

# 캠퍼스 환경에서 5.8GHz 대역 실외 4×4 MIMO 채널 측정 및 분석

김진우<sup>o</sup>, 이창훈, 전남열, 강준성, 김영훈, 이한별, 김성철

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소

## Outdoor 4×4 MIMO Channel Measurements and Analysis at 5.8GHz in Campus Environments

Geon-Woo Kim<sup>o</sup>, Chang-Hoon Lee, Nam-Ryul Jeon, Joon-Sung Kang, Young-Hoon Kim, Han-Byul Lee,  
Seong-Cheol Kim

Institute of New Media and Communications,

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

{gwkim, lchjsa, jeon3115, jskang, kebi, hblee, sckim} @maxwell.snu.ac.kr

### 요 약

본 논문은 5.8GHz 대역에서 의사잡음 시퀀스를 이용하여 4 개의 송신 안테나와 4 개의 수신 안테나를 통해 서울대학교 관악캠퍼스 내에서 4×4 MIMO 채널 측정 결과 및 분석을 포함하고 있다. 실험 장소인 관악캠퍼스는 LOS(Line of Sight) 환경과 NLOS(Non Line of Sight) 환경을 모두 가지고 있고 지형고도의 변화가 심하여 여러 조건을 고려할 수 있어서 실험하기에 적합한 환경이다. 실험은 서울대학교 내의 여러 지점에서 수신 안테나 각각에 대한 수신 전력을 측정하고, 각 지점에서 수신된 의사잡음 시퀀스(Pseudo-Noise sequence)를 이상적인 의사잡음 시퀀스와 상호상관 하여 채널의 특성을 알아보기 위해 수행되었다. 그리고 상호상관을 바탕으로 전력 지연 프로파일(Power Delay Profile)과 tapped delay line 채널 모델을 구하였다. 또한 이 모델을 이용해서 광대역(wideband) 채널 용량과 협대역(narrowband) 채널 용량을 구하고 분석하였다.

## 1. 서론

차세대 이동통신 시스템의 핵심 기술 중 하나로 꼽히고 있는 MIMO(Multi-Input Multi-Output) 통신은 하나의 송신 안테나로 신호를 전송하고 하나의 수신 안테나로 신호를 전송 받는 방식에서 진보하여 다수의 송신 안테나와 다수의 수신 안테나를 이용해서 데이터를 주고받는 통신 방식이다. 이 MIMO 통신의 최대 장점은 추가적인 주파수 대역의 확장 없이 전송 용량을 높일 수 있다는 것이다. 또한 전력, 대역폭 그리고 복잡도가 제한된 무선 애플리케이션에 대해서 매우 높은 스펙트럼 효율성을 달성할 수 있고, 안테나의 개수 증가에 따라 전송 용량을 선형적으로 증가시킬 수 있다. 이러한 이점은 다중경로(multi-path) 수가 많아질수록 더 큰 효과를 얻는다. [1,2]

본 논문에서 측정된 5.8GHz 대역은 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 밴드에 속해있다. 실제 이 주파수 대역은 무선랜 (Wireless LAN) 802.11a 에서 이

용하고 있고 노변기지국과 차량 단말기 간 근거리 전용 무선통신 표준에 적용되고 있으며 버스 정보 시스템, 자동 요금 징수 시스템 등에도 사용되고 있다. 따라서 5.8GHz 주파수를 이용한 캠퍼스 내의 채널 측정은 이 주파수에서 MIMO 적용 여부 및 전파의 특성에 대해 알아볼 수 있는 유용한 실험이다.

본 논문의 2 장에는 채널 측정 방식, 측정 시스템, 측정 시나리오에 대하여 설명하고, 3 장에서는 각 지점에서 수신한 전력 측정 결과를 보여주고 있다. 또한 상호상관을 이용해 전력 지연 프로파일과 tapped delay line 채널 모델을 구하고 이를 바탕으로 광대역 채널 용량과 협대역 채널 용량을 이끌어 내었다. 마지막으로 4 장에서는 결론을 도출하였다.

