

Massive MIMO 시스템의 무선 채널 특성 분석

장정욱*, 김진혁*, 문철°

Analysis of Massive MIMO Wireless Channel Characteristics

Jeong-uk Jang*, Jin-hyuk Kim*, Cheol Mun°

요약

본 논문에서는 massive MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 시스템의 채널 특성 분석을 위해, 3차원 레이 트레이싱 기반 무선 채널 시뮬레이터인 Wireless Insite를 이용하여, 마이크로셀 환경에서 수평으로 선형 배열된 4개와 128개의 이중 편파 안테나 (dual polarized antenna)로 구성된 송신 배열 안테나 시스템의 각도 확산(angular spread), 교차 편파 식별도(cross polarization discrimination, XPD), 그리고 지연 확산(delay spread) 특성을 비교 분석하였다. 시뮬레이션 및 분석을 통해 128개의 안테나 원소로 구성된 massive MIMO 시스템의 각도확산과 지연 확산은 4개의 안테나 원소로 구성된 MIMO 시스템 보다 작아지고 교차 편파 식별도는 커진다는 것을 확인하였다.

Key Words : Massive MIMO, ray tracing, angular spread, delay spread, cross polarization discrimination

ABSTRACT

In this paper, wireless channel characteristics of massive MIMO system is analyzed by comparing angular spread, cross polarization discrimination(XPD) and delay spread of dual polarized 4 and 128 transmit array antenna systems, by using 3D ray-tracing simulator, Wireless Insite in microcell environments. The analysis shows that increasing the number of transmit antennas results in the smaller angular spread and delay spread, and the higher value of XPD.

I. 서론

많은 수 (~백 개)의 송신안테나를 사용하는 기지국에서 multi-user MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 기술을 이용하여 다수의 이동국들에게 데이터를 전송하는 massive MIMO 기술이, 차세대 무선 통신 시스템에서 스펙트럼 효율을 획기적으로 증가시킬 수 있는 요소 기술로서 연구가 진행되고 있다^[1,2]. 이론적으로, 송신 빔 성형 이득은 송신 안테나 수에 비례하므로, massive MIMO 시스템의 높은 빔 성형 이득을 이용할 경우, 각 송신 안테나는 낮은 송신 전

력을 사용할 수 있기 때문에 green communication의 중요 기술로서 부각되고 있다.

Massive MIMO 시스템을 디자인하고, 성능을 분석하고, 그리고 최적화를 하기 위해서는 massive MIMO 시스템의 무선 채널 특성들을 적절하게 분석하고 모델링하는 연구가 필수적이다. 현재까지 massive MIMO 시스템의 무선 채널 특성에 대한 기존의 연구 결과들이 소수 발표되었으며, ^[3]은 massive MIMO 시스템의 무선 채널에 대한 실험적인 측정을 통해, 송신기와 수신기 간 거리가 레일리 거리 (Rayleigh distance)이내에 위치한다면 무선 채널이

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2012R1A1A4A01007319) 및 방송통신위원회의 지원을 받는 방송통신 원천기술개발사업(KCA-2012-12-911-01-108)의 연구 결과임.

◆ 주저자 : 국립한국교통대학교 정보통신공학과 무선통신연구실, conngug1@naver.com, 학생회원

° 교신저자 : 국립한국교통대학교 정보통신공학과, 무선통신연구실, chmun@ut.ac.kr, 정회원

* 국립한국교통대학교 정보통신공학과 무선통신연구실, lvbluechair@gmail.com, 학생회원

논문번호 : KICS2012-01-074, 접수일자 : 2013년 1월 31일, 최종논문접수일자 : 2013년 3월 8일

비정상성(non-stationary) 특성을 보인다는 것을 보여 준다.

무선 채널 특성을 실제 측정하는 것은 측정 시스템 구축과 실험 과정에서 많은 비용과 시간을 필요로 하므로, 정확성이 검증된 3차원 레이 트레이싱(3D ray-tracing) 채널 시뮬레이터를 이용하여 무선 통신 시스템의 채널 특성을 분석하는 것이, 기존의 연구 결과에서 좋은 대안으로서 제시되고 있다¹⁴⁾.

