

도심 협곡 환경에서의 마이크로파 대역 MIMO 채널 특성에 관한 연구

정회원 임재우*, 권세웅**, 문현욱**, 박운현**,
 종신회원 윤영중**, 육종관**, 정회원 정진섭***, 김종호****

Study on the MIMO Channel Characteristics Considering Urban Canyon at the Microwave Bands

Jae-Woo Lim*, Se-Woong Kwon**, Hyun-Wook Moon**, Yoon-Hyun Park** *Associate Members*,
 Young-Joong Yoon**, Jong-Gwan Yook** *Lifelong Members*,
 Jin-Soub Jeong***, Jong-Ho Kim****, *Regular Members*

요약

본 논문은 도심 협곡 환경에서 마이크로파 대역 다중안테나 이용기술의 주파수 이용효율 특성을 파악하기 위한 3.7GHz와 8GHz의 MIMO 측정 데이터 및 채널 용량을 분석한 결과를 기술하였다. 채널 측정 데이터는 본당의 3-4층 빌딩 밀집지역에서 실험된 데이터를 이용하였으며, 3.7 GHz와 8 GHz대역 전파특성 파라미터를 추출하여 비교 분석하였다. 다중안테나 사용에 따른 채널용량을 분석한 결과 3.7 GHz와 8 GHz 대역의 2X2 다중안테나 환경에서 9.1 bps/Hz와 5 bps/Hz으로 분석되었으며, 4X4 안테나 이용 시 각각 21 bps/Hz와 12.5 bps/Hz로 분석되었다. 이를 통해 실외 도심협곡 환경의 신호 대 잡음비와 커버리지 특성을 고려해 볼 때 3.7 GHz대역의 주파수 전송효율이 8 GHz 보다 우월한 특성을 보임을 확인하였다.

key Words : Propagation, MIMO Channel, Capacity

ABSTRACT

In this paper, in order to research spectrum usage efficiency in urban canyon environment at the microwave band, measurement and channel capacity analysis of multi-antenna technology is described. The measurement data obtained from 3 - 4 stories building area used and the propagation characteristics at the 3.7 and 8GHz band are analysed and compared. In case of 2x2 MIMO, channel capacities of 3.7 and 8 GHz band are calculated to 9.1 bps/Hz and 5 bps/Hz and in case of 4x4 MIMO, 21 bps/Hz and 12.5 bps/Hz respectively. Considering the coverage, SNR and channel capacity in urban environment, MIMO propagation characteristics of 3.7 GHz are more predominate than those of 8 GHz.

I. 서론

ITU는 3 - 5 GHz대역을 중심으로 기존 이동통

신 시스템보다 광대역의 대용량 데이터 정보 전송 가능한 IMT-Advanced용 주요 주파수 자원으로 검토 중에 있다^[1]. 또한 2010년 경 IMT-Advanced 무선

