

5세대 무선 접속망 설계를 위한 SDR기반 패턴/편파 안테나 검증 시스템

김태환, 이주용, 조동호
KAIST

요약

5세대 이동통신 시스템은 100Gbps급의 용량 증대를 목표로 하고 있으며, 이를 지원하기 위해서 무선 백홀에서 10GHz 이상 대역을 활용하는 연구가 시도되고 있다. 또한, 사용자를 지원하기 위한 무선 접속망에서는 고용량의 용량 증대 달성을 위해서 massive MIMO 등의 기술들이 활용될 수 있다. 하지만 5GHz 이하의 대역에서 많은 안테나를 활용하기 위해서는 공간상의 제약이 발생하기 때문에 이를 극복하기 위해서 집적화된 안테나에 대한 연구가 필요하다. 집적화된 안테나의 방사패턴에 따른 채널 특성은 기존 채널 특성과는 많은 차이가 있으며 이론적인 연구에는 한계가 발생할 수밖에 없어서 실제 검증 시스템의 구현을 통해서 측정을 통한 분석 연구가 필요하다.

이에 따라 본 논문에서는 집적화된 안테나를 기반으로 하는 무선 접속망의 설계를 위해서 SDR 기술인 GNU Radio와 USRP 보드를 활용한 시스템을 설계하고 성능 분석한 결과를 제시한다. 본 연구를 통해서 집적화된 안테나 기반의 용량에 대한 성능이 동일한 수신 SNR 관점에서는 기존 MIMO의 성능과 비교해서 큰 차이가 없음을 보인다.

I. 서론

현재 스마트폰 및 태블릿 등의 대중화로 무선 이동통신 서비스의 수요가 계속적으로 증가하고 있다. 이러한 증가 추세로 보아 4세대 이동통신에서 제공하는 시스템 용량을 넘어서는 5세대 이동통신 기술에 대한 정의와 연구가 요구되고 있다. 이에 따라 5세대 이동통신 기술을 위해 고주파 대역의 넓은 주파수를 사용하여 무선 백홀망과 소형셀들이 사용자들을 지원할 수 있는 무선 접속망의 계층적인 시스템 구성이 제안되고 있다.

높은 전송용량을 지원하는 무선 접속망을 위해서는 다수의 안테나를 사용하는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술이 요구된다. MIMO 기술은 LTE와 LTE-Advanced 표준에

서 각각 최대 4개와 8개의 안테나를 사용하고 있는데, 5세대 이동통신 기술에서는 8개를 넘어서서 더욱 많은 안테나를 사용하여 용량 확보를 목표로 하고 있다. 하지만, MIMO 이득을 얻기 위해서는 각 안테나들 간의 상호 거리가 $\lambda/2$ 이상 떨어져야 하기 때문에 많은 안테나를 사용하게 되면 기지국 혹은 단말의 크기가 커지게 되는 단점이 있다. 따라서, 이러한 한계점을 극복하기 위해 $\lambda/2$ 이하의 한정된 크기에 다수의 안테나를 집적하여 MIMO 이득을 얻을 수 있는 고집적 안테나 연구들이 진행되고 있다[1]-[6]. 이러한 고집적 안테나는 같은 공간에도 훨씬 많은 안테나가 집적되기 때문에 기지국이나 단말에 많은 안테나를 사용하면서 적절한 크기로 설계가 가능하게 하며 높은 MIMO 이득을 통해 전송용량 확보에 용이하다.

고집적화된 안테나들은 서로 다른 방사 패턴을 갖는 편파의 속성을 가지고 있기 때문에 본 논문에서는 고집적화된 안테나를 패턴/편파 안테나로 칭하기로 한다. 설계한 패턴/편파 안테나들은 시뮬레이션 및 계측 장비를 통하여 성능을 검증하였지만, 실제 무선통신 상황에서 전송했을 경우에 대한 성능 검증 역시 필요하다. 따라서, 설계한 패턴/편파 안테나를 검증하기 위한 무선 접속망 시스템을 구축하기 위하여 SDR(Software Defined Radio) 기술을 이용하였다.

SDR 기술은 소프트웨어를 통해 통신시스템의 하드웨어를 제어하며 다양한 무선 통신환경을 지원 가능하도록 하는 기술이다. 이는 소프트웨어 상에서 간단한 코딩을 통하여 무선랜과 같은 기존의 무선 통신을 구현하거나 자신이 원하는 규격의 무선 통신 구현 역시 자유롭게 만든다. SDR 기술을 지원하는 소프트웨어와 하드웨어 장비는 여러 가지가 있는데, 무선 접속망 시스템 구축을 위해 GNU Radio와 USRP(Universal Software Radio Peripheral) 보드를 이용하였다[7][8].