## 2. 4×4 MIMO 채널 측정

### 2.1 채널 측정 방식

실험은 10 차 ( $x^{10} + x^7 + x^6 + x^3 + x + 1$ ) 다항계수를 가지는 의사잡음 시퀀스를 이용해서 수행되었다. 이 의사잡음 시퀀스는 최대 길이를 가지는 시퀀스이고 M-시퀀스(Maximum length sequence)라 부른다. 최대 길이를 가지는 10 차 의사잡음 시퀀스는 총  $2^{10} - 1$  개 즉, 1023 개의 칩으로 이루어져 있다. 20MHz의 클럭을 이용하여 의사잡음 시퀀스를 만들어 내므로 의사잡음 시퀀스의 한 칩은 50ns의 지속시간(duration)을 가지게 된다. 수신된 신호는 오실로스코프를 이용해 25회 과표본화(oversampling) 되어서 노트북컴퓨터에 저장되고 이렇게 저장된 데이터를 이상적인 의사잡음 시퀀스와 상호상관(cross-correlation)을 취함으로써 채널 특성을 분석할 수 있게 된다. 아래의 그림 2.1은 수신된 의사잡음 시퀀스의 후처리 과정을 계통도로 나타낸 것이다.

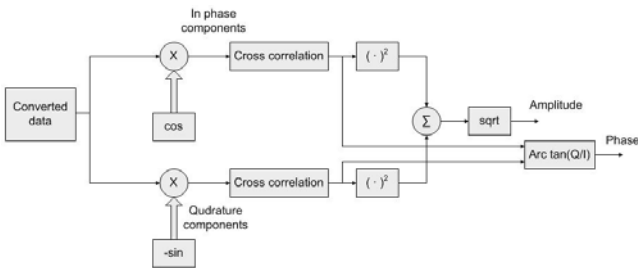
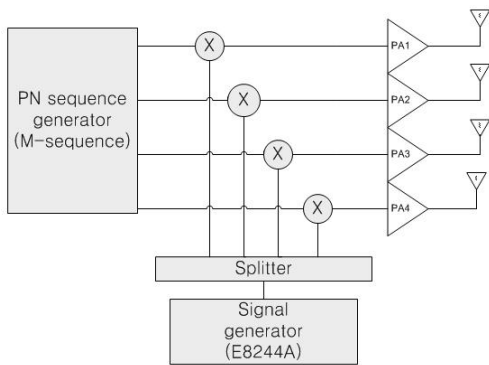


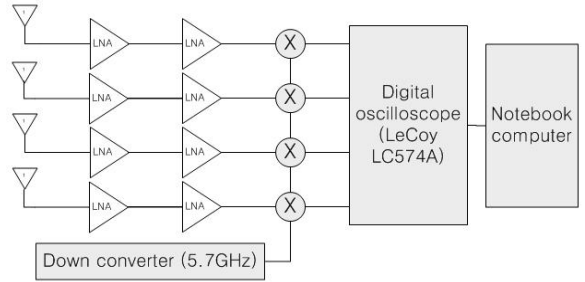
그림 2.1 측정 시스템의 소프트웨어 계통도

## 2.2 측정 시스템

5.8GHz 대역에서 4x4 MIMO 채널을 측정하기 위한 측정 시스템은 기존의 MIMO 측정 시스템을 기반으로 제작되었다.[4] 동적 범위(dynamic range)가 작은 기존의 시스템에 고성능의 전력 증폭기(power amplifier)를 사용하고 수신 시스템을 차량에 장착함으로써 실외환경에서 채널 측정이 용이하도록 개선되었다. 수신 시스템과 GPS는 채널을 측정하기 위해 준비된 밴(van)에 실었고 이동하면서 전원 공급을 받아야 하므로 소형발전기(Honda EU 30is)가 장착되었다. 측정은 밴을 이용해 사전에 정해놓은 각 지점으로 이동한 후 정지한 상태로 수행하였다. 송신 시스템과 수신시스템은 아래의 그림 2.2와 같이 구성되어있다.



