

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.3.17>

JIIBC 2013-3-3

# 781MHz 대역에서 안테나 상관도를 고려한 개선된 MIMO 채널 특성 분석 방법

## Enhanced Analysis Method of MIMO Channel Characteristics with Antenna Correlation at 781MHz

정명원, 정영준, 백정기

Myoung-Won Jung, Young-Jun Chong, Jeong-Ki Pack

**요약** 본 논문은 781MHz 대역에서 안테나 상관도를 고려한 MIMO 채널 측정을 통해, 측정 데이터를 분석하고 채널 특성을 도출하였다. 상기 주파수 대역은 DTV 시스템에서 이동통신 주파수로 할당이 예정된 대역이다. 781MHz 주파수 대역은 900MHz 이동통신 시스템의 채널특성이 일정부분 유사하지만, 상당히 다른 부분이 있음을 기존 연구를 통해 증명하였다. 또한, 안테나의 상관도를 고려할 경우 신호전달 과정에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 채널 특성 연구가 필요하다. 기존 DTV 방송과 혼신을 피하기 위하여 측정은 제주도 인근 도심지역에서 채널사운더와 4×4 안테나로 채널특성을 측정하였다. 측정된 데이터를 바탕으로 도심지역에서 안테나 상관도를 고려한 채널특성을 도출하였다.

**Abstract** In this paper, the measurement data is analyzed and channel characteristics are derived through MIMO Channel measurements at 781MHz considering antenna correlation. 781MHz frequency band currently operates the DTV system, however, it will be allocated new mobile communication frequency band. The channel characteristics at 781MHz seem to be similar existing mobile communication system at 900MHz but quite a different part of the existing research has demonstrated. In addition, the signal procedure of the channel characteristics, considering the correlation of the antenna, for a more accurate prediction research is needed. To avoid interference with Korean DTV broadcasting, we measured channel characteristics in urban areas of Jeju island by channel sounder and 4×4 antenna. Channel characteristics with antenna correlation were derived based on the measured data in the urban area.

**Key Words :** MIMO, Antenna Correlation, Channel Characteristics, Channel Capacity

### 1. 서 론

최근, 이동 통신 서비스의 폭발과 무선 통신 시스템 요구 사항이 빠르게 증가하고 있기에, 이를 수용할 만한

전파 채널 시스템을 구현하고, 모델링 할 필요가 있다. 이에, 차세대 이동 통신 시스템은 보다 최적화하여 개발하여야 하고, 이를 검증할 필요성이 있다. 2000년대에 진입하면서, 스마트 폰의 확산으로 인해 무선 통신 트래픽이

\*정회원, 한국전자통신연구원 전파기술연구부 (교신저자)  
접수일자 : 2013년 4월 2일, 수정완료 : 2013년 5월 28일  
게재확정일자 : 2013년 6월 14일

Received: 2 April 2013 / Revised: 28 May 2013

Accepted: 14 June 2013

\*Corresponding Author: [mwjung@etri.re.kr](mailto:mwjung@etri.re.kr)

Broadcasting & Telecommunications Media Research Laboratory,  
ETRI, Korea

폭발적으로 증가하고 있다. 기존의 무선 채널 모델은 800MHz의에서 2.5GHz까지 넓은 주파수 대역에서 전파 모델이 존재하지만, 각 모델의 세부 조건들을 분석하면 특정 주파수 및 환경에서 측정결과를 바탕으로 모델링이 이루어졌다.<sup>[1]-[3]</sup> 채널 모델의 대부분이 협대역 특성을 지닌 시스템으로 측정 및 분석을 통하여 도출된 것으로, 광대역 다중 안테나 시스템에 적용하기에는 한계가 있다. 대부분이 단일안테나, 단일주파수를 이용하여 채널 모델을 제시하고 있기 때문이다. 따라서, 차세대 무선 통신의 요구를 충족하기 위해, 새로운 주파수에 대한 채널 모델 분석이 필요하다.