* 본 연구는 정보통신연구진흥원 지원사업으로 수행되었음

* 정보통신부 전파연구소(jwlim@mic.go.kr), ** 연세대학교 공과대학 전기전자공학과(iceberg@yonsei.ac.kr),

*** 이노와이어리스 부설연구소, **** 한국전자통신연구원 디지털방송연구단

논문번호 : KICS2007-07-316, 접수일자 : 2007년 7월 19일, 최종논문접수일자 : 2007년 9월 20일

접속에 관한 ITU 권고안을 제정하기 위한 표준화작업이 내년부터 본격화될 전망이다. 기존의 이동통신 성능과 달리 차세대이동통신에서는 고속 이동 중에 100Mbps, 정지 및 저속에서 1Gbps 까지의 데이터 전송속도를 기반으로 하는 유무선 통합의 유비쿼터스 서비스 제공할 것이다^{[2][3]}. 최근 이를 위해 광대역 통신 시스템 구현 및 서비스를 위한 주파수 부족현상을 해결하는 주요 핵심 기술로 다중안테나(MIMO) 기술이 대두되고 있으며, 이는 다중경로가 많은 환경에서 최적의 결합을 통해 전송효율을 극대화시킬 수 있는 기술로 알려져 있다. 이론적으로 다중 안테나 시스템의 채널 용량은 안테나 수에 비례하여 증가하며^{[4][5]}, 레이레이 환경과 같은 다중 경로 신호가 풍부한 공간적 환경에도 큰 영향을 받는다. 그러나 신호대 잡음비가 충분히 확보되지 못하면 MIMO 성능을 충분히 발휘되지 못하는 점을 감안하면 마이크로파 대역과 같은 높은 주파수를 이용한 통신 시스템은 신호의 시간, 공간적 특성과 신호대 잡음비의 관계에 대한 규명 또한 중요한 연구 테마라 하겠다^[6]. 기존의 채널특성 연구는 주로 2 GHz대역 이하에 해당하며, 향후 이용 빈도가 높을 것으로 예상되는 3 GHz대 이상의 마이크로파 영역에서의 전파특성은 현재 요구되고 있는 것보다 더 다양한 채널 특성 정보가 필요하다. 또한 시스템 측면에서도 주파수가 높아짐에 따라 안테나 크기 감소 및 다중 안테나의 사용이 더욱 간편해질 수 있으나, 높은 경로 손실로 인해 셀 반경은 점점 작아 질 것으로 예상되어 기존의 무선통신 환경보다 더욱 세분화 된 피코셀이나 핫스팟 또는 다양한 마이크로 셀 중심의 세분화된 MIMO 채널 특성 연구가 요구된다.

본 논문은 도심 빌딩 협곡 환경에서 3.7GHz와 8 GHz대역을 중심으로 다중안테나 이용기술의 주파수 이용효율 특성을 파악하기 위한 MIMO 채널 측정 및 채널 용량을 분석한 결과를 중심으로 기술하였다.

II. MIMO 채널

본 장은 원시 측정 데이터로부터 광대역 MIMO 채널 파라미터 및 채널 용량 특성을 도출하기 위해 필요한 채널 파라미터 및 채널용량 수식에 대하여 기술하였다.

2.1 광대역 MIMO 채널 파라미터

MIMO 통신 채널을 통해 전송되어지는 신호는 기존 단일 안테나 시스템 채널에서 발생하는 전파와 전파 현상과는 다른 현상을 겪게 되

며, 다중경로 페이딩을 겪으면서 채널은 각 확산과 시간지연 확산 그리고 도플러 확산을 일으킨다^[7]. 각 확산(angular spread) 특성은 공간에 있어 다른 페이딩을 겪음으로서 공간적으로 확산되어 수신되는 정도를 나타내고 이는 공간 상관(spatial correlation)특성을 야기하며, 확산이 심화될수록 일정한 거리가 떨어진 안테나의 신호가 겪는 페이딩의 상관도는 떨어지게 된다. 시간지연 확산은 높은 전송율의 데이터에 대한 시간 분해능을 떨어뜨리는 요인이 되기 때문에, 전송율의 상한은 채널의 시간 지연 특성에 의해 결정되게 된다. 시변 채널에 대해 시간과 공간의 함수로 지연확산을 갖고 수신되어진 다중 안테나 수신신호는 아래 식과 같이 정의된다.

$$\bar{y}(t, r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{H}(\tau; t, r) \bar{p}(t-\tau) d\tau + \bar{n}(\tau; t, r) \quad (1)$$

여기서 \bar{H} 는 다중 입출력(MIMO)의 치환행렬로 식 (2)로 정의된다.

