Path Morphology 개념을 이용한 MIMO 채널 모델링

MIMO Channel Modeling Using Concept of Path Morphology

정원정 · 유지호 · 김태홍 · 김명돈* · 정현규* · 배석희** · 백정기

Won-Jeong Jeong · Ji-Ho Yoo · Tae-Hong Kim · Myung-Don Kim* · Hyun Kyu Chung* · Seok-Hee Bae** · Jeong-Ki Pack

요 약

차세대 이동 통신 시스템에서는 높은 주파수 대역, 광대역, 다중 안테나(MIMO antenna)의 사용이 예상된다. 또한 무선 통신의 급격한 수요와 이동 통신 서비스의 폭발적인 증가로 인해 차세대 이동 통신 시스템의 최적화를 위한 검증 모델 개발 연구가 필요하다. 기존 MIMO 채널 모델의 경우 도심, 부도심, 시골, 개활지 등으로 포괄적으로 전파 환경을 분류하여 연구를 수행하였으나, 이러한 접근 방법은 예를 들어 도심 환경 내에서도 다양한 morphology가 존재할 수 있기 때문에 모델링 정확도 측면에서 취약성을 가질 수 있다. 본 논문에서는 path morphology 개념을 도입하여 전파 환경을 송 · 수신기 사이의 건물의 높이, 밀집도 등을 고려하여 세부적으로 분류하는 방법을 제안하였다. 광선 추적(ray tracing) 기법을 이용하여 각 환경별 delay spread(DS), AoD와 AoA의 angular spread(AS)를 분석하고, 이를 바탕으로 국내 환경에 적합한 MIMO 채널 모델을 제시하였다.

Abstract

The use of high frequency band, broad band and MIMO antenna is expected in the next generation mobile communication system. By the rapid increase of demand for wireless communications and the explosive increase of the mobile communication services, researches for optimization of next-generation mobile communication system are required. In the existing MIMO channel models, propagation-environments are commonly classified into urban, suburban, rural area, etc. However such approaches can have drawbacks in that many different morphologies may exist even in the urban area, for example. In this paper, we introduced path morphology concept, and proposed the method of morphology classification considering the building height, density, etc. Delay spread(DS), angular spread(AS) of AoD and AoA analyzed for each environment using the ray tracing technique. Based on the analysis, a MIMO channel model appropriate in domestic environment was suggested.

Key words : MIMO, Path Morphology, Ray Tracing, Channel, Modeling

Ⅰ. 서 론

차세대 이동 통신 시스템에서는 높은 주파수 대역, 광대역, 그리고 다중 안테나(MIMO)의 사용이 예상된다. 그리고 무선 통신의 급격한 수요와 이동 통신 서비스의 폭발적인 증가로 인해 차세대 이동 통신 시스템 개발의 최적화를 위한 검증 모델 개발은 매우 시급한 문제이다.

「이 연구는 방송통신위원회의 IT R&D 개발 사업의 일환으로 수행하였음[2009-F-034-01, Wideband Wireless Channel Modeling based on IMT-Advanced].」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chung-Nam National University)

*한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

**전파연구소(Radio Research Agency)

· 교 신 저 자 : 백정기(e-mail : jkpack@cnu.ac.kr)

· 논 문 번 호 : 20091127-10S

· 수정완료일자 : 2010년 1월 28일

현재 MIMO 채널 모델링은 세계적으로 표준화가 진행되고 있는 기술로서 집중적인 연구를 통한 기술 선점이 필요하며, 국외 모델[1]~[6]의 경우 국외 환경에서 측정되어 개발된 모델로서 환경이 다른 국내 환경에서의 적용에 어려움이 따른다. 또한, 기존의 MIMO 채널 모델의 경우 도심, 부도심, 시골, 개활지 등으로 광범위하게 전파 환경을 분류하여 연구를 수행하였지만, 그림 1에 보인 것과 같이 이와 같은 분류 방법으로는 동일한 전파 환경 내에서도 송·수신기 사이의 건물의 높이, 밀집도, 수풀 등의 영향으로 인하여 다양한 환경이 존재할 수 있기 때문에 MIMO 채널을 보다 효율적이고 정확하게 모델링하는데 취약점이 있을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 path morphology 개념을 이용하여 송·수신기 사이의 건물의 높이, 밀집도를 고려하여 전파 환경을 12개의 morphology로 분류하고, 광선 추적 기법을 이용한 시뮬레이션과 실제 측정을 통하여 MIMO 채널 모델의 대표적인 파라미터인 delay spread(DS), 출발각(AoD: Angle of Departure) 및 도착각(AoA: Angle of Arrival)의 angular spread (AS) 특성을 분석함으로써 path morphology 분류의 타당성을 검증하고 국내 환경에 적합한 MIMO 채널 모델을 개발하였다.

Ⅱ. Path Morphology에 의한 채널 모델

2-1 Path Morphology 분류

실제 무선 채널 환경에서는 송·수신기 사이에 수풀, 건물, 지면 등의 주변 전파 환경에 의한 다중 경로(multi-path)가 형성되며, 각 경로에 대한 반사, 투과, 회절 등에 의해 경로 손실, 페이딩 및 지연 분산 등이 발생하게 된다. 이러한 MIMO 채널을 모델링하기 위해서는 밀집 도심, 부도심, 개활지 등의 전파 환경 분류에 따른 모델링 방법과 송·수신기 사이 경로의 path morphology에 따른 방법의 2가지 서로 다른 접근 방법이 있을 수 있다. 기존의 무선 채널 모델에서는 주로 전자의 방법을 사용하였으나, 그림 1에 보인 것과 같이 동일한 전파 환경 내에서도 실제 다양한 path morphology가 있을 수 있기 때문에 특히 MIMO 채널 모델링의 경우 후자의 접근 방법이 보다 타당한 것으로 판단된다.