주파수 이용가능성 측면에서, UHF 대역은 무선특성이 타 주파수 대역에 비해서 이용가능성이 상당히 좋은 주파수 대역으로, 다양한 무선 서비스 이용으로 포화상태에 있으며, 이동통신 주파수로의 활용은 거의 불가능하였다. 그러나 DTV 시스템의 급속한 발달로 인해, DTV 채널 대역으로 이용하였던, UHF 대역의 일부, 700MHz 대역이 차세대 이동통신 주파수 대역으로 분배 및 할당이 예정되어 있다.

781MHz의 채널 특성은 기존의 UHF 대역인 900MHz 과 상당부분 유사한 특성이 있을 것으로 판단되지만, 선행 연구 분석 결과, 전파모델 측면에서 10dB 정도의 차이가 있는 것을 확인하였다.<sup>[4]</sup> 이 분석은 신호의 전달과정에서의 감쇠특성을 위주로 분석한 것으로, 대용량 신호의 전달과정을 분석하기에는 한계가 있다. 따라서 채널의 전달 특성과 실제 데이터의 전송용량을 분석할 필요가 있다. 또한, 전파 분석의 결과는 측정 환경의 지역 (건물 밀도, 지형 특성 등)에 따라 차이가 있기 때문에, 다양한 측정 환경을 고려해야 할 필요가 있으며, 안테나의 상관관계 역시 채널용량에 있어서 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.<sup>[5]-[10]</sup>

본 논문에서는 781MHz에서 광대역 다중안테나를 고려한 채널용량 특성을 분석하였으며, 향후, 차세대 이동통신시스템의 이용가능성을 위해 안테나의 상관도를 추가로 고려하여, 채널용량을 증대할 수 있는 방안을 고려하였다. 본 논문의 2장에서는 MIMO 시스템의 안테나 상관도를 분석하였고, 3장에서는 안테나의 공간분포에 따른 상관 특성을 분석하였으며, 4장에서는 측정시나리오 및 측정 시스템을 나타내었다. 마지막으로, 5장에서는 도심지역에 대한 안테나 상관도를 고려한 채널 특성 분석의 결과를 도출하였으며, 마지막으로 6장에서는 결론을

제시하였다.

## II. MIMO 시스템 안테나 상관도 분석

일반적으로 MIMO 시스템의 경우 N개의 송신안테나와 M개의 수신 안테나를 이용하여, 전체 통신 채널을 생성한다. 이때의 수신 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = Hs + n \quad (1)$$

$s$ 는 전송된 신호를 나타내고,  $n$ 은 백색 잡은 레벨을 나타내며,  $H$ 는  $N \times M$  채널로 구성된 채널 매트릭스를 뜻한다. 실제 전달함수  $H_{ij}$ 는  $j$ 번째 송신 안테나와  $i$ 번째 수신 안테나의 매트릭스 조합으로 나타낼 수 있으며, 이때 각각의 세부 채널 매트릭스는 가우시안 랜덤변수의 복소수 조합으로 표현할 수 있다. MIMO 채널의 경우 공간적인 분포를 고려하여 각 채널의 상관관계로서 전달함수를 표현할 수 있으며, 그것은 식(2)와 같다.<sup>[11]</sup>

$$H = [R_{Rx}]^{1/2} H_{iid} ([R_{Tx}]^{1/2})^T \quad (2)$$

$H_{iid}$ 는 이상적인 상태의 가우시안 랜덤 변수의 매트릭스로서 제로 평균값이 반영된 전달함수 이고,  $R_{Tx}$ 와  $R_{Rx}$ 는 송신 및 수신부의 상관관계 조합과 더해져서 실제 전달되는 전달함수  $H$ 로 표현이 가능하다. 이때 송신부와 수신부의 상관관계 조합을 이용하여  $j$ 번째 송신안테나와  $i$ 번째 수신안테나 사이의 채널 상관계수의 도출이 가능하며, 이때 안테나의 공간분포를 고려하여 AS(angular spread)와 PAS(power angular spectrum)을 고려하여 최종적인 상관계수를 계산에 활용하며, 상관계수는 식(3)과 같다.