$$\bar{H}(\tau; t, r) = \sum_{n=1}^N H_n(\tau, t, r) \quad (2)$$

2.1.1 지연 시간 파라미터

PDP(Power Delay Profile)는 초과 지연 시간에 대한 채널 임펄스 응답의 전력에 따른 함수이다. PDP에 대한 일반적인 시 불변 정의는 전체 시간과 지연 시간에 의한 임펄스 응답 $h(t, \tau)$ 를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$P(t, \tau) |_{t=\Delta t=0} = E[|h(0, \tau)|^2] \quad (3)$$

여기서 τ 는 초과 지연 시간으로 처음 도착한 성분 에 대해 다중 경로에 의한 상대적인 지연 시간을 나타내며 h 는 채널 임펄스 응답이다. 지연 시간의 PSD(Power Spectral Density)로부터 채널의 시간에 대한 왜곡 특성을 설명할 수 있다. 지연 시간의 PSD로부터 평균 지연 시간은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i \tau_i R_h(\tau_i)}{\sum_i R_h(\tau_i)} \quad (4)$$

또한 위 식을 이용하여 RDS (Rms Delay Spread)를 구하면 식 (5)과 같다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_i (\tau_i - \bar{\tau})^2 R_h(\tau_i)}{\sum_i R_h(\tau_i)}} \quad (5)$$

2.1.2 채널 용량

MIMO 시스템의 채널 용량은 식 (1)의 수신 신호 \bar{y} 로부터 얻을 수 있는 \bar{p} 에 대한 최대 상호 정보(mutual information)의 최대값으로 정의되고, 이는 식 (6)와 같다^[4].

$$C = \log_2 \left[\det \left(\bar{I}_{N_R} + \bar{H} \bar{R}_X \bar{H}^H \right) \right] \text{ bps/Hz}, \quad (6)$$

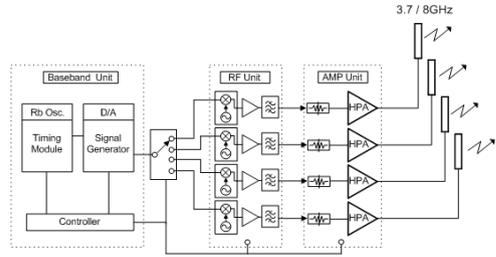
여기서, \bar{I}_{N_R} 은 $N_R \times N_R$ 의 항등 행렬이고, $R_X = E \{ \bar{p} \bar{p}^H \}$ 은 입력 신호의 공분산 행렬(covariance matrix)을 나타낸다. 채널 용량은 채널 \bar{H} 에 따라 변하는 확률 변수이기에 일반적으로 채널에 대해 평균을 취한 평균 용량(ergodic capacity)으로 시스템의 용량을 비교하며 이는 식 (7)과 같다.

$$C_E = E_{\bar{H}} \left[\log_2 \det \left(\bar{I}_{N_R} + \bar{H} \bar{R}_X \bar{H}^H \right) \right] \text{ bps/Hz}, \quad (7)$$

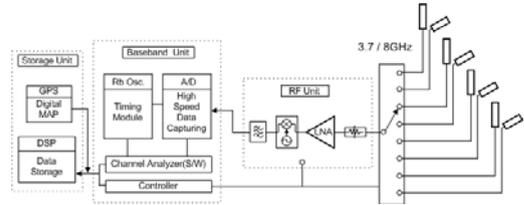
각각의 송신 안테나가 동일한 평균전력을 갖고, 상호 독립일 경우 식 (6)의 $R_X = (\rho/N_T)I_{N_T}$ 와 같고 이를 통해 식 (6)는 식 (8)이 된다.

$$C = \log_2 \left[\det \left(\bar{I}_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \bar{H} \bar{H}^H \right) \right] \\ = \sum_{i=1}^{\min(N_T, N_R)} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_T} \lambda_i \right) \text{ bps/Hz}, \quad (8)$$