(a) 송신 시스템



(b) 수신 시스템

그림 2.2 시스템의 하드웨어 계통도

송신 시스템은 아래의 그림 2.3(a)와 같이 서울대학교 내의 뉴미디어통신공동연구소(이하 뉴미연) 옥상에 설치되었다. MIMO 효과를 극대화하기 위해서 송신 안테나를 뉴미연 정문과 수직하게 놓았다. 송신시스템의 높이는 뉴미연 바닥 기준 18.5m이다. 그림 2.3(b)는 밴에 장착된 수신 시스템의 사진이다. 오실로스코프를 통해 수신된 의사잡음 시퀀스를 노트북컴퓨터로 전송하면서 GPS를 이용해 각 지점의 위치를 추출하였다. 또한 의사잡음 시퀀스 전송 후 스펙트럼 분석기로 수신 파워도 측정하였다. 송·수신단에는 4.6dBi의 이득을 가지고 5.8GHz 대역에서 선형적으로 동작하는 다이폴(dipole) 안테나가 사용되었다.



(a) 송신 시스템

(b) 수신 시스템

그림 2.3 송신 시스템과 수신 시스템

일반적으로 안테나 간격이  $\lambda/2$  이상이면 안테나 사이 수신 신호 세기의 공간적 상관성은 많이 떨어진다고 하기에 송신 안테나는  $4\lambda$ , 수신 안테나는  $1\lambda$ 의 안테나 간격을 두었다. [5,6]

## 2.3 측정 시나리오

채널 측정은 총 12 지점에서 수행되었다. 12개의 지점은 캠퍼스 내 도로를 따라 LOS 환경과 NLOS 환경으로 나누어서 각 환경에 따른 MIMO 효과를 연구해 볼 수 있도록 선택되었다.

아래의 그림 2.4는 서울대학교 관악캠퍼스 지도에 송신 시스템의 위치와 12개의 측정 지점을 표시해 놓은 것이다. 파란색으로 표시된 지점은 LOS 환경이고 빨간색으로 표시된 지점은 NLOS 환경이다.

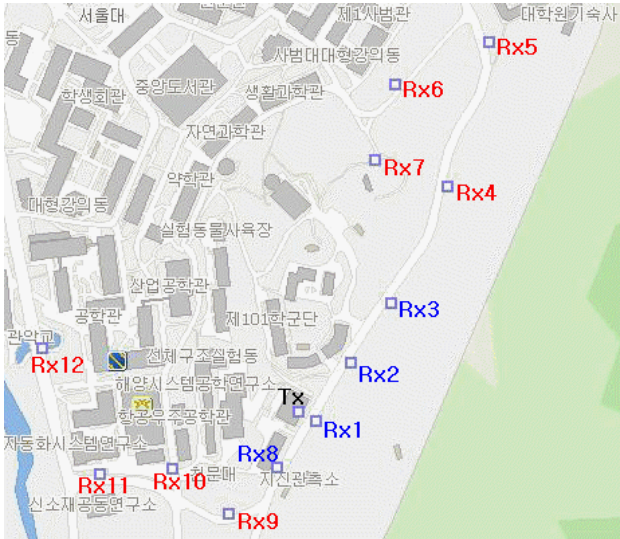


그림 2.4 송신 안테나 위치와 측정 지점들.

### 3. 데이터 분석

#### 3.1 각 지점에 따른 수신 전력

표 3.1 은 각 지점에서 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정된 전력을 나타낸 것이다.