GNU Radio는 USRP 보드를 제어할 수 있도록 무료로 제공하는 무선 통신 신호처리 툴이다. GNU Radio는 기본적인 통신 신호처리 블럭들을 제공하고 있으며 사용자의 목적에 따라 코드 수정 혹은 펌웨어 수정을 통하여 다양한 무선 통신 시스템 구성이 가능하다. 또한, 현재도 지속적인 소프트웨어 업데이트가 되고 있으며 세계적으로 GNU Radio를 사용한 연구 결과들

이 많이 공유되고 있다. USRP 보드는 RF 신호를 처리할 수 있는 daughterboard와 결합하여 디지털 신호와 아날로그 신호를 처리할 수 있게 하는 하드웨어로 ADC/DAC, RF front-end와 FPGA로 구성되어 있다.

본 논문에서는 제안하는 5세대 이동통신 시스템의 구조에 대해서 간략하게 설명하고, 계층적 구조 중 개발하는 패턴/편파 안테나를 검증하기 위한 무선 접속망 시스템 구축에 대해서 기술한다. 다음으로 패턴/편파 안테나와 기존의 MIMO 안테나의 성능을 구축한 무선 접속망 시스템을 이용하여 측정하고 분석한 후 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 본론

1. 시스템 사양

5세대 이동통신 시스템에서는 4세대 이동통신 시스템보다 큰 수준의 용량 확보가 필요할 것으로 보인다. 우리는 100Gbps 수준의 용량을 확보하기 위하여 <그림 1>과 같은 계층적인 시스템 구조를 제안한다.

<그림 1>의 계층 구조에서 무선 접속망에서는 기존 시스템에 비하여 효율적으로 주파수 자원을 이용하면서 고속의 멀티미디어 서비스의 최적화, 이동성, 서비스 품질 보장 등을 포함하여 현재 서비스되고 있는 4세대 시스템이 요구하는 용량보다 더욱 높은 전송 용량을 요구한다. 기존에는 MIMO 공간 다중화 기술을 이용하여 시스템 용량 및 최대 전송 속도를 증대시켜왔지만, 더 많은 안테나 사용을 위해서는 분산 노드 기지국의 크기에 제

약이 생기게 된다. 따라서, 무선 접속망에서는 패턴/편파 안테나를 통해 주어진 공간에서 많은 MIMO 이득을 얻는 방안이 연구되고 있다.

무선 백홀은 기존의 유선 백홀을 대체하며 다수의 분산 노드들을 최대 100Gbps의 용량으로 지원할 수 있다. 이처럼 많은 용량을 무선을 통해 확보하기 위하여 많은 주파수 대역을 사용 가능한 고주파 대역을 기반으로 하여 빔을 통해 분산 노드들을 지원한다. 분산 노드들을 지원하기 위한 빔을 생성하기 위해서 거점 노드 역시 많은 수의 안테나가 필요하다. 전송 용량의 확보를 위해 무선 백홀에서도 MIMO 이득을 얻을 수 있는 방안을 연구 중이다.

5세대 이동통신 시스템의 무선 백홀과 무선 접속망 모두 용량 확보의 한 방안으로 패턴/편파 안테나 설계를 연구하고 있으며, 본 논문에서는 설계한 패턴/편파 안테나가 실제로 어느 정도의 이득을 얻을 수 있는지 확인하기 위한 무선 접속망 시스템 구축과 성능 분석에 대해서 알아보도록 한다.

2. 시스템 설계

패턴/편파 안테나를 검증하기 위한 무선 접속망 시스템을 구축하기 위하여 SDR 플랫폼 중 GNU Radio와 Ettus 사의 USRP 보드를 사용하였다.

사용한 USRP 보드와 daughterboard는 USRP N210 보드와 WBX daughterboard이다[8]. USRP N210 보드는 100MS/s의 속도를 가진 ADC와 400MS/s의 속도를 가진 DAC를 가지고 있으며, GPS 모듈로부터 외부 reference 신호를 입력 가능한 포트를 가지고 있어 MIMO 시스템 구현이 가능하다. WBX daughterboard는 50~2200MHz 대역을 지원하고, 최대 40MHz 주파수 대역폭을 전송에 이용할 수 있기 때문에 무선 접속망 시스템 설계에 적합하다. 또한, 송수신 파워를 최대 100mW까지 지원하기 때문에 원하는 파워와 주파수 대역 설정이 가능하다.