여기서, ρ 은 송신 안테나로부터 방사되는 전력의 총합을 나타내고 λ_i 는 $\bar{H} \bar{H}^H$ 의 영이 아닌 고유값을 나타낸다. 채널 정보가 알려진 경우는 λ_i 를 통하여 분리되어진 채널에 워터필링 알고리즘 등을 사용하여 ρ/N_T 를 서로 다른 전력으로 전송함으로써 채널 용량을 증가시킬 수 있다. 주파수 Flat 채널을 가정하고 각각 채널의 SINR이 같고, 각각 분리된 채널로 같은 전력의 심볼들이 전송되며, 평



(a) 송신 시스템 개요도



(b) 수신 시스템 개요도

그림 1. 다중안테나 채널측정 시스템 개요도

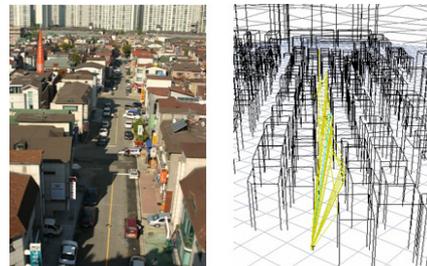
균 잡음 간섭의 전력이 같다고 가정하면, 위의 채널 용량은 식 (9)과 같다.

$$C = \sum_{i=1}^{\min(N_T, N_R)} \log_2 (1 + \lambda_i \text{ SINR}) \quad (9)$$

여기서, 고유값 성분들의 분포는 채널의 분리도를 나타내며, 이는 채널 복원 가능성을 나타내는 중요 파라미터이다.



(a) 측정 루트



(b) 측정지역 사진 및 3차원 환경 지도

그림 2. 측정루트 및 환경 이미지

III. MIMO 측정

3 GHz 이상 마이크로파 대역의 MIMO 채널특성을 측정하기 위한 시스템을 구축하였다^{[8][9]}. 본 측정 시스템은 3.7과 8 GHz대역을 독립적으로 지원하며, 의사잡음 상관기법을 적용하여 100 MHz의 광대역 채널과 고속 스위칭 기술을 접목시킨 4×4 다중안테나 채널을 지원하도록 설계되었다. 그림 1은 광대역 다중안테나 전파특성 측정시스템의 송수신 시스템 개요도이다. 실외 환경 측정실험을 위해서는 측정 시스템 이외에 수신차량과 송신국 사이트가 필요한데, 본 시험 측정은 송신국 설치가 용이한 고출력의 송신차량을 이용하였다. 기본적으로 4×4의 MIMO 채널 특성을 측정할 수 있도록 선형배열 안테나 타입으로 배치되었으며, 특히 3.7 GHz대 측정시스템은 그림 1(b)의 수신 시스템 안테나 배치도와 같이 편파 특성을 동시에 측정하기 위한 4개의 안테나를 추가 장착하도록 하였다. 본 연구에서는 안테나 간 이격을 4 λ 이상으로 배치하여 공간 상관 특성이 고려되지 않음을 가정하였다. 스냅샷을 이용한 4×4의 MIMO 채널특성 측정은 각각 독립된 16개의 SISO 채널특성이 순차적인 조합에 의해 측정된다. 측정 루트는 3-4층의 다세대 건물 밀집지역으로 좁은 도로폭(약 5m)의 빌딩협곡 특징이 존재하는 곳이다. 송신 차량에 설치된 안테나는 높이 4m의 선형배열 타입으로 피코셀이나 멀티 홉 채널 환경의 도심협곡과 같은 LOS 환경의 측정 시나리오를 고려하였으며, 가능한 동일한 조건의 측정환경을 유지하여 3.7 GHz와 8 GHz 두 대역의 MIMO 전파특성을 비교 분석 할 수 있도록 하였다. 측정 시스템으로부터 얻어지는 안테나 조합별 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response)의 측정 원시 데이터는 2장에서 제시한 광대역 전파특성 파라미터인 광대역 수신전력, 지연확산 특성 등을 후처리 과정(Post Processing)을 통해 도출하게 된다. 그림 2(a)는 측정루트를 GIS 상에 표시한 이미지이며, 그림 2(b)는 측정이 보다 원활히 진행될 수 있도록 사전 신호 예측 등 정밀 분석을 위한 3D 정밀 수치지도 분석 이미지를 나타낸다.

