

도심 환경을 고려한 마이크로파 대역 MIMO 전파 채널 측정 시스템에 관한 연구

Study on the Measurement System for MIMO Channel Considering Urban Environment at Microwave Frequencies

임재우 · 권세웅* · 문현욱* · 박윤현* · 윤영중* · 육종관* · 정진섭** · 김종호***

Jae-Woo Lim · Se-Woong Kwon* · Hyun-Wook Moon* · Yoon-Hyun Park* ·
Young-Joong Yoon* · Jong-Gwan Yook* · Jin-Soub Jeong** · Jong-Ho Kim***

요 약

본 논문은 국내 도심 환경을 고려한 마이크로파 대역 다중 안테나 전파 채널 특성을 연구하기 위한 광대역 MIMO 채널 측정 시스템 구축과 성능 확인을 위한 시험 측정을 기술하였다. 차세대 이동 통신을 고려하여 채널 측정 시스템은 고속의 스위칭 방식과 100 MHz의 광대역 채널 대역폭을 지원하도록 설계되었으며, 4x4 MIMO 채널 측정을 지원한다. 시스템 성능 확인 및 교정을 위한 시험 측정을 분당 빌딩 밀집 지역에서 실시하였다. 3.7 GHz와 8 GHz의 도심 LOS 구간의 시험 측정 데이터를 분석한 결과, 3.7 GHz 및 8 GHz 대역에서의 광대역 경로 손실 지수는 각각 1.79와 1.76으로 측정되었으며, 평균 RMS 지연 확산은 각각 200 ns과 42 ns로 측정되었다. 시험 측정 결과, 본 MIMO 채널 측정 시스템은 실외 도심 환경에서 커버리지와 신호대 잡음비 및 채널 용량 등의 마이크로파 대역 전파 특성 연구에 적합함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the development of wideband MIMO channel sounder and a pilot measurement result is described for research on the multi antenna radio propagation characteristics considering urban environment at microwave frequencies. We developed 4x4 MIMO(BW:100 MHz) channel sounder using the high speed switching mechanism and periodic pseudo random binary signals method considering next generation mobile communication system. A pilot measurement campaign at the urban area of Bundang is presented for confirmation of system performance. From the analysis of measurement data, wideband path loss exponent of 3.7 and 8 GHz band is 1.79 and 1.76. Average RMS delay spread is 200 ns and 42 ns respectively. From the experiment results, operation of this measurement system is confirmed considering research for a coverage, SNR and channel capacity in urban environment at microwave frequencies.

Key words : Radio Propagation, MIMO Channel

I. 서 론

유비쿼터스 정보화 시대 사용자의 IT 이용 패턴이 유선의 광대역 정보 서비스와 동일한 품질의 다

「본 연구는 정보통신연구진흥원 지원 사업으로 수행되었음.」

정보통신부 전파연구소(Radio Research Laboratory, MIC)

*연세대학교 공과대학 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Engineering, Yonsei University)

**이노와이어리스 부설연구소(Research Laboratory, Innowireless)

***한국전자통신연구원 디지털방송연구단(Radio & Broadcasting Technology Laboratory, ETRI)

· 논문 번호 : 20070710-071

· 수정완료일자 : 2007년 9월 11일

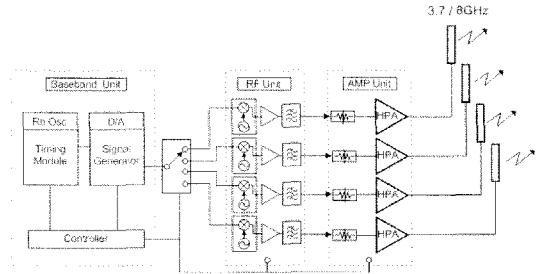
양한 형태의 무선 멀티미디어 서비스를 요구하는 시대적 변화는 차세대 이동 통신(IMT-advanced) 개발의 필요성으로 대두되고 있다^[1]. 이에 국제전기통신연합(ITU)은 현재의 음성, 패킷 데이터 통신에서 고속 이동 중에 100 Mbps, 정지 및 저속에서 1 Gbps까지의 데이터 전송 속도를 기반으로 하는 유무선 통합의 유비쿼터스 서비스 제공이 가능한 IMT-Advanced 표준 및 3 GHz 대역에서의 신규 주파수를 준비 중에 있다^{[2]~[4]}.