USRP 보드는 Gigabit 인터넷 인터페이스를 통하여 GNU Radio가 설치되어 있는 PC와 연결된다. GNU Radio는 신호처리 블록 라이브러리들을 오픈 소스로 제공하고 있으며, 사용자는 이를 이용하여 쉽게 시스템 구성이 가능하다. 이러한 신호처리 과정은 모두 PC에서 수행되어야 하기 때문에 시스템 구성에 있어서 좋은 사양의 PC가 필요하다.

GNU Radio는 Windows, Linux, Mac OS 등 다양한 운영체제를 지원하는데, Linux 기반 개발환경이 시스템을 구현하기에 있어서 손쉽게 때문에 Linux를 기반으로 시스템을 설계하였으며, <그림 2>와 같이 전체적인 시스템 설계가 가능하다.

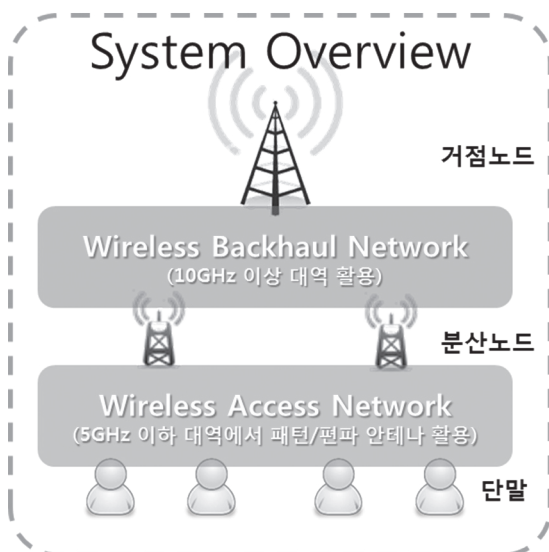


그림 1. 5세대 이동통신 시스템 구성도

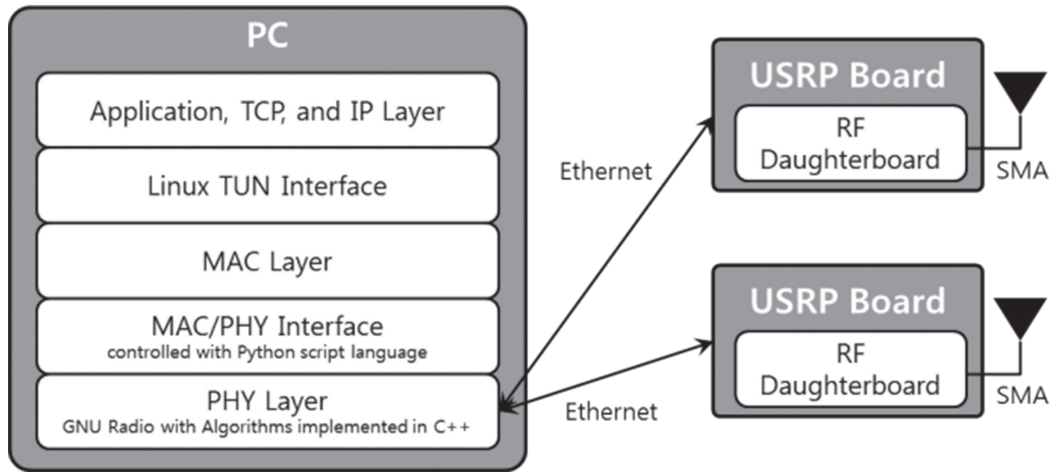


그림 2. GNU Radio와 USRP 보드를 사용한 시스템 구성

GNU Radio는 상위 레이어의 인터페이스를 파이썬 언어를 이용하여 처리할 수 있게 제공한다. 물리계층에서는 C++ 언어를 이용하여 디지털 신호의 신호처리 과정을 수행할 수 있다. 송신단에서 만들어진 패킷은 이더넷 케이블을 통해 USRP 보드로 넘겨지며, daughterboard에서 RF 신호로 변환되고 안테나를 통해 전송하게 된다(수신단에서는 반대의 과정을 거친다).

설계한 무선 접속망 시스템은 2GHz 주파수에서 방사하는 패턴/편파 안테나를 검증하기 위한 것이며, 넓은 주파수 대역을 사용하는 경우 PC에 부하가 걸리기 때문에 1MHz 주파수 대역 폭을 사용하도록 설계하였다. 또한, 패턴/편파 안테나를 검증할 수 있어야 하기 때문에 MIMO 송수신이 가능한 시스템이어야 한다.