$$\rho = R_{XX}(D) + jR_{XY}(D) \quad (3)$$

이때,  $D = 2\pi d/\lambda$ ,  $d$ 는 두 안테나 사이의 간격을 나타내고,  $\lambda$ 는 파장,  $R_{XX}$ 는 실수부 또는 허수부의 교차 상관관계를 나타내는 것이고,  $R_{XY}$ 는 실수부와 허수부의 교차 상관관계를 나타내는 것으로 다음 식과 같다.

$$R_{XX}(D) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos(D \sin \phi) PAS(\phi) d\phi \quad (4)$$

$$R_{XY}(D) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos(D \sin \phi) PAS(\phi) d\phi \quad (5)$$

위 식에서 모든 변수는 전파환경에 따라 변화한다. 따라서 이 논문에서는 PAS를 360°로 가정하고, 두 안테나 사이의 교차 상관계수를 식(6)과 같이 표현하였다.

$$\rho_{i,j}(d) = J_0(2\pi d/\lambda) \quad (6)$$

여기서  $J_0$ 는 0차 베셀함수이고, 본 측정의 경우 4(송신) x 4(수신) 선형배열 안테나를 이용하였고, 안테나의 간격은 1파장으로 동일하게 배치하였다.

### III. 안테나 공간분포에 상관 특성

안테나의 공간분포를 고려하여 상관특성을 고려할 경우, 송신 및 수신기에서 개별 안테나의 위치관계를 이용한 상관계수 도출이 필요하다. 이것은 실제 전달되는 전달함수에 있어서, 개별 안테나 사이의 상관관계가 신호 전달에 있어서 상호영향을 미치고, 그 결과 전달함수의 특성까지 변화 시킬 수 있기 때문이다.

#### 1. 독립채널 모델(i.i.d)

독립채널 모델은 전달함수(채널 매트릭스)  $H$ 의 모든 항이 서로 독립되어 있는 매우 간단한 구조의 채널 모델이다.<sup>[12]</sup> 이 경우, 채널 상관 매트릭스는 식(7)과 같다.

$$R_H = \rho^2 \cdot I \quad (7)$$

분산  $\rho^2$ 은 모두 동일하며, 우리는 이를 송신부와 수신부가 서로 독립적이고, 그 반경의 경우도 같다고 가정할 수 있다. 이러한 채널 모델을 독립채널 모델(i.i.d)이라한다.<sup>[13]</sup>

#### 2. Kronecker MIMO 채널 모델

위 독립채널 모델로는 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 채널 모델의 설명이 불가능하다. Kronecker 모

델은 송신과 수신기의 모든 채널 상관조합을 Kronecker 식으로 표현할 수 있으며, 이는 식(8)과 같다.<sup>[14]</sup>

$$H_{Kron} = \frac{1}{\sqrt{\text{tr}\{R_{R_x}\}}} R_{R_x}^{1/2} G (R_{T_x}^{1/2})^T \quad (8)$$

여기서  $G$ 는 i.i.d 채널의 랜덤 매트릭스의 복소 가우시안 값이다. 이때,  $T_x$ 와  $R_x$  상관 매트릭스는 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{T_x} = E\{H^H H\}, R_{R_x} = E\{H H^H\} \quad (9)$$