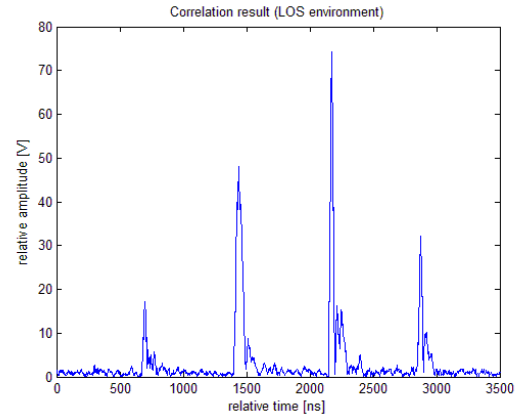
표 3.1 각 지점에서 수신된 전력(단위, dBm)

Position	1st ant.	2nd ant.	3rd ant.	4th ant.
1	-23.1	-27.0	-16.5	-22.1
2	-21.8	-13.9	-14.8	-9.3
3	-37.0	-31.2	-26.4	-26.5
4	-67.5	-63.2	-80.1	-68.3
5	-80.0	-71.2	-84.5	-76.2
6	-83.0	-72.3	-86.3	-74.9
7	-86.3	-78.0	-72.0	-73.5
8	-20.0	-24.0	-22.5	-20.7
9	-49.0	-51.0	-40.0	-36.5
10	-40.5	-45.2	-44.1	-36.3
11	-64.0	-80.7	-75.4	-76.1
12	-90.7	-91.5	-72.6	-79.2

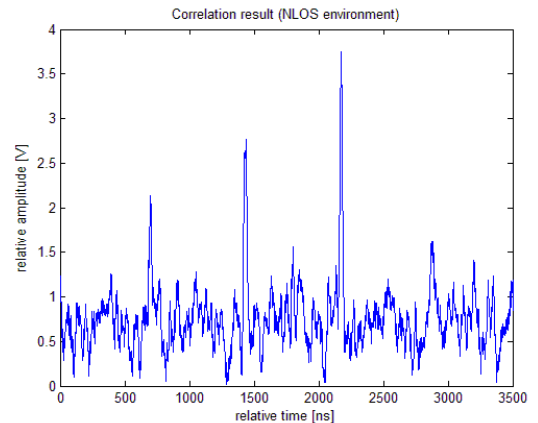
다이폴 안테나 패턴의 영향으로 1 번 지점의 전력이 2 번지점보다 낮은 수신 전력을 가진다고 생각할 수 있다. 즉, 1 번 지점이 거리는 가깝지만 안테나의 바로 아래쪽으로 18.5m 낮은 곳에 위치하므로 음영 지역이 될 수 있으므로 수신 전력이 낮을 수 있다고 생각할 수 있다. 또한 거리가 멀어질수록, LOS 가 확보되지 않을수록 수신 전력이 낮았고 똑같은 전력을 송신하더라도 NLOS 환경에서는 안테나 사이의 수신 파워 차이가 커졌다. 그 예로 NLOS 환경으로 분류된 11 번 지점의 1 번 안테나는 수신파워가 -64.0dBm 인데 반해 바로 옆에 위치하는 2 번 안테나는 수신파워가 -80.7dBm 이므로 16.7dB 의 수신 전력 차이를 보였다.

#### 3.2 수신 의사잡음 시퀀스의 상관

수신된 데이터는 그림 2.1 에 언급한 방식을 이용하여 처리하였다. 아래의 그림 3.1 은 LOS 환경과 NLOS 환경에 대한 대표적인 상호상관 결과이다.



(a) LOS 환경(1 번 지점, 3 번 안테나)



(b) NLOS 환경(10 번 지점, 4 번 안테나)

그림 3.1 상관 결과

또한 전력 지연 프로파일도 상관 결과와 같이 아래의 그림 3.2 에 대표적인 LOS 환경과 NLOS 환경에 대해 나타내보았다.