3차원 레이 트레이싱 기반 채널 시뮬레이터인 Wireless Insite를 이용하여, massive MIMO 채널 특성을 분석하는 연구가 진행되었으며¹⁶⁾, 본 논문에서는 Wireless Insite를 이용하여, 마이크로셀 환경에서 선형 배열된 4개와 128개의 이중 편파 안테나 (dual polarized antenna)로 구성된 송신 배열안테나 시스템의 각도확산(angular spread), 교차편파식별도(cross polarization discrimination, XPD), 그리고 지연 확산(delay spread) 특성을 비교 분석하였다. 비교 분석을 통해 massive MIMO 시스템의 송신 안테나수가 늘어남에 따라 무선 채널의 지연확산과 각도확산, 그리고 교차 편파 식별도에서 발생하는 특성을 분석함으로써, massive MIMO 시스템 디자인과 최적화 시에 필수적으로 고려해야할 무선 채널 특성을 제시한다.

II. 3차원 레이 트레이싱 기반 massive MIMO 무선 채널 시뮬레이션

Massive MIMO 시스템의 무선 채널 특성을 분석하기 위해, 채널 시뮬레이터인 Wireless Insite¹⁴⁾를 이용하여, 도심 마이크로 셀룰러 환경에서 massive MIMO 시스템의 채널 임펄스 응답을 계산한다.

2.1. 3차원 레이 트레이싱 시뮬레이션

그림 1은 3차원 레이 트레이싱 채널 시뮬레이션이 수행된 채널 환경을 나타낸다. 환경은 캐나다 오타와 도시를 3차원 모델링 한 것이며, 빌딩은 10m에서 60m의 높이를 가진다. 빌딩들은 유전율 6의 두께 0.3m 콘크리트 단일 매질로 모델링 되었다. 그림 1의 중앙에 위치한 높이 60m의 빌딩 옥상에 송신기가 위치하고, 수신기들은 송신기를 중심으로 하는 원위에 표시된 검은 점에 위치한다. 고려하는 송신기와 수신기 간 거리는 30m 간격이며 송수신기 간 최대 거리는 420m이다. 송신기는 건물 옥상위에 위치하며 massive MIMO 안테나 높이는 지상으로부터 65m이고, 수신기는 지상에 위치하며 수신 안테나의 높이는 2m이다.

송신기는 두 개의 직교하는 편파를 송신하는 이중 편파 안테나(dual polarized antenna)를 원소로 하는 선형 배열 안테나를 사용하며, 이중 편파 안테나가 4개가 0.5λ 간격으로 배열된 일반적인 MIMO 시스템과 이중 편파 안테나가 128개가 0.5λ 간격으로 배열된 massive MIMO 시스템을 고려한다. 수신기는 단일 이중 편파 안테나를 사용한다.

시뮬레이션의 전파 모델은 3차원적으로 전파 경로를 찾는 full 3-D 모델이고, 레이 트레이싱 방법은 SBR(Shooting and Bouncing Ray)방법을 사용하였으며, 송신배열안테나의 각 안테나 원소에서 수신안테나의 안테나 원소까지의 최대 이득을 가지는 10개의 경로를 고려한다. 사용 주파수는 2GHz이고, 대역폭은 10MHz인 채널 환경에서 시뮬레이션 하였으며, 그 밖의 설정은 표 1에 나타내었다.