지난 수년간 유럽과 미국을 중심으로 MIMO 기술은 채널 용량 증가의 순수 이론적 연구와 실제 무선 시장을 위한 무선 랜 등의 상용 제품 연구가 많이 있었으나, 실제 전파 채널 환경에서 MIMO 기술 성능 실험 및 채널 특성 데이터 수집을 위한 다양한 환경에서의 측정 실험은 시작 단계이다. 대표적으로 MIMO 전파 특성 연구는 Bell Labs의 BLAST(Bell Labs Layered Space-Time)라고 불리는 최초의 MIMO 아키텍처 제안 및 채널 특성 연구와 유럽의 WINNER Project(WP5)를 중심으로 기존의 COST-259와 3-GPP SCM 채널 모델 연구와 연계한 WINNER 채널 특성 연구가 활발히 진행 중이다^{[6],[7]}. 본 연구의 궁극적인 목표는 마이크로파 대역에서 국내 도심의 전파 환경적 특성을 고려한 광대역 다중 안테나 전파 특성을 측정하고 예측하는 기술을 연구하는 데 있다^[8].

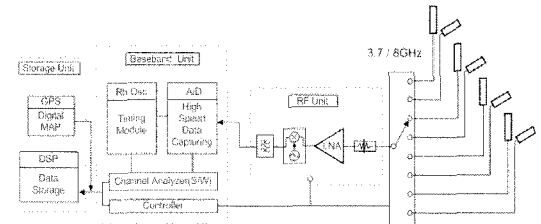
본 논문은 3.7/8 GHz 대역에서 국내 도심 환경을 고려한 다중 안테나 전파 채널 특성을 연구하기 위한 4x4 MIMO 채널 측정 시스템의 개발 및 시험 측정 결과를 중심으로 기술하였다. II장에서 본 연구를 위해 개발된 측정 시스템에 대하여 기술하였으며, III장에서는 광대역 디지털 전파 특성 파라미터를 설명하였다. IV장은 분당에서의 전파 특성 시험 측정 및 분석 결과를 기술하였고, V장의 결론으로 본 논문을 마무리한다.

II. 측정 시스템

본 연구 목표 중 3 GHz 이상 마이크로파 대역의 국내 도심 환경을 중심으로 다중 안테나의 광대역 전파 특성을 분석하기 위한 3.7 GHz와 8 GHz 대역 전파 특성 측정 시스템을 구축하였다. 최근에 전파 특성 측정 기술은 크게 두 가지 방식으로 구분되며, 실



(a) 송신 시스템 개요도
(a) Tx system block diagram



(b) 수신 시스템 개요도
(b) Rx system block diagram

그림 1. 다중 안테나 채널 측정 시스템 개요도
Fig. 1. MIMO channel measurement system.

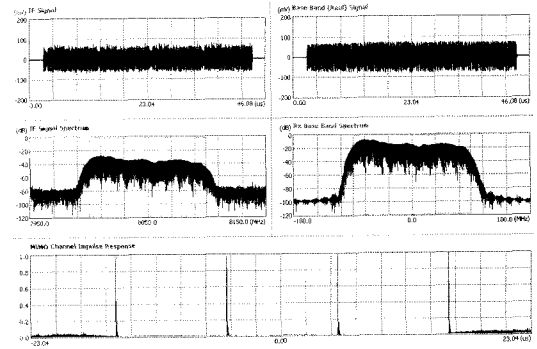
표 1. 시스템 규격

Table 1. System specification.

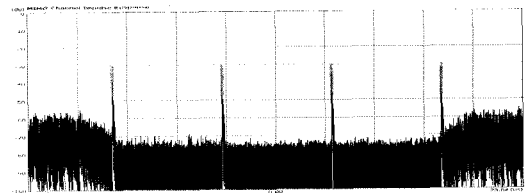
항목	규격	비고
주파수 대역	3.7/8 GHz	
대역폭	100 MHz	
송신 출력	30/27 dBm	
최저 수신 레벨	-80 dBm	
Attenuation range	30 dB	
Attenuation step	1dB	
Output VSWR	1.5:1	
Input impedance	50	
Chip rate	100 Mcps	
PN length	31~4,095 chips	최대값
다중경로 분해능	>3 m	
주파수 안정도	10^{-11}	
Antenna 수	송신 4, 수신 8	