3. 시스템 구현

검증용으로 사용될 패턴/편파 안테나들은 8개의 안테나를 집적한 안테나들이다. 따라서, 패턴/편파 안테나를 검증하기 위해서는 8x8 MIMO 송수신이 가능한 시스템이 필요하다.

8x8 MIMO 전송 시스템의 베이스밴드 부분은 GNU Radio에서 제공하는 신호처리 블록 라이브러리를 이용하였고, 필요한 부분은 수정 및 추가 코딩을 통하여 구현하였다.

먼저, 8x8 MIMO 전송 시스템 구현에서 MIMO 전송 환경은 채널이 다중 경로 페이딩 채널이기 때문에 수신단에서 채널의 영향을 주파수 영역에서 쉽게 보정이 가능한 OFDM(Orthogonal Frequency Division multiplexing) 방법을 사용하였다. 송신단에서 MAC layer로부터 받은 데이터는 비트로 이루어져 있다. 이 비트 데이터들은 MIMO 전송을 위해 사용하는 안테나 개수만큼 데이터 스트림으로 분리된다. 각 데이터 스트림은 전송 에러를 줄이기 위하여 채널 코딩 블록을 통

해 인코딩된다. 본 시스템에서는 채널 코딩 방법으로 1/2-rate convolutional code를 이용하였으며, puncturing을 통하여 rate 변경이 가능하다. 채널 코딩 블록을 통해 인코딩된 데이터 스트림들은 constellation mapping을 통해 복소수로 된 심볼로 변조된다. 여기서 constellation mapping 방식은 BPSK, QPSK, 16QAM 세 가지를 선택하여 이용할 수 있다. 복소수로 변조된 데이터들은 OFDM modulation을 통해 OFDM 심볼로 만들어지는데, 이때 FFT 사이즈는 512를 이용하였으며 심볼간 간섭을 제거하기 위한 CP(Cyclic Prefix)는 128개의 샘플 길이를 사용하였다.

또한, 한 개의 OFDM 심볼은 512개의 서브 캐리어를 가지고 있는데, 이 중 400개의 서브 캐리어를 데이터 전송에 이용하고, 나머지 112개의 서브 캐리어에는 제로 패딩을 한다. 이는 OFDM 심볼의 양 끝 부분의 서브 캐리어의 데이터는 서로 다른 OFDM 심볼끼리 간섭이 될 가능성이 있기 때문에 제로 패딩을 하여 사용하지 않는다. 여러 개의 OFDM 심볼로 한 프레임이 구성되는데, 한 프레임의 가장 앞에는 수신단에서 프레임의 시작 위치를 찾고, CFO(Carrier frequency Offset)을 보정하며, 채널 추정을 하는데 이용하는 프리엠블이 위치한다.

본 MIMO 시스템에서는 한 프리엠블을 통하여 한 안테나의 채널을 추정할 수 있기 때문에 <그림 3>과 같은 형태로 프레임을 구성한다. <그림 3>과 같이 SISO 전송을 하는 경우는 한 프레임에 한 개의 프리엠블이 있으며, NxN MIMO 전송의 경우에는 한 프레임에 N개의 프리엠블이 존재한다. 그리고 수신단에서 MIMO 채널 추정을 위하여 <그림 3>의 빨간색 부분은 제로 패딩을 한다. 이렇게 만들어진 프레임들은 PC에서 이더넷 케이블을 통해 USRP로 전송되고, USRP에서는 안테나를 통해 수신단으로 신호를 전송한다. 수신단에서는 안테나를 통해 받은 RF 신호가 USRP에서 베이스밴드 신호로 바뀌어 이더넷 케이