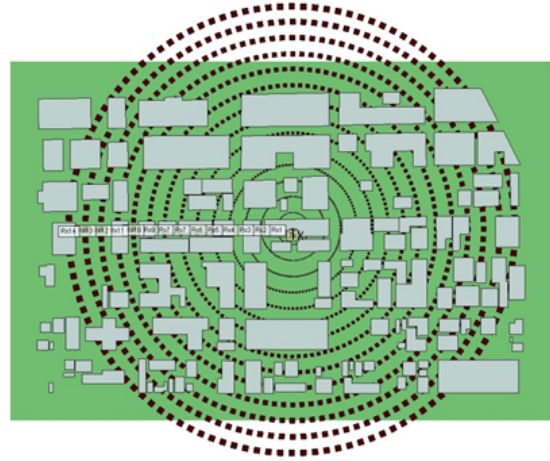


그림 1. 시뮬레이션이 수행된 채널 환경
Fig 1. Overview of the simulated channel environments

표 1. 3차원 레이 트레이싱 시뮬레이션 설정
Table 1. Simulation setup

Setup	Setup value
Ray tracing propagation model	Full 3-D
Channel environments	Urban micorcell
Number of reflection	30
Number of diffraction	1
Ray tracing method	SBR
Maximum number of paths between Tx. and Rx.	10개
Frequency	2GHz
Bandwidth	10MHz

2.2. 지연에 대한 선형 보간

3차원 레이 트레이싱을 통해 송신기의 각 송신 안테나 원소와 수신기간의 채널 임펄스 응답을 구할 수 있다. 표 2는 송신 배열 안테나의 첫 번째 송신 안테나 원소의 한 송신 편파와 수신 안테나의 한 수신 편파 간의 계산된 채널 임펄스 응답의 한 예를 보여준다. 채널 임펄스 응답은 최대 10개의 경로별 응답으로 구성되며, 각 경로별 응답은 위상과 지연, 수신 전력으로 구성되어있다.

표 2. 계산된 채널 임펄스 응답의 예
Table 2. Example of channel impulse response

Path index	phase(°)	delay(us)	received power(dBm)
1	11.049	0.221472	-91.777
2	-146.308	0.240957	-96.982
3	-109.404	0.100582	-136.110
4	52.532	0.548892	-144.316
5	90.028	0.169919	-144.550
6	168.604	0.755663	-148.910
7	-55.987	0.543801	-151.940
8	86.991	0.758256	-154.043
9	55.470	0.881937	-154.204
10	7.389	0.885259	-154.842

송신 배열 안테나의 n 번째 송신 안테나 원소의 t 송신 편파에서 수신 안테나의 r 수신 편파로의 l 번째 경로의 채널 응답 $g_{n,l}^{(r,t)}(\tau_{n,l})$ 은 표 2의 위상을 라디안으로 환산한 $\theta_{n,l}$ 과 수신전력을 선형 값으로 환산한 $A_{n,l}$, 그리고 지연 값 $\tau_{n,l}$ 을 이용하여 다음 식(1)과 같이 구한다.

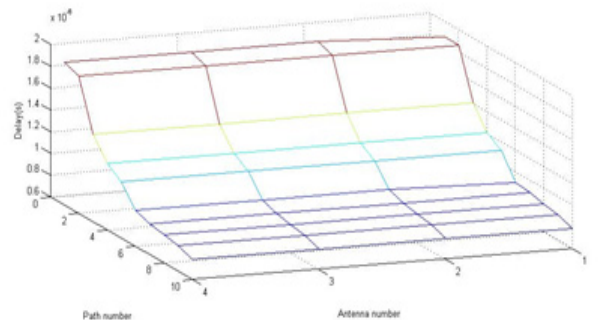
$$g_{n,l}^{(r,t)}(\tau_{n,l}) = A_{n,l} \exp(j\theta_{n,l}) \delta(\tau - \tau_{n,l}) \quad (1)$$

여기서, (r,t) 는 각각 수평 편파와 수직 편파의 조합인 $(r,t) = \{(h,h), (v,h), (v,v), (h,v)\}$ 로 구성된다. 예를 들어, (v,h) 는 수평 편파 안테나로 송신하고, 수직 편파 안테나로 수신했음을 나타낸다.