시간 표본화 시퀀스(Real Time Sampled Sequence: RTS) 기법과 의사 잡음 상관(Periodic Pseudo Random Binary Signals: PRBS) 기법이 있다. RTS 기법은 주기

적 다중 톤의 여기 신호를 이용하여 캐리어 주파수로 변조하여 송신하고 채널 통과 후 수신 IF 대역으로 복조하여 전파 특성 정보를 분석하는 방식이다. 의사 잡음 상관 기법은 자기 상관 특성이 임펄스와 비슷한 의사 잡음을 송신 신호로 변조하여 송신하고 채널 통과 후 수신 신호를 송신된 의사 잡음 신호와 상호 상관시켜 채널의 다중 전파 특성 등을 측정하는 방식이다⁷⁾. 본 연구 목적을 위해 개발되어진 다중 안테나의 광대역 전파 특성 측정 시스템은 100 MHz 대역폭을 지원하는 PRBS 방식의 의사 잡음 상관 기법에 다중 안테나 스위칭 기술을 접목시킨 방법을 이용하여 개발되었다. 그림 1은 광대역 다중 안테나 전파 특성 측정 시스템의 송수신 시스템 개요도이다. 현재는 3.7 GHz와 8 GHz 대 측정 시스템이 신호처리부와 스토리 지부는 동일한 아키텍처를 사용하고 마이크로웨이브 두 대역의 RF 자원을 위해 각각의 독립된 두 개의 하드웨어로 구축되었다. 4개의 송신 안테나와 8개의 수신 안테나를 지원하여 동시에 4x4 MIMO 안테나 편파 특성을 측정할 수 있도록 설계되었다. 주요 시스템 기술 사양을 표 1로 정리하여 나타내었다. 그림 2는 측정 시스템의 샘플 측정 신호 검출 이미지를 나타낸다. 그림 2(a)는 수신부의 IF 신호 파형과 스펙트럼 파형을 나타내며, 그림 2(b)는 4번 반복된 4096 PN 코드에 의한 4개의 절대 피크를 탐색한 채널 임펄스 응답을 보여준다. 본 실험에서는 4개의 4096 PN 코드를 반복하고 512 PN 코드를 이용하여 한 주기 프레임 간의 절대 지연 및 피크 탐색이 용이하도록 설계하였다. 이 때 송수신 시스템에서 사용하는 모든 클럭은 10 MHz 류비뒀 오실레이터를 동기 신호 및 기준 클럭으로 사용하여 정확도를 향상시켰으며, 측정 실험 전 송수신 시스템 간 절대 동기를 맞추는 과정을 통해 전파 채널상의 지연 특성을 측정하게 된다. 개발되어진 측정 시스템의 신뢰성 검증을 위해 실험실 테스트와 야외 시험장과 같은 옥외 테스트를 수행하였다. 본 시험 측정을 위해서는 송신국 설치가 용이하도록 고출력 지원이 가능한 고용량의 송신 차량을 이용하였다. 그림 3은 송수신 차량의 지붕에 장착한 안테나 배치도를 나타내며, 그림 4(a)는 장비 calibration을 위한 야외 무반사 시험장에서의 실험 사진을 나타낸다.

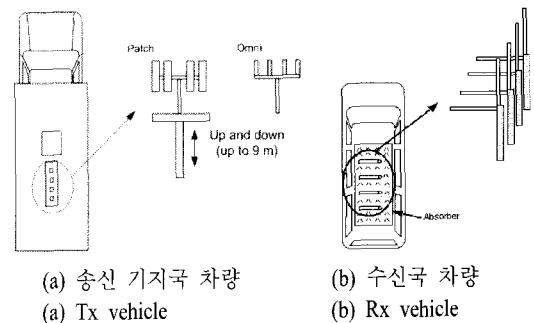


(a) 시스템 검출 신호 파형
(a) Detecting signal of measurement



(b) 채널 임펄스 응답
(b) Channel impulse response

그림 2. 측정 신호 파형
Fig. 2. Measurement signal wave.

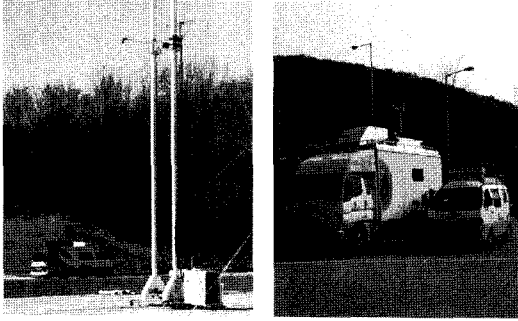


(a) 송신국 차량
(a) Tx vehicle
(b) 수신국 차량
(b) Rx vehicle
그림 3. MIMO 안테나 차량 장착 개요도
Fig. 3. Block diagram of MIMO antenna.