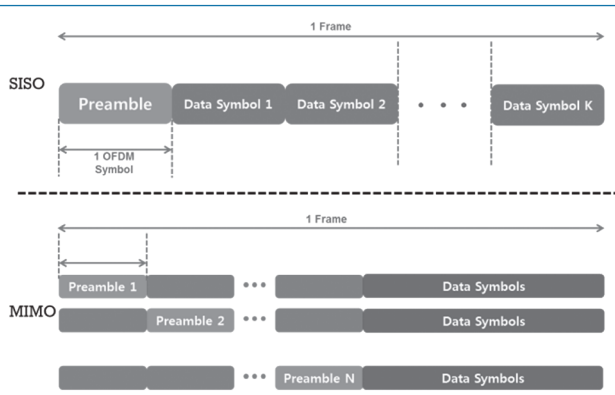


그림 3. 전송 시스템의 프레임 구조

블을 통해 PC로 전송된다. 수신단에서 가장 처음으로 해야 하는 일은 받은 데이터 프레임의 시작 위치를 정확하게 찾는 것이다. 이를 위해 데이터 프레임의 시작 위치를 찾고, CFO를 보정하기 위한 알고리즘을 통해 Time/Frequency offset을 보정하였다[9]. 이를 통해 데이터 스트림의 시작 위치를 찾으면 프리앰블을 이용하여 MIMO 채널을 추정한다. MIMO 채널 추정시 Zero-forcing 방법을 이용하여 추정한다. 추정한 MIMO 채널을 이용하여 채널 페이딩 효과를 보정하기 위하여 복잡도가 낮은 Zero-forcing 방법을 이용하여 equalization을 한다. 채널 페이딩 효과가 보정된 데이터들은 BPSK, QPSK, 16QAM의 복조를 통하여 비트로 변환되고, convolutional code로 인코딩된 데이터를 디코딩하기 위해 잘 알려진 비터비 디코더 블록에 의해 디코딩된다. 위의 과정들은 <그림 4>와 같은 구조로 요약이 가능하다.

수신단의 최종 블록에서 데이터 프레임이 에러가 발생했는지 체크하게 된다. MIMO 전송 시스템에서는 사용하는 안테나의 개수가 많아질수록 다른 안테나로부터의 간섭이 커지기 때문에 에러가 증가하게 된다. 따라서, MAC layer에서 에러가 난 데이터를 복원하기 위하여 HARQ를 구현하였다. 송신단에서는 처음에 데이터에 시간 정보를 삽입하여 수신단에서 에러가 난 경우 어느 시간에 보낸 데이터가 에러가 난 데이터인지 파악 가능

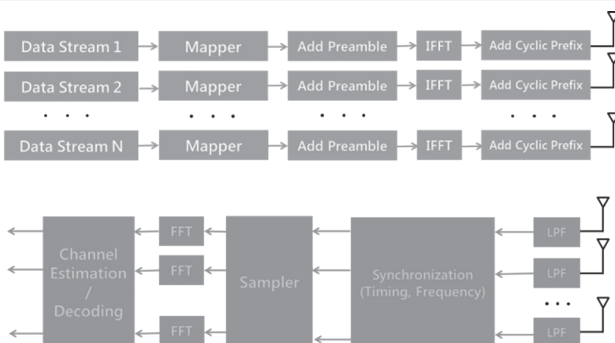


그림 4. 본 시스템의 MIMO-OFDM PHY

하다. 에러가 발생한 데이터 프레임의 위치가 파악이 되면, 수신단에서는 송신단으로 에러가 발생한 데이터 프레임의 프레임 순차 정보를 피드백채널을 통해 전달한다. 송신단에서는 피드백 받은 정보를 바탕으로 수신단으로 에러가 발생한 프레임을 재전송하여 에러가 발생한 데이터를 복구할 수 있도록 하였다.

8x8 MIMO 전송 시스템을 구축하기 위해서는 2개의 PC와 16개의 USRP 보드가 필요하다. USRP 보드 한 개에 한 안테나 연결이 가능하기 때문에 송신단용 USRP 보드가 8개, 수신단용 USRP 보드가 8개 필요하다. 8x8 MIMO 시스템에서는 송신단의 USRP 보드들과 수신단의 USRP 보드들 사이에 동기화가 되어야만 한다. 송신단 및 수신단의 USRP 보드들 사이에 동기화가 되어 있지 않으면 보드들간 clock 오차가 생기기 때문에 MIMO processing 과정에서 많은 에러가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 송신단 및 수신단의 USRP 보드들에는 동기화를 해주기 위해 외부 reference 신호를 입력할 수 있는 단자가 존재한다. 이 단자에 입력하는 신호로 GPS 모듈로부터 10MHz와 1PPS reference locking용 신호를 사용한다. 이 10MHz와 1PPS 외부 reference 신호들은 각각 분배기를 통해 8개의 케이블을 통해 똑 같은 10MHz와 1PPS 신호가 각 USRP 보드의 입력 단자로 입력된다. 이러한 과정을 통해 송신단 및 수신단의 USRP 보드들은 동일한 10MHz와 1PPS 신호로 동기화가 된다.