IV. 채널 용량 분석

채널 용량은 측정데이터에서 도출된 광대역 채널 파라미터를 기반으로 하여 2장의 2.1.2 절에서 제시한 수식을 통해 계산된다. 각 위치에 해당하는 평균 신호 대 잡음비와 다중 안테나에 송수신된 채널의 임펄스

응답이 채널 용량을 결정하는 주요 파라미터이다.

그림 3은 시간지연확산의 누적확률분포를 나타낸다. 주파수별 시간 지연 확산 파라미터는 크게 차이가 나며 3.7 GHz에서 평균 200 ns, 8 GHz에서 평균 42 ns 으로 분석된다.

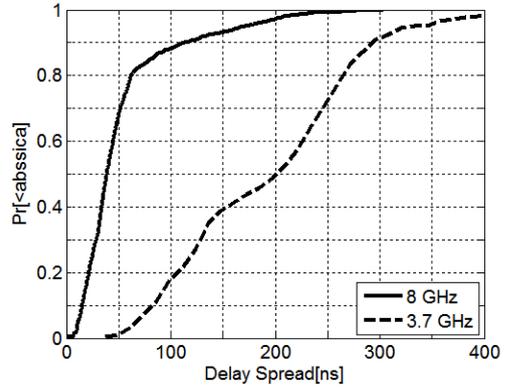


그림 3. 시간지연확산 누적확률분포

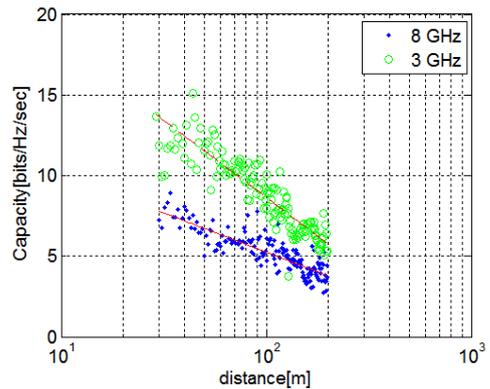


그림 4. 거리별 용량 특성

이는 송수신기 간 거리가 200여 미터 지점까지 멀어지면서 상대적으로 높은 주파수인 8 GHz 신호 중 직접파 이외의 반사, 회절에 의한 간섭파의 영향이 급격히 줄어드는 현상에서 원인을 해석할 수 있다. 그림 4는 두 대역의 거리별 용량 특성과 그림 5는 수신 전계강도와 채널용량 간의 상관관계를 나타낸다. 거리에 따른 용량손실은 상대적으로 3.7 GHz 대역이 8 GHz의 용량 손실보다 심하게 나타나고 있다. 채널 용량을 정의하는 식 (9)에서 알 수 있듯이 광대역 수신 신호의 세기와 시간 지연 특성이 채널 용량을 결정짓는 주요 파라미터로 작용한다. 또한 빌딩 협곡과 같은 측정 환경도 원인으로 해석되며 시간 지연확산 파라미터 분석에서와 마찬가지로 송수신기가 가시 환경에 위치하면서 3.7 GHz 대역의 다중 경로는 큰