III. 채널 특성 분석 기술

본 장은 하드웨어적인 측정 시스템에서 신뢰성 있는 채널 특성 데이터 획득을 위하여 필수적으로 수반되는 보정(calibration) 과정과 채널 파라미터를 추출하기 위한 분석 기술에 대하여 기술하였다.

본 MIMO 채널 특성 측정 시스템은 실내의 다양한 환경에서의 전파 특성을 측정하기 위해 광대역의 고출력 송신 신호가 요구되었으며, 그로 인해 독립



(a) 야외시험장 실험 (b) 차량 운용 실험
(a) Outdoor experiment (b) Vehicle experiment

그림 4. Calibration 실험 사진
Fig. 4. Calibration experiment picture.

된 4개의 HPA를 포함한 RF 파트로 설계되었다. 측정 시스템에 대한 보정은 채널 사운더의 송수신 장비에 대한 기능들의 정상적인 동작 여부를 확인하고, 실제 측정 시에 발생할 수 있는 오류를 사전에 방지하여, 측정 데이터의 실효성을 사전에 점검함을 그 목적으로 하였다. 주요 내용으로는 송수신 베이스 밴드 신호의 안정성과 송수신 패스 간 isolation 및 지연 특성을 파악한다. 그리고 다이내믹 레인지를 측정하고 케이블 등 기타 손실 특성을 파악한다. 일반적으로 측정되어진 채널 행렬은 식 (1)과 같다⁹⁾.

$$\overline{H}_M = \overline{R} \overline{H} \overline{T} \quad (1)$$

여기서, \overline{R} 은 수신기의 응답 행렬이고, \overline{T} 는 송신기의 응답행렬이며, \overline{H} 는 순수하게 채널의 정보만을 갖는 순수 채널 행렬이다. Calibration 측정을 통해 얻어지는 송수신 시스템들의 시스템 응답 행렬로부터 실질적인 채널 행렬은 식 (2)를 통해 계산한다.

$$\overline{H} = \overline{R}^{-1} \overline{H}_M \overline{T}^{-1} \quad (2)$$

그림 6은 차량 운용 실험 시 측정된 샘플 PDP의 원시 그래프(그림 5)에서 피크 검출 결과로 4x4의 MIMO 안테나 조합 중 송신 안테나 1번(Tx1)에 대한 수신 안테나 4개의 PDP(Power Delay Profile) 그림이다.

3-1 광대역 MIMO 채널 파라미터

MIMO 통신 채널을 통해 전송되어지는 신호는 기존 단일 안테나 시스템 채널에서 발생하는 전자파 전파 현상과는 다른 현상을 겪게 되며, 다중 경로 페

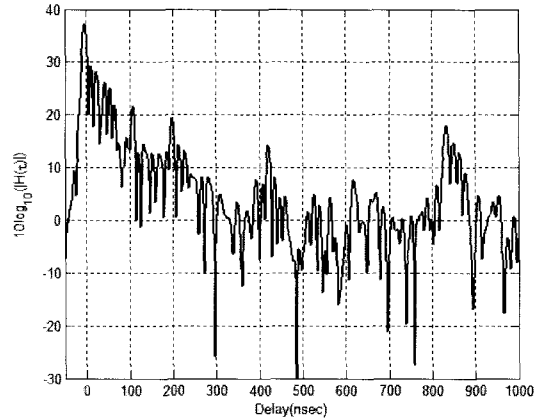


그림 5. 원시 PDP 그래프
Fig. 5. Original PDP graph.

이당을 겪으면서 채널은 각 확산과 시간 지연 확산 그리고 도플러 확산을 일으킨다.