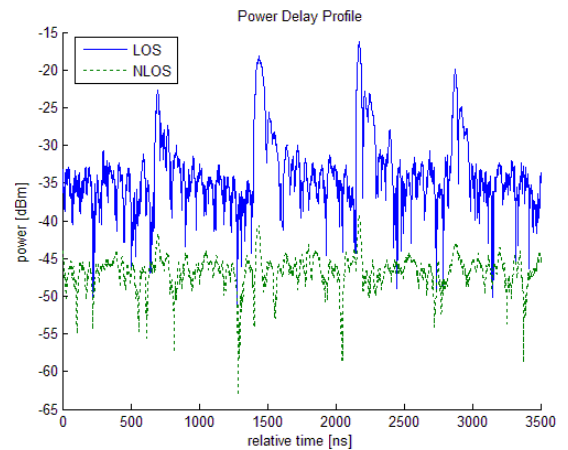
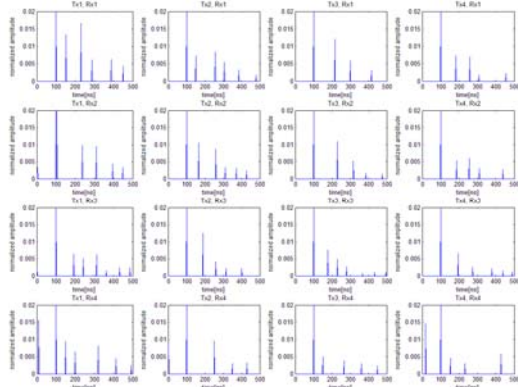


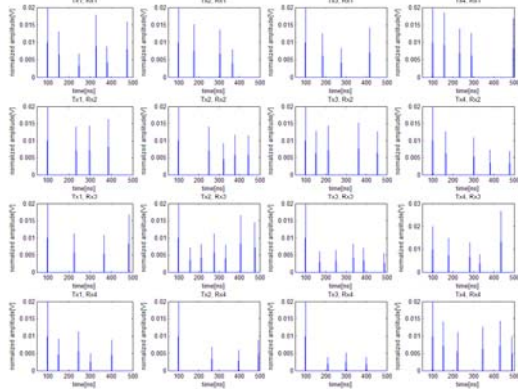
그림 3.2 두 환경의 전력 지연 프로파일

위의 전력 지연 프로파일은 각 지점에서 각 안테나 별로 수신된 의사잡음 시퀀스를 송신단에 쓰였던 의사잡음 시퀀스와 상호상관 하여 구한 값을 dB 단위로 나타낸 것이다. 전력 지연 프로파일을 보고 알 수 있듯이 LOS 환경인 경우 잡음보다 아주 큰 상관 값을 얻어낼 수 있었다. 하지만 NLOS 환경의 경우 상관 값이 LOS 환경보다 작았다. SISO (Single-Input Single-Output) 통신과 비교하여 MIMO 통신에서는 일부 안테나의 신호가 심각한 페이딩(fading)을 겪더라도 나머지 안테나의 신호를 이용하여 송신 신호의 복원이 가능하다.

아래의 그림 3.3 은 대표적인 LOS 환경과 NLOS 환경에 대한 tapped delay line 채널 모델이다.



(a) LOS 환경(1 번 지점)



(b) NLOS 환경(10 번 지점)  
그림 3.3 Tapped delay line 채널 모델

각 지점에서의 충격응답을 살펴보면 LOS 환경에서는 하나의 우세한 신호가 들어오고 나머지 신호는 아주 약하게 들어오는 반면 NLOS 환경에서는 특별히 우세한 신호가 없이 거의 비슷한 크기로 들어오는 경우가 많다. 이는 대부분의 신호가 여러 번의 반사 및 회절을 겪은 후에 수신단에 도착하기 때문이다.