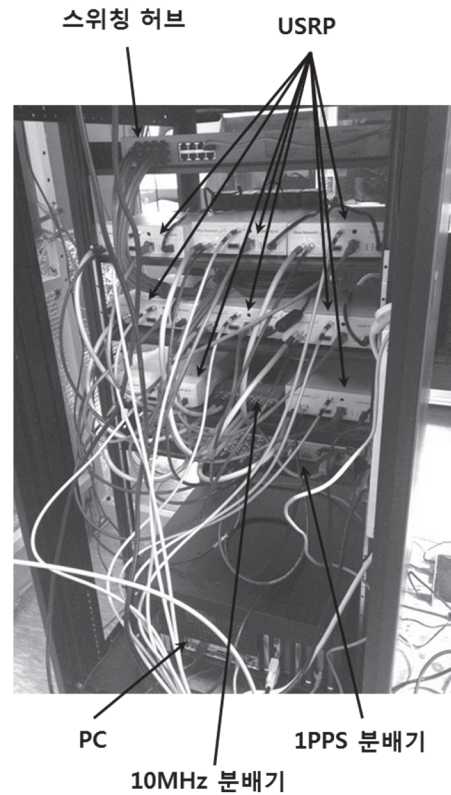


그림 5. 송/수신단 구성

〈그림 5〉의 사진은 USRP 보드를 이용하여 구성된 송신단 및 수신단 사진이다. 〈그림 2〉에서 보듯이 USRP 보드와 PC가 데이터를 주고 받기 위해서는 이더넷 인터페이스가 필요하기 때문에 PC와 USRP 보드 8개가 스위칭 허브를 통하여 이더넷 케이블로 연결된 상태이다. 또한, USRP 보드간 동기화를 위해 위에서 언급한 10MHz와 1PPS 신호용 분배기가 존재한다. 마지막으로 송신단 및 수신단에 이 모든 것들이 필요하기 때문에 랙에 PC와 USRP 보드 8개, 스위칭 허브, 10MHz 신호용 분배기, 1PPS 신호용 분배기를 설치하였다. 이때 USRP 보드와 안테나가 SMA 케이블을 통하여 연결된다.

4. 시스템 시험 및 평가

본 절에서는 제작한 여러 가지의 패턴/편파 안테나 중 〈그림 6〉과 같은 8-port 전기장 패턴/편파 안테나와 〈그림 7〉과 같은 8-port 전기장/자기장 패턴/편파 안테나를 이용하여 실험을 진행하였고, 비교를 위하여 reference로 사용할 〈그림 8〉과 같은 8-port MIMO 안테나의 실험 역시 진행하였다.

전기장 안테나는 near field에서 전기장이 형성되는 안테나이고, 자기장 안테나는 near field에서 자기장이 형성되는 안테나

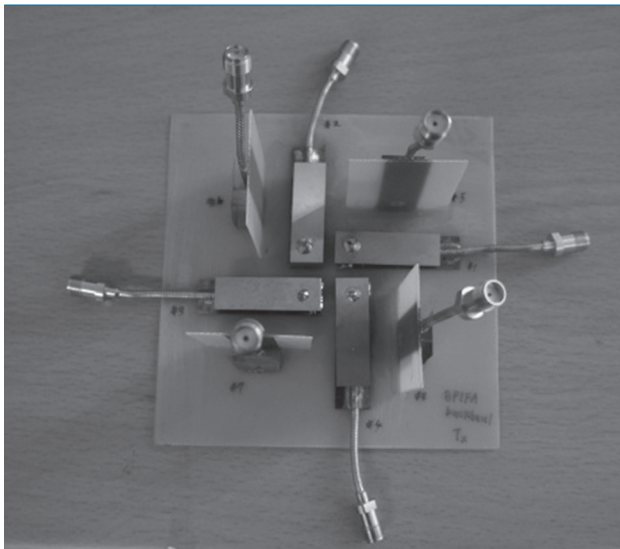


그림 6. 8-port 전기장 패턴/편파 안테나

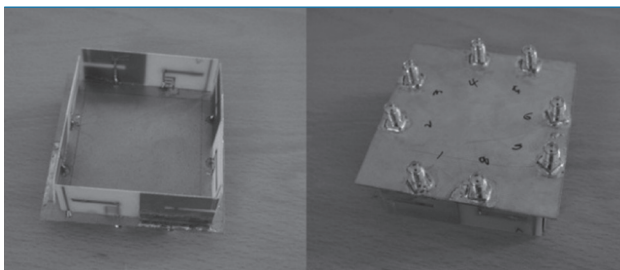


그림 7. 8-port 전기장/자기장 패턴/편파 안테나



그림 8. 8-port MIMO 안테나

를 칭한다. 전송 실험은 연구소 실내 환경에서 BPSK 변조 방식을 사용하여 진행하였다. 전송 실험을 통하여 수신단에서 채널 추정을 통하여 채널 값을 측정하고 이를 이용하여 채널 용량을 구할 수가 있다.

