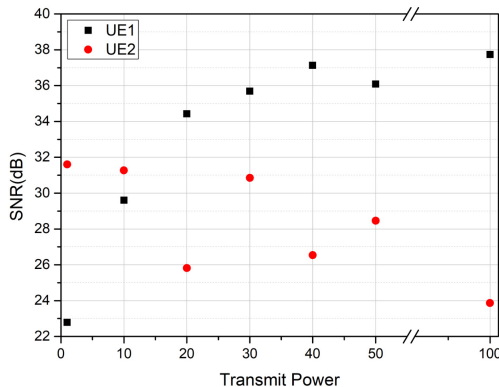


그림 13. 전송 전력 변화에 따른 SNR 변화 그래프
Fig. 13. Graph of SNR change with change of transmit power

4.4 전송 전력에 따른 SNR

본 실험에서는 하나의 수신 단말에 대한 전송 전력만 변화하고 다른 쪽 수신 단말에 대한 전송 전력은 고정시켰다. 그림 13는 x축이 단말1의 상대 전력이며 단말2의 상대 전력은 10으로 고정된 상태로 단말의 SNR 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 단말1의 전력이 단말2의 전력보다 작을 때는 최적화된 단말1의 프리코딩 행렬을 만들 수 없기 때문에 안테나 간의 간섭이 발생하여 SNR이 비교적 낮게 측정되었다. 반대로 단말1의 전력이 단말2 보다 클 때는 오히려 단말2가 단말1의 간섭을 받아서 SNR이 작게 측정되었음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

UDN은 낮은 전력 감쇄 및 짧은 전송 지연 경로를 통해 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있는 네트워크 구조이다. 본 논문에서는 LabVIEW로 UDN 소프트웨어를 제작하고 USRP SDR 플랫폼 하드웨어를 이용하여 UDN 테스트베드를 구축하였다. 다양한 환경에서 ZF 빔포밍 기법이 잘 적용되어 각 단말 간의 간섭을 제거하는 것을 확인하였다. 추후에는 보다 분산적인 형태의 독립적인 UDN 기지국을 구축하는 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] D. S. Kang and K. W. Choi, *Ultra-dense network experiments with MU-MIMO techniques*, Accessed: 2019-02-20. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Il8yJdM-9hc>
- [2] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 48, no. 3, pp. 223-229, Sep. 2002.
- [3] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
- [4] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.

강 동 수 (Dong Soo Kang)



2018년 2월 : 가천대학교 전자
공학과 졸업

2018년 3월~현재 : 성균관대학
교 전기전자컴퓨터공학과 석
사과정

<관심분야> Ultra-Dense Networks,
MU-MIMO

[ORCID:0000-0003-3157-4966]

최 계 원 (Kae Won Choi)



2007년 8월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사

2010년 9월~2016년 8월 : 서울
과학기술대학교 컴퓨터공학
과 조교수

2016년 9월~현재 : 성균관대학
교 전기전자컴퓨터공학과 부
교수

<관심분야> 무선통신, 무선전력전송

[ORCID:0000-0002-3680-1403]