### 3. Virtual MIMO 채널 모델

앞의 두가지 방법은 실제 전달되는 신호의 과정을 가정하여 예측하는 방법이라면, 가상 채널 모델은 실제 변화 가능한 방향을 수식에 근사하여 적용하고, 그 결과를 분석하는 방법이다. MIMO 시스템의 전달함수는 가상 채널 모델로 표현이 가능하며, 이는 식(10)과 같다.<sup>[15]</sup>

$$H_{virt} = A_{R_x} (\widetilde{\Omega}_{virt} \circ G) A_{T_x}^T \quad (10)$$

여기서  $G$ 는 Kronecker 모델의  $G$ 와 같이, 독립채널 모델의 복소 가우시안 랜덤 매트릭스이고,  $A_{R_x}$ 와  $A_{T_x}$ 는  $N_r \times N_r$ 과  $M_t \times M_t$  크기의 이산 푸리에 변형의 독립채널 이다.  $\widetilde{\Omega}_{virt}$ 는  $\Omega_{virt}$ 의 전력 커핑링 매트릭스의 제곱근으로, 식(11)과 같이 간단히 표현 가능하다.

$$\Omega_{virt} = E_H \left\{ \left( A_{R_x}^H H A_{T_x}^* \right) \circ \left( A_{R_x}^T H^* A_{T_x} \right) \right\} \quad (11)$$

#### 4. Weichselberger MIMO 채널 모델

Weichselberger 모델은 Kronecker 모델과 Virtual 모델의 조합으로, Kronecker 모델의 공간상의 Eigen-value 개념과 Virtual 모델의 공간상의 분포 구조를 연계하여 나타낸 것이다. 송신기와 수신기의 상관관계는 다음과 같다.<sup>[16]</sup>

$$R_{T_x} = U_{T_x} \Lambda_{T_x} U_{T_x}^H, R_{R_x} = U_{R_x} \Lambda_{R_x} U_{R_x}^H \quad (12)$$

$U_{R_x}$ 와  $U_{T_x}$ 는 Eigen 벡터 매트릭스로서, Weichselberger 모델의 채널 전달 함수는 식(13)과 같다.

$$H_{weich} = U_{R_x}(\widetilde{\Omega}_{weich} \circ G)U_{T_x}^T \quad (13)$$

여기서  $G$  앞의 채널 모델과 같으며,  $\widetilde{\Omega}_{virt}$  역시 Virtual 모델에서의 값과 같다. 따라서 최종  $\widetilde{\Omega}_{virt}$ 는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_{weich} = E_H\left\{\left(U_{R_x}^H H U_{T_x}^*\right) \circ \left(U_{R_x}^T H^* U_{T_x}\right)\right\} \quad (14)$$

이처럼 MIMO 채널 모델에 대한 분석적인 다양한 모델들이 존재한다. 따라서 우리는 위 모델 중에서 측정환경 및 분석에 최대한 근사적으로 모사할 수 있는 방법을 택하여 결과로 활용해야 할 것이다.

#### IV. 측정 시나리오 및 측정 시스템

우리가 분석하고자 하는 781MHz 주파수 대역에서 차세대 이동통신 시스템을 활용하기 위해서는 동 대역에 대한 채널용량 특성 분석 결과가 제시되어야 한다. 또한, 향후 도입되는 시스템이 단일 안테나를 이용한 송수신 보다는 다중 안테나를 이용한 신호 전달이 예상되기 때문에, 다중 안테나에 따른 채널용량 특성도 분석이 필요하다. 마지막으로, 안테나 사이의 상관관계에 따른 채널용량 특성변화를 고려하여, 실제 전달되는 신호와 최대한 근사하게 모사할 수 있도록 측정 시나리오 및 측정 시스템을 구축하였다. 그림 1에는 측정지역 및 측정시스템을 나타내었다. 측정은 781MHz 주파수 대역의 청정지역인 제주도의 도심지역에서 실시하였다.

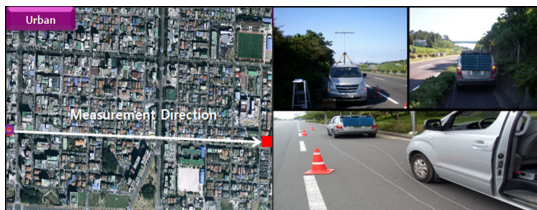


그림 1. 측정 지역 및 측정 시스템  
Fig. 1. Measurement areas and measurement system.