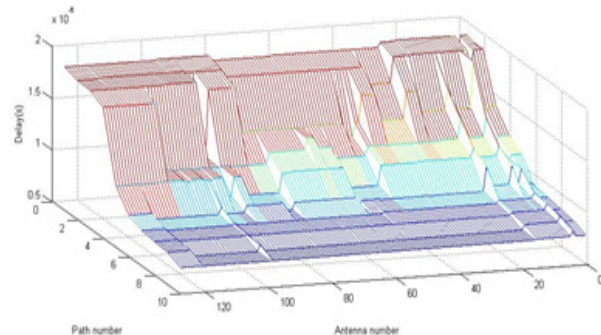
송신 배열 안테나와 수신 안테나 간의 l 번째 경로의 채널 응답 벡터 $\mathbf{h}_l^{(r,t)}(\tau_l)$ 는 $\{h_{n,l}^{(r,t)}\}_{n=1,\dots,n_T}$ 를 원소로 하는 $1 \times n_T$ 크기의 벡터로 다음 식(2)와 같이 구해진다.

$$\mathbf{h}_l^{(r,t)}(\tau_l) = [h_{1,l}^{(r,t)}(\tau_l) h_{2,l}^{(r,t)}(\tau_l) \dots h_{n_T,l}^{(r,t)}(\tau_l)] \quad (2)$$

단, 여기서 조건은 송신 안테나 원소별 지연 $\{\tau_{n,l}\}_{n=1,\dots,n_T}$ 값이 모두 τ_l 로 동일해야 한다. 일반적으로, 송신 배열 안테나를 구성하는 안테나 원소의 개수가 작을 경우, 송신 배열 안테나의 개구면 크기가 작기 때문에 송신 안테나 원소 별 지연이 거의 동일하지만, massive MIMO 시스템과 같이 많은 안테나 원소를 사용할 경우 개구면의 크기가 매우 증가하여 각 경로의 송신 안테나 원소별 지연이 상당히 다르게 된다. 그림 2는 4개의 안테나 원소로 구성된 배열 안테나와 128개의 원소로 구성된 배열 안테나의 안테나-지연 산란 함수(antenna-delay scattering function)를 비교한 그림이다. 그림 2의 x축은 안테나 인덱스를, y축은 경로 인덱스를, 그리고 z축은 경로의 지연시간을 나타낸다. 128개의 원소로 구성된 배열 안테나의 경우, 안테나 원소 간 거리가 증가할수록, 각 경로의 송신 안테나 원소별 지연이 서로 상이함을 확인할 수 있다.



(a) 4개의 원소로 구성된 배열 안테나



(b) 128개의 원소로 구성된 배열 안테나

그림 2. 안테나-지연 산란 함수
Fig 2. Antenna-delay scattering function

따라서, 주어진 지연 값 $\{\tau_l\}_{l=1,\dots,L}$ 에서의 각도 산란함수(angle scattering function)를 구하기 위해 서는, 주어진 지연 값 τ_l 에 대한 채널 응답 벡터 $\mathbf{h}_l^{(r,t)}(\tau_l)$ 가 필요하다. 이를 위해, 시뮬레이션에서 계산된 채널 응답 $g_{n,l}^{(r,t)}(\tau_{n,l})$ 값을 사용하여, 지연 축에서의 선형 보간(interpolation)을 수행하여, 주어진 지연 τ_l 에 대한 각 송신 안테나 원소별 채널 응답 $h_{n,l}^{(r,t)}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$h_{n,l}^{(r,t)}(\tau_l) = g_{n,l}^{(r,t)}(\tau_{\min}) + \frac{g_{n,l}^{(r,t)}(\tau_{\max}) - g_{n,l}^{(r,t)}(\tau_{\min})}{\tau_{\max} - \tau_{\min}}(\tau_l - \tau_{\min}) \quad (3)$$

여기서, τ_{\max} 와 τ_{\min} 은 $\{\tau_{n,l}\}_{n=1,\dots,n_T, l=1,\dots,10}$ 에서 각각 최대값과 최소값을 나타낸다.

III. Massive MIMO 채널 특성 분석

본 절에서는, 송신 배열 안테나와 수신 안테나 간의 l 번째 경로의 채널 응답 벡터 $\mathbf{h}_l^{(r,t)}(\tau_l)$ 를 이용하여 massive MIMO의 각도 확산, 지연 확산, 그리고 XPD 특성을 분석한다.