### 3.3 4×4 MIMO 채널 용량 분석

채널 용량이란 신뢰할 수 있는 범위 내에서 보낼 수 있는 최대 데이터 량을 의미한다. Shannon 의 채널 용량 공식을 이용해서 동일한 전력을 송신하는 M 개의 송신 안테나와 N 개의 수신 안테나를 가진 MIMO 채널 용량을 공식화 하면 아래의 식 3.1 과 같다.

$$C = \frac{1}{B} \sum_B \log_2 \det \left[ I + \frac{\rho}{M} H(f) H^H(f) \right] \quad [bps / Hz] \quad (\text{식 3.1})$$

$H$  :  $M \times N$  채널 행렬

$H^H$  :  $M \times N$  채널 행렬의 Hermitian

$\rho$  : 수신단의 평균 SNR(Signal to Noise Ratio)

$I$  :  $M \times N$  단위 대각행렬(diagonal matrix)

$$4 \times 4 \text{ 채널 행렬 } H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} & h_{31} & h_{41} \\ h_{12} & h_{22} & h_{32} & h_{42} \\ h_{13} & h_{23} & h_{33} & h_{43} \\ h_{14} & h_{24} & h_{34} & h_{44} \end{pmatrix} \text{ 은 아래에 표}$$

현된 식 3.2 를 이용하여 정규화 하였다.

$$\sum_{i,j=1}^4 |h_{ij}|^2 = n \quad (\text{식 3.2})$$

그리고 채널의 각 성분이 독립적이고 성분의 크기는 Rayleigh 분포이며  $[0, 2\pi)$  의 범위에서 균등한 위상 분포를 가진다고 가정하면 채널 행렬은 아래와 같은 관계를 가진다.

$$HH^H = I \quad (\text{식 3.3})$$

식 3.3 을 만족하고 SNR 이 20dB 라 가정하면 이면 4 × 4 MIMO 채널의 최대 용량은 18.01 [bps/Hz] 이다.

본 논문에서는 5.8GHz 대역에서 실험을 통해 얻어낸 값을 바탕으로 광대역 채널 용량과 협대역 채널 용량을 계산하였다.

첫 번째 광대역 채널 용량은 먼저 상호상관을 취한 각각의 표본값을 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform, DFT) 한 후 각 주파수에 해당하는 값들을 정규화 하고 각 주파수 마다 16 개의 채널 구성 요소를 이용해서 구하였다. 아래의 그림 3.4 는 두 가지 환경에 따른 광대역 채널 용량을 나타낸 것이다. 파란색 실선으로 표시된 것이 LOS 환경의 채널 용량이고 초록색 점선으로 표시된 것이 NLOS 환경의 채널 용량이다.



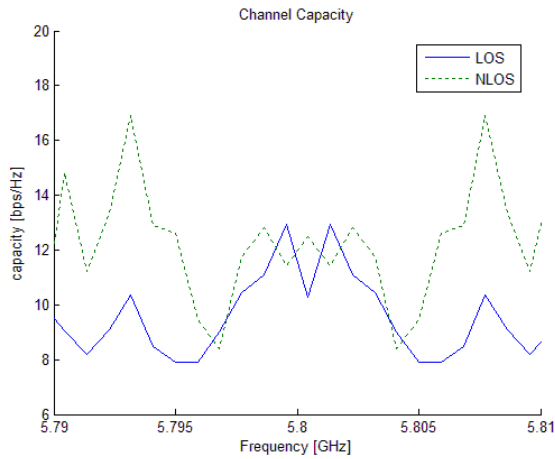


그림 3.4 광대역 채널 용량

두 번째 협대역 채널 용량은 16 개의 채널 구성요소를 하나씩 분리하여 최대 충격응답의 위상을 0 으로, 우세한 신호를 제외한 나머지 신호의 위상을 1000 회 변화시켜가며 구하였다. 그림 3.5 는 협대역 채널 용량을 누적 분포 함수(Cumulative Distribution Function, CDF)로 나타낸 것이다.