3-1-1 광대역 전력

광대역 채널 전력은 채널의 임펄스 응답의 합으로 나타나며, 다음과 같이 정의한다.

$$P_{wb} = \sum_{i=0}^{N-1} a_i^2 \quad (3)$$

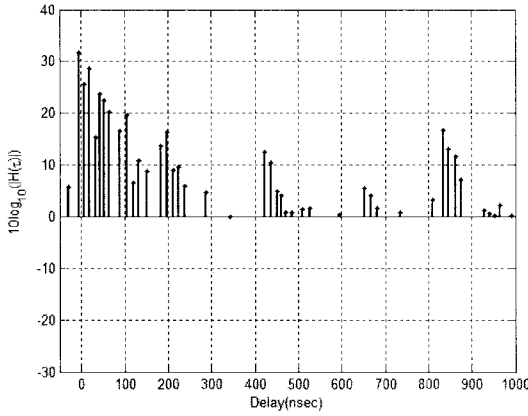
여기서 a_i 는 i 번째 임펄스의 전력이고, N 은 임펄스의 개수이다.

3-1-2 시간 지연 파라미터

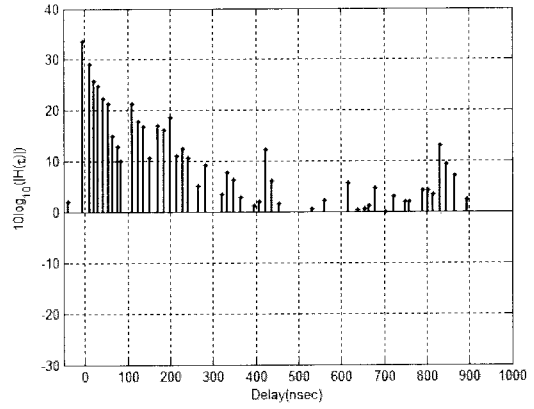
PDP는 초과 지연 시간에 대한 채널 임펄스 응답의 전력에 따른 함수이다. PDP에 대한 일반적인 시불변 정의는 전체 시간과 지연 시간에 의한 임펄스 응답으로 정의한다.

IV. 실외 MIMO 전파 특성 시험 측정

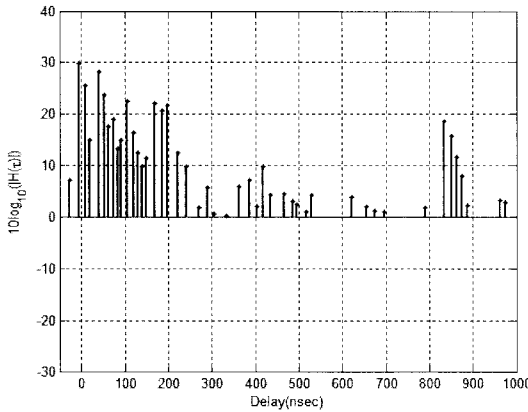
본 장에서는 개발되어진 측정 시스템의 성능 시험 및 시범 운용을 위해 분당 저층 다세대 빌딩 밀집 지역에서 실시된 MIMO 전파 특성 측정 실험 결과에 대하여 기술하였다. 3~4층의 다세대 빌딩은 밀집 주거 지역으로 도로폭은 좁고 도로상에 전신주나 주차차량이 존재하는 작은 도심 빌딩 환경과 비슷하며, 특히 빌딩 협곡 특성이 존재하는 환경으로 볼 수



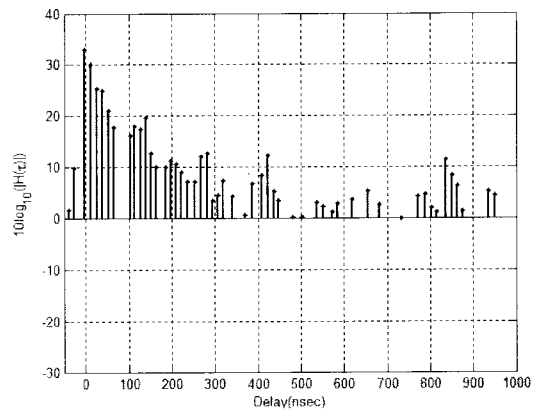
(a) Tx1-Rx1



(b) Tx1-Rx2



(c) Tx1-Rx3



(d) Tx-Rx4

그림 6. MIMO PDP 피크 검출 결과

Fig. 6. MIMO PDP peak detection results.

있다. 송신 차량에 설치된 안테나는 높이 4 m의 선형 배열 타입으로 피코셀이나 멀티 홉 채널 환경의 LOS와 NLOS 시나리오를 고려하였다. 출력 제한으로 인해 단거리 환경의 가능한 동일한 조건의 측정 환경을 유지하여 3.7 GHz와 8 GHz의 두 대역의 MIMO 측정 시스템에 대한 성능 및 전파 특성 채널 파라미터 분석을 수행하였다. 그림 7은 분당 지역 측정 루트에 대한 디지털 지도와 현장 사진을 나타낸다.