3.1. 각도 확산

각도 확산 특성을 분석하기 위해, 송신 배열 안테나와 수신 안테나 간의 l 번째 경로의 채널 응답 벡터 $\mathbf{h}_l^{(r,t)}(\tau_l)$ 를 이용하여 각도-지연 산란 함수(angle-delay scattering function), $\varphi_{a,d}(\theta, \tau)$ 을 구한다. $n_T \times 1$ 배열 응답 벡터(array response vector) $\mathbf{a}(\theta)$ ^[5]을 이용하여, 주어진 지연 τ_l 과 각도 θ_x 에 대한 각도-지연 산란 함수 값 $\varphi_{a,d}^{(r,t)}(\theta_x, \tau_l)$ 를 구한다.

$$\varphi_{a,d}^{(r,t)}(\theta_x, \tau_l) = |\mathbf{h}_l^{(r,t)}(\tau_l) \mathbf{a}(\theta_x)|^2 \quad (4)$$

여기서, $-90^\circ \leq \theta_x \leq 90^\circ$ 의 범위를 갖는다.

각도 확산을 정량적으로 계산하기 위해, 각도 산란함수 $\varphi_a^{(r,t)}(\theta)$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\varphi_a^{(r,t)}(\theta) = \int_0^{\tau_{\max}} \varphi_{a,d}(\theta, \tau) d\tau \quad (5)$$

각도 산란함수 $\varphi_a^{(r,t)}(\theta)$ 를 이용하여, 평균 AoD

(angle of departure) $\bar{\theta}$ 와 RMS 각도 분산(root-mean-square angular spread) θ_s 를 각각 다음과 같이 구한다^[5].

$$\bar{\theta} = \frac{\int_{-\pi}^{+\pi} \theta \varphi_a^{(r,t)}(\theta) d\theta}{\int_{-\pi}^{+\pi} \varphi_a^{(r,t)}(\theta) d\theta} \quad (6)$$

$$\theta_s = \sqrt{\frac{\int_{-\pi}^{+\pi} (\theta - \bar{\theta})^2 \varphi_a^{(r,t)}(\theta) d\theta}{\int_{-\pi}^{+\pi} \varphi_a^{(r,t)}(\theta) d\theta}} \quad (7)$$

그림 3은 4개의 안테나 원소를 사용하는 “4 Tx Array”와 128개의 안테나 원소를 사용하는 “128 Tx Array”의 RMS 각도 확산을 비교한 결과를 보여준다. 송신기와 수신기간의 거리에 상관없이 128 Tx Array의 RMS 각도 확산이 4 Tx Array보다 전체적으로 최소 8° 에서 최고 23° 적다는 것을 알 수 있다. 4Tx Array의 평균 RMS 각도 확산은 34° 이고, 128 Tx Array는 20° 이다. 이는 massive MIMO 시스템에서 송신 안테나 배열의 크기 때문에 산란체 분포 반경(scattering radius)보다 빔폭이 작아지므로, 산란체의 분포 반경만큼의 각도 확산 특성이 나타난다. 그러나, 4 Tx Array의 경우, 빔폭이 산란체 분포 반경보다 크므로, 산란체 분포 특성보다 빔폭에 의해 각도 확산 정도가 결정된다. 이러한 특성은 그림 4의 4 Tx Array와 128 Tx Array의 방위각 전력 분포(Power Azimuth Spectrum, PAS)분포를 비교하면 더욱 명확해진다.