실험은 1x1부터 8x8 전송을 하였으며, 이상적인 채널 용량 (full rank 상황)과 비교를 하였다. 먼저, 8-port 전기장 패턴/편파 안테나의 채널 용량은 〈그림 9〉와 같은 환경에서 측정된 결과로 〈그림 10〉과 같은 결과를 얻었다. 실측 결과는 8x8 전송의 경우 20dB SNR에서 이상적인 6x6 MIMO에 가까운 성능을 얻는 것을 알 수 있다. 또한, 사용하는 안테나의 개수가 늘어



그림 9. 전기장 패턴/편파 안테나 성능 측정 환경

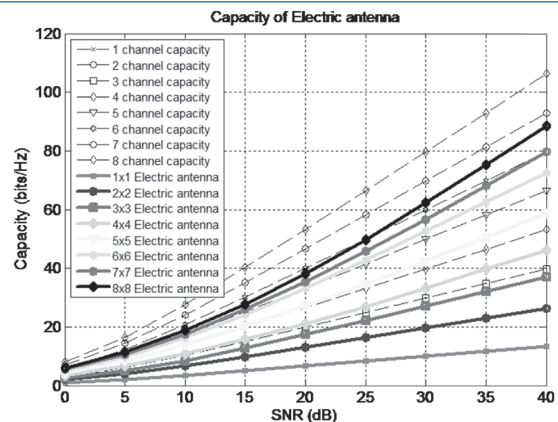


그림 10. 전기장 패턴/편파 안테나 채널 용량



그림 11. 전기장/자기장 패턴/편파 안테나 성능 측정 환경

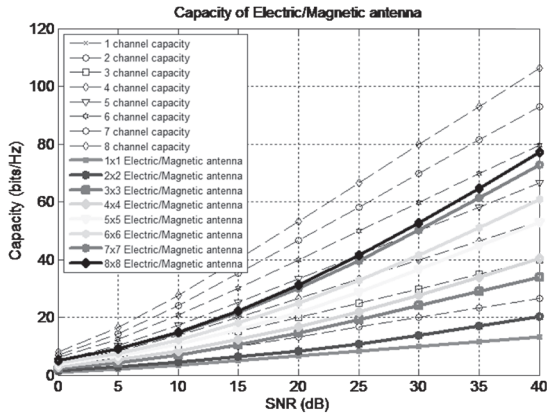


그림 12. 전기장/자기장 패턴/편파 안테나 채널 용량

날수록 얻을 수 있는 채널 용량이 증가하는 것을 확인하였다.

8-port 전기장/자기장 패턴/편파 안테나는 <그림 11>과 같은 환경에서 실험하여 <그림 12>와 같은 채널 용량 결과를 얻었다. 전기장/자기장 패턴/편파 안테나의 경우는 8x8 전송을 하였을 때, 20dB SNR에서 이상적인 5x5 MIMO와 비슷한 채널 용량을 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 전기장 패턴/편파 안테나와 마찬가지로 사용하는 안테나 개수가 늘어날수록 얻을 수 있는 채널 용량이 증가하는 것을 알 수 있다.

마지막으로 8x8 전송 환경에서 전기장 안테나와 전기장/자기장 안테나, 8-port MIMO 안테나의 채널 용량을 측정하여 비교하였다. <그림 13>을 통하여 8-port MIMO 안테나의 성능이 가장 좋고, 전기장 안테나와 전기장/자기장 안테나의 성능은 8-port MIMO 안테나의 성능에 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이 이유는 MIMO 안테나의 경우는 안테나간 간격을 반파장 이상을 확보하였지만, 연구를 통하여 제작한 패턴/편파 안테나는 반파장 이내에 안테나를 집적하였기 때문이다. 이는 MIMO 안테나에 비해서 성능이 조금 떨어지긴 하지만, 반파장 이내에 집적한 안테나의 경우에도 MIMO 안테나에 가까운 이득을 얻을 수 있음을 보인다.