세기의 직접파와 반사파, 작은 세기의 산란파로 이루어지게 되며 신호대 잡음비가 열화되는 경우 작은 산란파는 빠르게 잡음 레벨 아래로 감소하여 검출되지 못하고 8 GHz와 유사한 다중 경로 특성이 발생하게 되기 때문에 가정할 수 있다. 이러한 특성은 그림 5의 수신 전력과 용량의 상관관계에 의해서도 관찰되며 3.7 GHz의 경우 기울기가 더욱 급격하게 변하고 있다. 그리고 주파수 및 안테나별 용량 특성을 비교하기 위해 안테나별로 채널의 누적 확률 분포를 계산하였으며, 그림 6에 나타내었다^[10]. 채널 용량은 동시에 측정된 4 × 4 안테나에서 4 × 4와 2 × 2 안테나를 가상적으로 구성하여 계산하였으며 4 × 4 안테나의 용량이 2 × 2 보다 높은 결과와 더불어 8 GHz에서는 4 × 4 안테나를 적용하였을 때 용량 증가가 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다. 다중 안테나 사용에 따른 채널용량을 분석한 결과 3.7 GHz와 8 GHz 대역의 2X2 다중안테나 환경에서 9.1 bps/Hz와 5 bps/Hz 로 분석되었으며, 4X4 안테나 이용 시 각각 21 bps/Hz와 12.5 bps/Hz로 분석되었다.

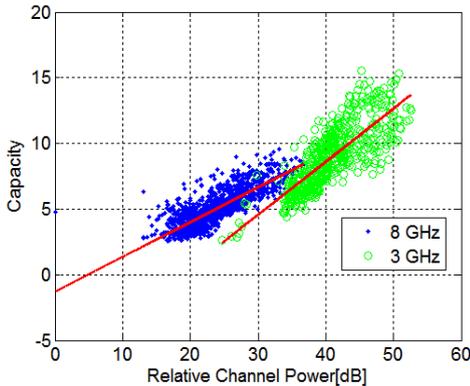


그림 5. 수신 전계강도와 용량 간 상관관계

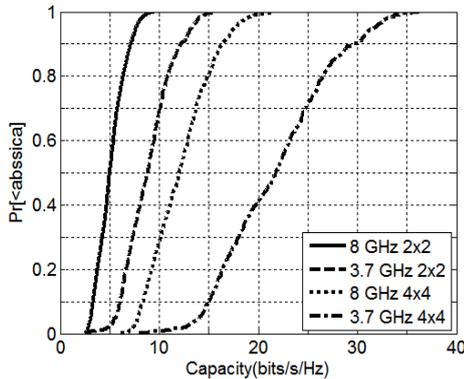


그림 6. 용량 누적 확률 분포

V. 결론

본 논문은 도심 협곡 환경에서 3.7 GHz와 8 GHz대역 MIMO 채널 용량 특성을 파악하기 위한 측정과 분석 결과를 기술하였다. 측정 시험을 위해 고속 스위칭 방식의 채널 대역폭 100 MHz의 4X4 MIMO 채널 측정시스템을 이용하였으며, 분당의 3-4층의 다세대 건물 밀집지역의 좁은 도로폭의 빌딩협곡 특징이 존재하는 곳에서 채널 용량 분석을 위한 측정데이터를 수집하였다. 다중안테나 사용에 따른 채널용량을 분석한 결과 3.7 GHz와 8 GHz 대역의 2X2 다중안테나 환경에서 9.1 bps/Hz와 5 bps/Hz 로 분석되었으며, 4X4 안테나 이용 시 각각 21 bps/Hz와 12.5 bps/Hz로 분석되었다. 따라서 실외에서 커버리지와 신호 대 잡음비, 신호의 용량 등을 고려하였을 때 3.7 GHz가 8 GHz보다 우월한 특성을 보임을 확인하였다. 또한, 8 GHz는 3.7 GHz와 비교하였을 때 보다 낮은 채널 용량을 갖지만 거리에 따라 상대적으로 균일한 용량을 제공하는 특성을 이용할 경우 실내에서 피코셀간 간섭 방식을 통한 용량 증대, LPI(Low probability of Interception) 등의 특성에 적합할 것으로 판단되며, 이에 대한 연구도 지속적으로 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 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
- [2] Rec. ITU-R M.2074, "Radio aspects for the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000", Sep. 2006
- [3] Rec. ITU-R M.1645, "Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000", June 2003
- [4] Arogyaswami Paulraj, "Introduction to space-time wireless communication" Cambridge, 2003
- [5] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas" Bell Labs Tech. J., vol. 1, no. 2,