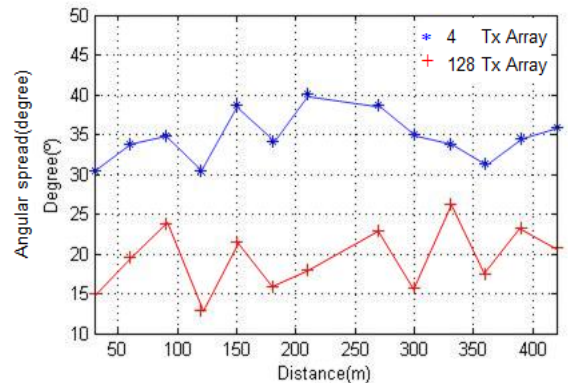
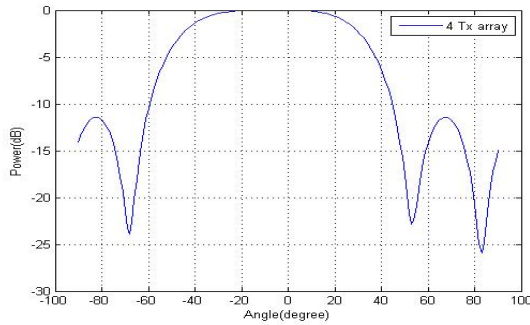
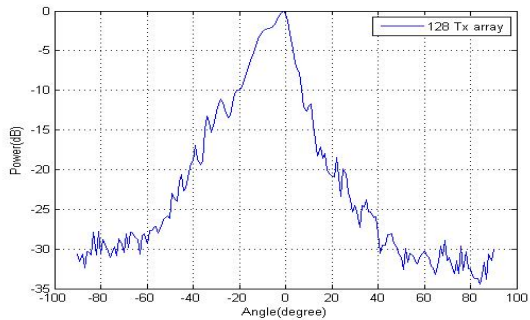


그림 3. RMS 각도 확산 비교
Fig 3. RMS angular spread comparison



(a) 4 Tx Array의 PAS



(b) 128 Tx Array의 PAS

그림 4. 방위각 전력 분포 비교
Fig 4. PAS comparison

3.2. 지연 확산

Massive MIMO 시스템에서의 지연확산은 송신기에서 빔성형을 수행하고, 형성된 주 빔에 의해 전송되는 신호의 지연 확산을 분석하는 것이 필요하다. 따라서, 아래 표 3의 128 Tx Array와 4 Tx Array의 빔폭을 조절하여 시뮬레이션을 수행하였다. 지연 확산은 송신기의 주 빔에 위치하는 하나의 수신기에서의 지연 확산을 분석하였다. 분석 결과 지연 확산은 128 Tx Array가 0.8(ns)로 4 Tx Array의 8(ns) 보다 매우 작음을 확인할 수 있다.

표 3. 지연 확산 시뮬레이션 설정
Table 3. Delay spread simulation setup

Parameter	Value	
Antenna type	Directional antenna	
Distance between Tx. and Rx.	420m	
HPBW (Half Power Beamwidth)	128 Tx Array	1°
	4 Tx Array	40°
FNBW (First Null Beamwidth)	128 Tx Array	2°
	4 Tx Array	80°

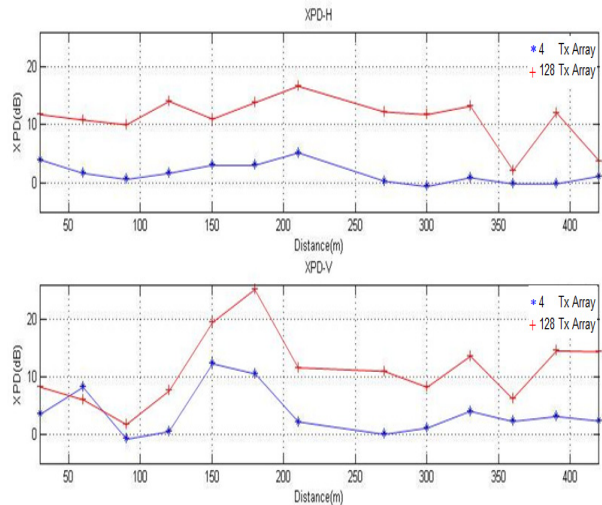
3.3. 교차 편파 식별도

Massive MIMO 시스템에서의 교차 편파 식별도는 송신기에서 빔성형을 수행하고, 형성된 주 빔에 의해 전송되는 신호의 교차 편파 식별도지연 확산을 분석하는 것이 필요하다. 따라서, 교차 편파 식별도는 해당 송신 편파의 가장 높은 이득을 가지는 방향에서의 교차 편파 식별도를 계산한다.