그림 1과 같이 도심지역에서 측정차량에 MIMO 전파 특성 측정용 채널사운더를 장착하고, 송신차량은 지면으로부터 5m 높이에 송신안테나를 설치하였으며, 수신차량은 지면으로부터 1.5m 높이에 수신안테나를 설치하여 측정을 진행하였다. 측정시스템은 IF측면에서 50Mcps 속도로 20ns성능으로 설계되었으며, 지연시간은 총 40.96  $\mu$ s이다. RF 측면에서 송신출력은 10W로 도심지역의 마이크로 셀의 크기를 측정 가능하도록 설계하였다. 측정시스템인 채널사운더의 구성도는 그림 2와 같다. 이 때 송수신 시스템에서 사용하는 모든 클럭은 10MHz 루비듐 오실레이터를 동기 신호 및 기준 클럭으로 사용하여 정확도를 향상시켰다. 채널사운더의 세부 규격은 표 1에 나타내었다.

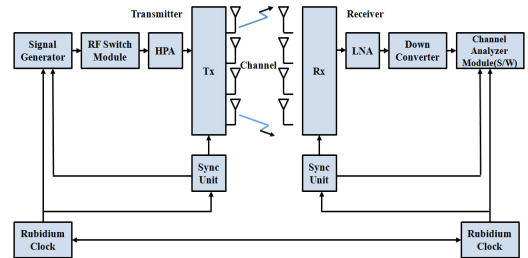


그림 2. 채널 사운더 구성도  
Fig. 2. Channel sounder structure

표 1. 채널 사운더 성능 규격

Table 1. Channel sounder performance standard

항목	규격
동작 주파수	756 ~ 806 MHz
채널 대역폭	50MHz
송신기 출력 전력	10Watt @HPA 출력
수신 감도	-81 dBm/50 MHz
송신이득조절범위	30dB, 1dB step
수신이득조절범위	30dB, 1dB step
Input/Output VSWR	1 : 1.5
Input Impedance	50 $\Omega$
안테나 이득	송신 안테나 : 10.04 dBi 수신 안테나 : 2.15 dBi
주파수 안정도	10-11
Chip Rate	50 Mcps
PN Length	4096 chips

#### V. 도심지역 채널특성 분석

##### 1. AoA와 DS 전력분포를 고려한 채널특성 분석

AoA(도달각, angular of arrival와 DS(지연확산, delay

spread)의 전력분포를 고려할 경우, 채널용량 분석에 있어서 많은 이점이 있다. 이것은 채널용량의 결과물이 채널상관관계의 결과물이기 때문이다.<sup>[17]</sup> 따라서 도달각 및 지연확산의 전력분포의 상관관계를 분석할 경우, 채널용량을 정량적으로 도출하는데 있어서 큰 도움을 주며, 이것은 다음 장에서 수식적으로 설명하도록 하겠다. 도심지역에서의 도달각과 지연확산의 전력분포의 상관관계는 그림 3과 같다.

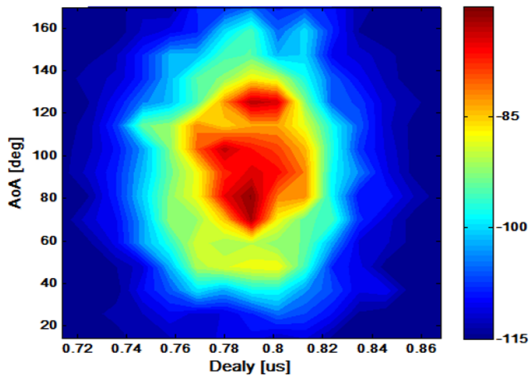


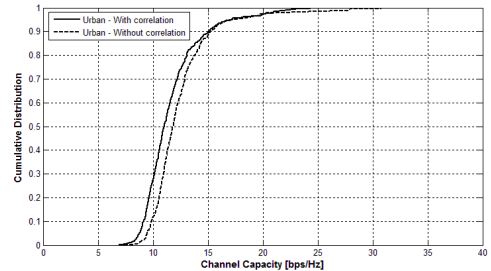
그림 3. 도심지역의 도래각-지연확산의 전력분포  
Fig. 3. AoA-Delay Power spectrum in Urban area