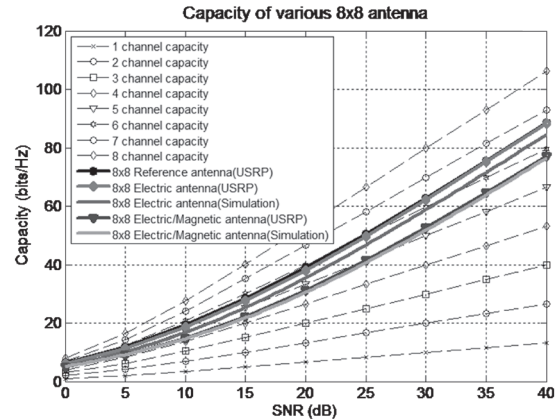


그림 13. 8x8 전송 환경에서의 채널 용량 비교

III. 결론

5세대 이동통신 시스템에서 무선 접속망용 검증 시스템 구축에 관한 내용을 본 논문을 통하여 알아보았다. 손쉽게 무선통신 환경을 구현할 수 있는 SDR 기술을 이용하여 개발한 패턴/편파 안테나를 검증할 수 있도록 MIMO 송수신이 가능한 시스템을 만들었다. 구현한 무선 접속망용 검증 실험 시스템을 통하여 개발한 패턴/편파 안테나들을 실측한 결과 반파장 이내의 크기에 많은 안테나를 집적하여 만든 안테나의 성능이 동일한 수신 SNR에서 MIMO 안테나에 뒤지지 않는 용량 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgement

본 연구는 방송통신위원회의 방송통신인프라원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음(KCA-2012-11-911-04-001)

참고 문헌

[1] Ruiyuan Tian and Buon Kiong Lau, "Degree of Freedom Evaluation of Six Port Antenna Arrays in a Rich Scattering Environment," IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 51-54, Jul. 2011.

[2] Chi-Yuk Chiu, Jie-Bang Yan, and Ross D. Murch, "24-Port and 36-Port Antenna Cubes Suitable for MIMO Wireless Communications," IEEE transactions

- on Antennas and Propagation, Vol. 56, No. 4, pp. 1170–1176, Apr. 2008.
- [3] Chi-Yuk Chiu and Ross D. Murch, "Compact Four-Port Antenna Suitable for Portable MIMO Devices," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 7, pp. 142–144, 2008.
- [4] Jianfeng Zheng, Xu Gao, Zhijun Zhang and Zhenghe Feng, "A Compact Eighteen-Port Antenna Cube for MIMO Systems," IEEE transactions on Antennas and Propagation, Vol. 60, No. 2, pp. 445–455, Feb. 2012.
- [5] R.H. Chen and Yi-Cheng Lin, "Miniaturized Design of Microstrip-Fed Slot Antennas Loaded With C-Shaped Rings," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.10, pp. 203–206, 2011.
- [6] R.H. Chen and Yi-Cheng Lin, "An inductive-loaded slot antenna using C-shaped rings for size reduction," 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), pp. 1–4, Jul. 2010.
- [7] "GNU Radio," <http://www.gnuradio.org>.
- [8] "USRP," <http://ettus.com>.
- [9] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," IEEE Transactions on Communications, Vol. 45, No. 12, pp. 1613–1621, Dec. 1997.

약 력



김 태 환

2007년 고려대학교 전파통신공학사
 2009년 고려대학교 전자전기공학석사
 2009년~현재 고려대학교 박사과정
 2011년~현재 KAIST IT융합연구소 통신에너지팀 연구원
 관심분야: MIMO, SDR 기술, 5세대 이동통신



이 주 용

1995년 한국과학기술원 공학사
 1997년 한국과학기술원 공학석사
 2003년 한국과학기술원 공학박사
 2003년~2007년 삼성전자 네트워크 사업부 책임연구원
 2007년~2009년 캐나다 토론토대학 박사후연구원
 2009년~2010년 성균관대학교 연구교수
 2010년~현재 KAIST IT 융합연구소 통신에너지팀 팀장/연구부교수
 관심분야: 5세대 이동통신



조 동 호

1979년 서울대학교 전자공학사
 1981년 한국과학기술원 전기 및 전자공학석사
 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학박사
 1987년~1998년 경희대학교 전자계산공학과 교수
 1989년~1995년 경희대학교 전자계산소 소장
 1998년~현재 한국과학기술원 전자계산공학과 교수
 2007년~2011년 KAIST IT융합연구소 소장
 2009년~2011년 KAIST 온라인 전기자동차 사업단 단장
 2011년~현재 KAIST 정보전자연구소 소장
 2011년~현재 KAIST ICC 부총장