4-1 Wideband Path Loss

광대역 수신 전력은 채널 임펄스 응답의 전력 합으로 계산되며 1 m 단위로 평균값을 취하였다. 그림 8은 거리별로 수신된 전계강도의 상대적 특성을 나타낸다. 경로 손실 지수는 3.7 GHz와 8 GHz에 대해 각각 1.79와 1.72로 도로폭이 좁고 밀집되어 있는 가

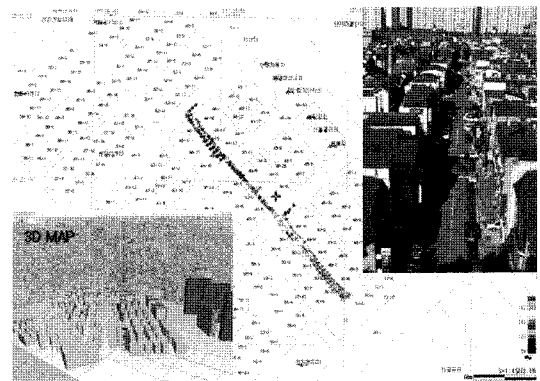


그림 7. 측정 루트 이미지

Fig. 7. Measurement route image.

시 환경에서 도심 협곡 효과에 의해 상대적으로 낮은 경로 손실지수를 나타내고 있다. 그러나 8 GHz의

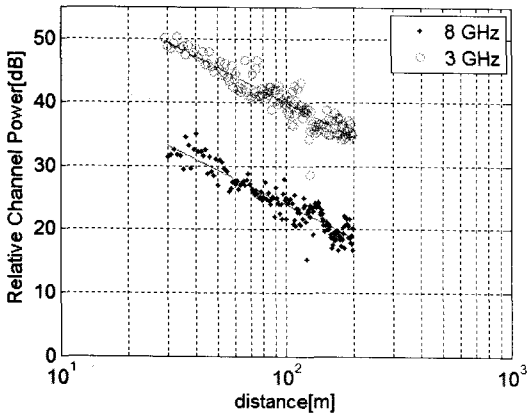


그림 8. 거리별 수신 전계 강도 특성
Fig. 8. Received signal strength with distance.

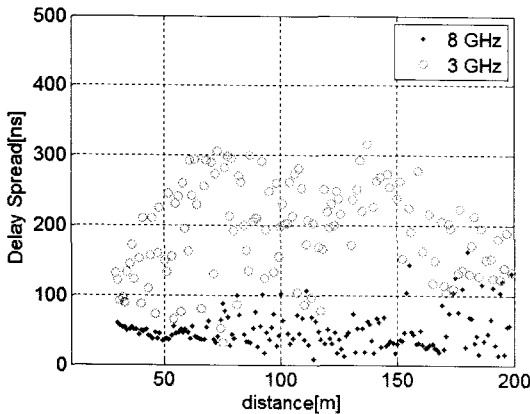


그림 9. 거리별 시간 지연 확산 특성
Fig. 9. Delay spread with distance.

경우, 같은 거리에서도 파장이 작기 때문에 신호의 크기가 작아 실제 응용에서도 커버리지 문제가 발생할 수 있음을 이 결과로부터 유추할 수 있다.

4-2 RMS Delay Spread

광대역 채널 특성 파라미터인 지연 확산 값은 4×4의 다중 안테나 조합별 생성되는 채널 임펄스 응답에서 추출된다. 그림 9는 4×4의 16개 송수신 안테나 조합 중 Tx1과 Rx1의 거리별 시간지연 확산 특성을 분석한 그래프이다. 주파수별 시간 지연 확산 파라미터는 크게 차이가 나며, 3.7 GHz에서 평균 200 ns, 8 GHz에서 평균 42 ns으로 계산되었다. 이는 같은 거리라도 경로 손실이 크게 발생하는 높은 대역의