$$XPD_h = \frac{\varphi_a^{(h,h)}(\theta_{\max_h})}{\varphi_a^{(v,h)}(\theta_{\max_h})}, XPD_v = \frac{\varphi_a^{(v,v)}(\theta_{\max_v})}{\varphi_a^{(h,v)}(\theta_{\max_v})} \quad (8)$$

$\theta_{\max_h} = \operatorname{argmax}_{\theta} \varphi_a^{(h,h)}(\theta)$ 와 $\theta_{\max_v} = \operatorname{argmax}_{\theta} \varphi_a^{(v,v)}(\theta)$ 이다.

그림 5는 4 Tx Array와 128 Tx Array의 교차 편파 식별도를 비교 분석한 그림이다. 송신 편파가 수평 편파일 경우, 교차 편파 식별도는 128 Tx Array가 4 Tx Array 보다 최소 3dB에서 최고 12dB까지 높은 값을 보인다. 송신 편파가 수직 편파일 경우, 교차 편파 식별도는 128 Tx Array가 4 Tx Array 보다 -2dB에서 최고 15dB까지 높은 값을 보인다.



(위) 송신 편파가 수평 편파인 경우의 교차 편파 식별도
(아래) 송신 편파가 수직 편파인 경우의 교차 편파 식별도
그림 5. 교차 편파 식별도 비교
Fig 5. XPD comparison

IV. 결론

Massive MIMO의 채널 특성을 파악하기 위해 3차원 레이 트레이싱 기반 채널 시뮬레이터인

Wireless Insite를 이용해 각도 확산, 지연 확산, 그리고 교차 편파 식별도 특성을 분석하였다. Massive MIMO 시스템의 무선 채널은 기존의 MIMO 채널보다 각도 확산과 지연 확산이 작아지고 교차 편파 식별도가 커지기 때문에, 높은 공간상관도와 낮은 채널 지연, 그리고 높은 교차 편파 식별도를 가지는 채널환경에 적합한 massive MIMO 기술이 개발되어야 할 것이다.

References

[1] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, vol.9, no.11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.

[2] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no.1, pp. 40-60, Jan. 2013.

[3] S. Payami, F. Tufvesson, "Channel measurements and analysis for very large array systems at 2.6Ghz," in *Proc. European Conf. Antennas and Propagation 2012*, pp.433-437, Mar. 2012

[4] P. Mededovic, M. Veletic, Z. Blagojevic, "Wireless insite software verification via analysis and comparison of simulation and measurement results," in *Proc. MIPRO 2012*, pp.776-781, May 2012.

[5] A. J. Paulraj, R. Naber, and D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press, 2003.

[6] J.-U. Jeong, J.-H. Kim, C. Mun, "Analysis of massive MIMO wireless channel characteristics," in *Proc. Korea Information and Communication Society (KICS) Conference Fall 2012*, pp.101-102, Seoul, Korea, Nov. 2012.

장 정 욱 (Jeong-uk Jang)



1992년 2월 한국대학교 전자공학과 졸업
 2011년 2월 국립충주대학교 정보통신공학과 학사
 2013년 2월 국립한국교통대학교 정보통신공학과 석사
 2013년 3월~현재 (주)아이엠텍 <관심분야> MIMO 시스템, 채널 모델링 등

김 진 혁 (Jin-hyuk Kim)



2011년 2월 국립충주대학교 정보통신공학과 학사
 2013년 2월 국립한국교통대학교 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> MIMO 시스템, 채널 모델링 등

문 철 (Cheol Mun)



1995년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
 1997년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
 2001년 2월 연세대학교 전자공학과 박사
 2003년 8월~현재 국립한국교통대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> MIMO 시스템, 채널 모델링 등