도심지역은 건물 등의 다수의 클러스터들로 인해서, 다양한 산란파들이 산재하며, 다른 어떤 환경보다도 채널 매트릭스의 조합이 복잡한 지역이다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 도달각이 90°에 가까운 곳이 전력크기가 제일 센 것을 볼 수 있다. 이것은 LOS과의 입사를 나타내는 것이다. 또한, 지연확산의 경우 0.79 $\mu$ s 정도에서 가장 강한 전력 분포를 나타내었다. 이것은 직접파와 반사파의 관계가 0.79 $\mu$ s 근처에서 최고점에 도달했다는 것을 의미한다. 결론적으로 채널용량을 키울 수 있는 방법은 다양한 산란파가 여러 번의 반사를 거치지 않고 수신기에 도달하도록 전파채널을 구성해야할 것이다.

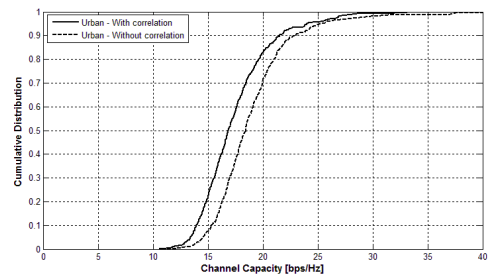
## 2. 채널특성 분석

우리는 도심지역에서의 채널특성 분석을 위해서, 다양한 분석적 채널모델을 검토하였다. 앞에서 언급한 모델 중에서 독립채널 모델은 본 측정데이터에는 적용하기 불가능하기 때문에, Kronecker, Virtual(VCR, Virtual channel representative), Weichselberger 3가지로 채널특성을 분석하였다. 모든 모델은 제로 평균의 복소 가우시

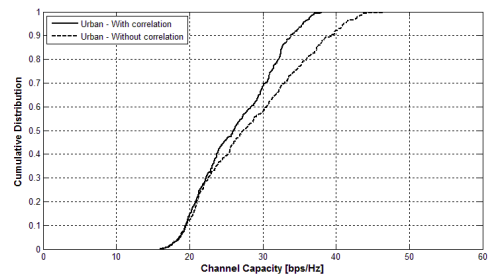
안 채널 매트릭스로 가정하였으며, 우리는 보다 근사적인 채널용량 추출을 위해 SNR 값을 0dB와 10dB 두 경우로 고려하였다. 그 결과는 모델별로 그림4에 나타내었다.