특성에 의해 결정되는 것으로 두 대역 시스템이 같은 시스템 이득 특성을 갖는다면 8 GHz 채널이 상대적으로 직진성이 강한 특성을 갖기 때문으로 설명할 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 3.7/8 GHz 대역을 중심으로 국내 도심 환경을 고려한 다중 안테나 전파 채널 특성을 연구하기 위한 광대역 MIMO 채널 측정 시스템 개발 및 시험 측정 결과를 기술하였다. 고속의 스위칭 방식과 의사 잡음 신호 기법을 이용한 100 MHz 대역폭의 4×4 MIMO 채널 측정 시스템을 구현 및 채널 파라미터 추출을 위한 calibration 방법을 설명하였다. 시스템 성능 확인을 위한 도심 환경 시험 측정을 실시한 결과, 광대역 수신 전계강도의 손실 지수는 3.7 GHz와 8 GHz에서 179와 1.72로 비슷한 값을 보였으나, 거리별 지연 확산 특성에서 전파의 반사 회절 특성이 상대적으로 안 좋은 8 GHz의 값이 더 작게 분석되었다. 실험 결과를 통해 개발 구축되어진 MIMO 채널 측정 시스템은 실외 도심 환경에서 커버리지와 신호대 잡음비 및 채널 용량 등의 전파 특성 연구를 위해 성공적으로 동작함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Rec. ITU-R M.1645, Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT-2000 and Systems Beyond IMT-2000, Jun. 2003.
- [2] Rec. ITU-R M.2074, Radio Aspects for the Terrestrial Component of IMT-2000 and Systems Beyond IMT-20000, Sep. 2006.
- [3] Rec. ITU-R M.2078, Estimated Spectrum Bandwidth Requirements for the Future Development of IMT-2000 and IMT-Advanced, Sep. 2006.
- [4] Rec. ITU-R M.2079, Technical and Operational Information for Identifying Spectrum for the Terrestrial Component of the Future Development of the IMT-2000 and IMT-Advanced, Sep. 2006.
- [5] Arogyaswami Paulraj, *Introduction to Space-Time Wireless Communication*, Cambridge, 2003.
- [6] Dmitry Chizhik, Jonathan Ling, and R. A. Valen-

zuela, "MIMO Measurements and Modeling in Manhattan", *IEEE J.Selected Area Commun.*, vol. 21, pp. 321-331, Apr. 2003.

- [7] IST-2003-507581 WINNER D5.4 v1.4, *Final Report on Link Level and System Level Channel Models*, Nov. 2003.
 [8] H. Moon, S. Kwon, H. Kim, J. Lim, and Y. J.

Yoon, "GBSBEM for indoor Line-Of-Sight(LOS) MIMO channel using polarization diversity at 8 GHz bands", *International Symposium on Antennas and Propagation 2007*, pp. 3017-3020, Jun. 2007.

- [9] J. Wallace, *Modeling Electromagnetic Wave Propagation in Electrically-Large Structures*, Ph.D. Dissertation, Brigham Young University, 2002.

임 재 우



1995년 2월: 경원대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 경원대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정
 1997년 6월~현재: 정보통신부 전

파연구소 공업연구사
 [주 관심분야] 스펙트럼 관리공학, 전파전파, 통신 등

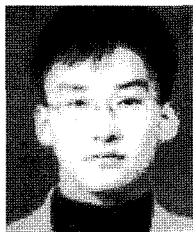
박 윤 현



1987년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 3월: 오사카대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 2월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정
 1987년 5월~현재: 정보통신부

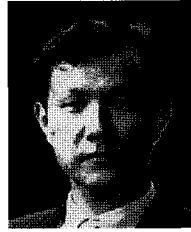
[주 관심분야] 전파관리 공학, 공학

권 세 응



1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파 등

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
 1993년~현재: 연세대학교 교수

[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파 등

문 현 옥



2005년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2007년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파

육 종 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년: University of Michigan (공학박사)
 2000년~현재: 연세대학교 교수

[주 관심분야] Computational Electromagnetics 등

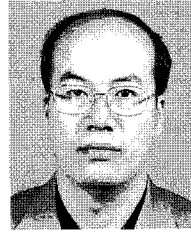
정 진 섭



1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 5월: Georgia Institute of Technology ECE 박사
2000년 11월~현재: (주)이노와이리스 부사장/연구소장

[주 관심분야] 전파신호처리, 정밀계측기 등

김 중 호



1986년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1989년 2월~현재: 한국전자통신연구원 전파방송연구단 책임연구원

[주 관심분야] 전자전파, 스펙트럼공학, EMI/EMC 등