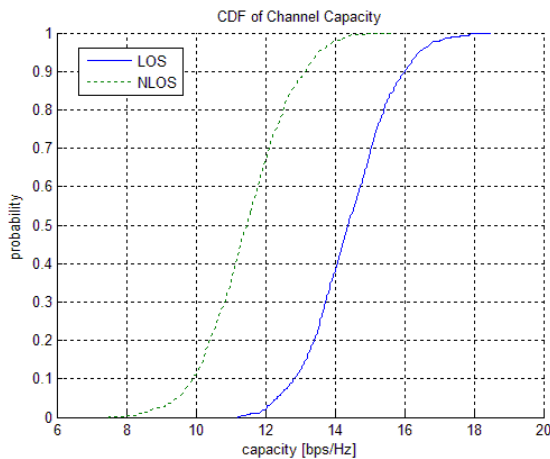


그림 3.5 협대역 채널 용량

아래의 표 3.2 는 CDF 를 이용해 정리한 값이다.

표 3.2 각 지점별 채널 용량 분석(단위, bps/Hz)

Position	minimum	maximum	std.	mean	median
1	10.3890	18.2215	1.2975	14.3383	14.2868
2	12.2852	19.5453	1.2218	15.6779	15.6338
3	11.5067	19.2923	1.2321	15.7078	15.6307
4	7.5552	15.1744	1.2426	11.2009	11.1627
5	6.7100	15.3557	1.3257	11.3679	11.3501
6	7.3875	15.7378	1.2584	11.2820	11.3063
7	6.5764	15.4117	1.2309	11.1926	11.1749
8	9.1554	16.9646	1.2357	13.0619	12.9871
9	7.1429	15.1350	1.2550	11.1745	11.1442
10	7.6346	15.8353	1.2362	11.4514	11.4904
11	7.6444	15.7768	1.2231	11.0780	11.0588
12	7.1358	15.3414	1.2534	10.9830	10.9362

위의 표 3.2 를 이용해서 구한 LOS 환경의 평균 채널 용량은 14.7 [bps/Hz], NLOS 환경의 평균 채널 용량은 11.2 [bps/Hz] 이다.

#### 4. 결론

본 논문은 캠퍼스 환경에서 4×4 MIMO 채널을 측정하고 그 결과를 분석하였다. 같은 SNR 을 가진다고 가정하면 NLOS 환경에서의 채널 용량이 LOS 환경에서의 채널 용량보다 더 크다. 하지만 LOS 환경이 NLOS 환경보다 SNR 이 높으므로 이를 적용하면 LOS 환경의 채널 용량이 더 크다. LOS 환경의 경우 4 개의 수신 안테나의 수신 전력이 거의 동일한 반면 NLOS 환경에서는 페이딩 채널을 겪은 수신 신호 전력과 그렇지 않은 수신 전력 차이가 큰 것이 이를 뒷받침한다.

실제 MIMO 통신을 이용함으로써 4 개의 안테나가 서로 다른 다중경로를 겪으므로 SISO 통신과 비교했을 때 음영 지역에서 수신율을 높일 수 있다. 따라서 다이버시티(diversity)를 이용하여 조합하면 음영지역에서도 좀 더 안정된 통신을 할 수 있을 것이다.

#### 5. Acknowledgement

This paper is supported by BK21 project and Seoul R&BD program(10544).

#### 6. 참고 문헌

- [1] W. C. Y. Lee and Y. S. Yeh, "Polarization diversity for mobile radio," IEEE Transactions on Communications, vol. COM-20, pp. 912-923, May 1972.
- [2] F. Lotse, J.-E. Berg, U. Foreseen, and P. Idahl, "Base station polarization diversity reception in macrocellular systems at 1800MHz," in Proc. 46th Vehicular Technology Conference, vol 3, 1996, pp.1643-1646.
- [3] 송학훈, 측정에 기반한 5.8GHz 대역의 Multiple-Input Multiple-Out-put(MIMO) 무선 채널 특성 분석, Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Feb. 2003.[공학석사 학위 논문]
- [4] Noh-Gyung Kang, Wireless MIMO channel measurement and modeling, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Aug. 2007.[공학박사 학위 논문]
- [5] W. C. Jakes, Microwave Mobile Communications, John Wiley & Sons, New York, 1974
- [6] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, John Wiley & Sons, 2/E, 2000