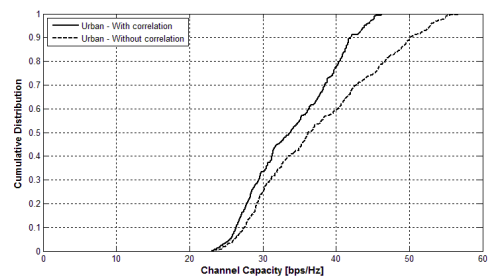
(a) Kronecker, SNR - 0dB



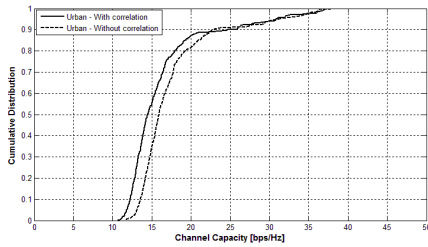
(b) Kronecker, SNR - 10dB



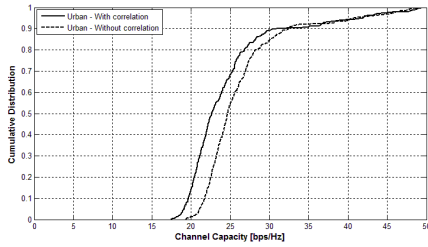
(c) VCR, SNR - 0dB



(d) VCR, SNR - 10dB



(e) Weichselberger, SNR - 0dB



(f) Weichselberger, SNR - 10dB

그림 4. 분석적 채널 모델의 CDF

Fig. 4. CDF for analytic channel models

그림 4의 특성으로 보면, VCR 모델의 경우가 다른 경우에 비해, 채널용량특성이 개선되는 특성을 보였다. 이 결과를 바로 채널 모델에 적용하는 것에는 한계가 있을 것으로 판단되며, 향후, 도심지역 뿐만 아니라, 부도심, 교외 지역의 측정데이터를 추가로 분석하여 결과를 도출할 예정이다.

## VI. 결론

본 논문에서는 도심지역에서 781MHz 주파수 대역의 MIMO 전파채널의 채널특성을 측정하고 그 결과를 분석하였다. 781MHz는 향후 차세대 이동통신 시스템 이용 가능성이 매우 높은 대역으로, 기존의 전파특성(경로손실, 지연확산, 각확산 등) 분석 결과를 이용해서, 채널특성을 도출하는 것은 한계가 있으며, 채널의 전달특성을 보다 해석적으로 분석할 필요성이 있다. 이를 위해, 해석적인 채널모델 분석기법을 측정결과에 적용하고, 도심지역에서 그 특성을 비교 분석한 결과 VCR 모델이 가장 좋은 채널 용량 특성을 보였다.

이것은 도심지역에 국한된 분석 결과로서, 향후, 부도심, 교외지역까지 확대해서 채널 특성을 분석하고, 실측 결과에 의한 채널용량 특성과의 비교하여 최종적인 채널 특성을 도출할 계획이다.

## Reference

- [1] Y. Wang, Y. Si, and H. Leung, "A Novel Inversion Method for Outdoor Coverage Prediction in Wireless Cellular Network", *IEEE Trans. Vehicular Technology.*, vol. 59, no. 1, pp. 36-47, Jan. 2010.
- [2] X. Cheng, C.X. Wang, H. Wang, et al., "Cooperative MIMO Channel Modeling and Multi-Link Spatial Correlation Properties", *IEEE Journal. Selected Areas in Communications.*, vol. 30, no. 2, pp. 388-396, Feb. 2012.
- [3] X. Nie, J. Zhang and P. Zhang, "Polarization and spatial statistics of wideband MIMO relay channels in urban environment at 2.35 GHz", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E94-B, no.1, pp.139-149, Jan. 2011.
- [4] M. W. Jung, J. H. Kim, J. I. Choi, et al., "An Enhanced Approach for a Prediction Method of the Propagation Characteristics in Korean Environments at 781MHz", *ETRI Journal*, vol. 34, no. 6, pp.911-921, Dec. 2012.
- [5] C. Oestges, H. Ozelik and E. Bonek, "On the practical use of analytical MIMO channel models", 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 3B, pp.406-409, Jul. 2005.
- [6] S. Wyne, A. F. Molisch, P. Almers, et al., "Outdoor-to-Indoor Office MIMO Measurements and Analysis at 5.2 GHz", *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 1374-1386, 2008.
- [7] S. Ghosh, B. D. Rao, J. R. Zeidler, "Techniques for MIMO Channel Covariance Matrix Quantization", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 60, no. 6, pp.3340-3345, 2012.
- [8] Chao-Kai Wen, Shi Jin and Kai-Kit Wong, "On the Sum-Rate of Multiuser MIMO Uplink Channels with Jointly-Correlated Rician Fading", *IEEE Transaction on Communications*, vol. 59, no. 10, pp.2883-2895, 2011.
- [9] W. Yamada, N. Kita, M. Sasaki, and T. Sugiyama, "Method for Applying Interlink Correlation to Multilink MIMO Propagation Channel Estimation",