pp.41-59, Autumn 1996

- [6] Kei SAKAGUCHI, "MIMO Channel Capacity in an Indoor Line-Of-Sight(LOS) Environment", IEICE Trans. Commun., Vol.E88-B, NO.7 JULY 2005
- [7] IST-2003-507581 WINNER D5.4 v1.4, Final Report on Link Level and System Level Channel Models, November 2003
- [8] Hyunwook Moon, Sewoong Kwon, Hyunrak Kim, Jaewoo Lim, and Youngjoong Yoon, "Extended Geometrically Based Single Bounce Elliptical Model for Indoor Line-of-Sight MIMO Channel Using Polarization Diversity at 8 GHz bands," 2007 IEEE AP-S, Hawaii, pp.3017-3020, June 2007
- [9] 임재우, 권세웅 외 6명, "도심환경을 고려한 마이크로파 대역 MIMO 전파채널 측정 시스템에 관한 연구" 전자파학회 논문지 2007년 도 10월호 게재예정
- [10] Dmitry Chizhik, "Multiple-Input-Multiple-Output Measurement and Modeling in Manhattan," *IEEE J.Select. Area Commun.*, vol. 21, NO. 3, Apri. 2003

임 재 우 (Jae-Woo Lim)

정회원



1995년 2월 경원대학교 전자공학과 졸업

1997년 2월 경원대학교 전자공학과 석사

2002년 3월~현재 연세대학교 전자공학과 박사과정

1997년 6월~현재 정보통신부 전파연구소 공업연구사

<관심분야> 스펙트럼 관리공학, 전파전파, 통신 등

권 세 웅 (Se-Woong Kwon)

정회원



1999년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업

2002년 2월 연세대학교 전자공학과 석사

2002년 3월~현재 연세대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 안테나, 전파전파 등

문 현 옥 (Hyun-Wook Moon)

정회원



2005년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업

2007년 2월 연세대학교 전자공학과 석사

2007년 3월~현재 연세대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 안테나, 전파전파

박 윤 현 (Yoon-Hyun Park)

정회원



1987년 2월 숭실대학교 전자공학과 졸업

1994년 3월 오사카대학교 전자공학과 석사

1999년 2월~현재 연세대학교 전자공학과 박사과정

1987년 5월~현재 정보통신부 근무

<관심분야> 전파관리 공학, 공학

윤 영 중 (Young-Joong Yoon)

종신회원



1981년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업

1986년 2월 연세대학교 전자공학과 석사

1991년 2월 :Georgia Institute of Technology 공학박사

1992년~1993년 ETRI 위성통신

기술 연구단

1993년~현재 연세대학교 교수

<관심분야> 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파 등

육 종 관 (Jong-Gwan Yook)

종신회원



1987년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업

1989년 2월 연세대학교 전자공학과 석사

1996년 University of Michigan 공학박사

1999년-2000년 KJIST 교수

2000년~현재 연세대학교 교수

<관심분야> Computational Electromagnetics 등

정진섭(Jin-Soup Joung)

정회원



1986년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업

1986년 2월 연세대학교 전자공학과 석사

2000년 5월 Georgia Institute of Technology ECE 박사

1988년~2000년 ETRI 근무

2000년 11월~현재 (주)이노 와이리스 부사장/연구소장
<관심분야> 전파신호처리, 정밀계측기 등

김종호(Jong-Ho Kim)

정회원



1986년 2월 충남대학교 전자공학과 졸업

1988년 2월 충남대학교 전자공학과 공학석사

2006년 2월 충남대학교 전자공학과 공학박사

1989년 2월~현재 ETRI 전파

방송연구단 책임연구원
<관심분야> 전자전파, 스펙트럼공학