- IEEE Vehicular Technology Conference, art. no. 5956401, 2011.
- [10] H. Tong and S. A. Zekavat, "Spatially correlated MIMO channel-generation via virtual channel representation", *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 5. pp. 332-334, 2006.
- [11] V. Erceg, et al., "TGN Channel Models", IEEE 802.11 document 802.11-03/940r4, May 2004.
- [12] A.F. Molisch, "A generic model for MIMO wireless propagation channels in macro- and microcells", *IEEE Trans. Signal processing*, vol. 52, no.1, pp. 61-71, 2004.
- [13] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", *European Trans. Telecommunications*, vol. 10, no.6, pp. 585-595, 1999.
- [14] D. Chizhik, F. Rashid-Farrokhi, J. Ling, and A. Lozano "Effect of antenna separation on the capacity of BLAST in correlated channels", *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 11, pp. 337-339, 2000.
- [15] A. M. Sayeed, "Deconstructing multiantenna fading channels", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 10, pp. 2563-2579, 2002.
- [16] W. Weichselberger, M. Herdin, H. O' zcelik, and E. Bonek, "A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends", *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol.5, no.1, pp. 90-99, 2006.
- [17] C. C. Chong, C. M. Tan, D. Laurenson, S. McLaughlin, M. A. Beach, and A. R. Nix, "A new statistical wideband spatio-temporal channel model for 5-GHz band WLAN systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no.2, pp. 139-150, 2003.
- [18] D. H. Ha, Y. H. Lee, "The Implementation of A Modified Channel Model Simulator for UWB System in Indoor Radio Propagation Environment", *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 9, no.4, pp. 93-104, 2011.
- [19] T. K. An, B. H. Kim, M W. Nam, Y. S. Lee, S. K. Jeong, M. K. Oh, "Development of a Simulator for Radio Propagation Path Loss in Tunnel at 18GHz", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 12, no.4, pp. 1796-1802, 2011.
- [20] W. H. Jeong, J. S. Kim, M. W. Jung, Y. K. Yoon, J. H. Kim, K. S. Kim, "MIMO Radio Channel Measurement and Analysis at 781MHz", *Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 12, no.2, pp. 181-188, 2012.

※ 본 연구는 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음  
 (This research was funded by the MSIP(Ministry of Science, ICT & Future Planning), Korea in the ICT R&D Program 2013)

### 저자 소개

#### 정 명 원(정회원)



- 2006년 2월 : 충남대학교 전파공학과 졸업(공학사)
- 2008년 2월 : 충남대학교 전파공학과 대학원 졸업(공학석사)
- 2008년 5월 ~ 2009년 2월 : 한국기계연구원 신뢰성평가센터 연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 전파기술연구부 스펙트럼공학연구실 선임연구원

• 2010년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전파공학과 박사과정  
 <주관심분야: 전파전파, 스펙트럼공학, 무선채널분석, MIMO, MU-MIMO, 채널모델 등>

#### 백 정 기(준회원)



- 1978년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1978년 2월 ~ 1983년 2월 : 국방과학연구소 연구원
- 1985년 2월 : Virginia Tech Electrical Engineering(공학석사)

• 1988년 2월 : Virginia Tech Electrical Engineering(공학박사)  
 • 1988년 3월 ~ 1989년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원  
 • 1989년 3월 ~ 2004년 2월 : 동아대학교 전기공학과 조교수  
 • 2004년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 전파공학과 교수  
 <주 관심분야: 전파전파, 전자파 산란 및 인체영향 등>



정 영 준(준회원)



- 1992년 2월 : 제주대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1994년 2월 : 서강대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사)
- 2005년 2월 : 충남대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학박사)

- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 전파기술연구부 스펙트럼공학연구실 실장, 책임연구원

<주 관심분야 : 스펙트럼공학, RF 회로 및 시스템, 디지털 무전기>