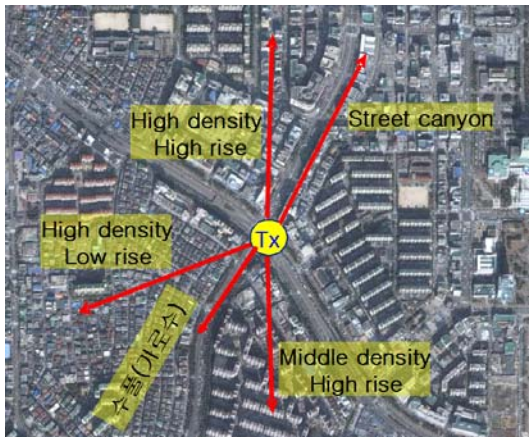


그림 1. MIMO 채널에서의 path morphology 개념
Fig. 1. Path morphology concept in a MIMO channel.

표 1. Path morphology별 채널 분류
Table 1. Channel classification by path morphology.

Path morphology	
High rise (22 m 이상)	High density(25 % 이상)
	Mid density(15~25 %)
	Low density(15 % 미만)
Mid rise (11~22 m)	High density(35 % 이상)
	Mid density(25~35 %)
	Low density(25 % 미만)
Low rise (4~11 m)	High density(35 % 이상)
	Mid density(25~35 %)
	Low density(25 % 미만)
Rural (4 m 미만)	High density(20 % 이상)
	Low density(20 % 미만)
Open area	

따라서 본 논문에서는 path morphology 개념을 도입하여 전파 경로상의 건물의 높낮이와 밀집도를 고려하여 표 1에 보인 것과 같이 12개의 전파 환경으로 세분하였다.

Path morphology 분류에 있어서 건물의 높이와 밀집도 분류가 중요하다. 이를 위해서는 실제 환경에서의 건물의 분포를 고려해야 하며, 전파 특성에 있어서도 morphology별 특성 차이가 명확히 나타나야 한다.

건물의 높이에 따른 path morphology 분류는 실제 환경에서의 건물 높이 분포 자료[7]를 근거로 high

rise(22 m 이상), mid rise(11～22 m), low rise(4～11 m), rural(4 m 미만)으로 분류하였다. 실제 환경에서의 밀집도에 의한 path morphology 분류는 위성 사진에 기반한 GIS 자료를 입수하여 밀집도 산출 프로그램을 사용하여 대전과 서울 지역의 대표적인 환경들에 대해 밀집도를 산출하고, 이를 근거로 path morphology를 분류하였다. 실제 환경의 밀집도를 산출해 본 결과, high rise 환경의 경우 30 %, 20 %, 10 %, mid rise와 low rise 환경의 경우에는 40 %, 30 %, 20 %가 밀집도에 대한 전형적인 기준이 되며, 이러한 세 종류의 밀집도로 path morphology를 분류하는 것이 타당함을 확인하였다.

위에서 제시한 실제 환경에서의 건물 밀집도에 따른 path morphology 분류 기준에 대한 타당성을 검증하고 밀집도 분류의 경계를 확인하기 위해 광선 추적 기법을 이용한 시뮬레이션을 통해 전파 특성을 분석하였다. Delay spread(DS), 출발각(AoD) 및 도착각(AoA)에 대한 angle spread(AS)의 시뮬레이션 결과를 분석해 보면, high rise 환경의 경우 밀집도 15 %, 25 %를 경계로 전파 특성에 차이가 있음을 확인하였고, mid rise와 low rise 환경의 경우에도 25 %와 35 %를 밀집도 분류의 경계로 하는 것이 적절함을 확인하였다.

2-2 시뮬레이션 환경

전파 특성을 분석하기 위해 국내의 전파 경로 상에 존재할 수 있는 환경을 고려하여 앞 절에서 언급한 path morphology 분류에 대해 시뮬레이션 환경을 구현하였다. 시뮬레이션은 ray-launching 방법에 기반한 광선 추적 기법을 이용하였다. Ray-launching 방법은 복잡한 구조물에 대하여도 비교적 간단히 적용할 수 있다는 장점이 있으며, 시뮬레이터의 정확도는 기존의 상용 툴과 비교하여 검증하였다. 시뮬레이션 결과로부터 delay spread(DS), 출발각과 도착각의 angular spread(AS) 특성을 분석하고, 본 논문에서 제안한 path morphology 개념 및 분류에 대한 타당성을 분석하였다. 광선 추적 기법을 이용한 MIMO 채널 모델링을 수행하기 위해서는 앞에서 분류한 12개 path morphology에 대한 각각의 모델링이 필요하다. 모델링 환경의 건물은 비유전율과 도전율이 각각 $\varepsilon_r = 7.0$, $\sigma = 0.015$ S/m이며, 30 cm 두께의 콘크리트로 모델링하였다. 모델링 환경의 전체 면적은 500 m×500 m이고, 건물의 면적은 30 m×20 m로 동일하게 설정하였다. 건물의 높이는 실제 환경과 유사하게 모델링하였으며, high rise, mid rise, low rise의 경우 각각 약 30 m, 20 m, 10 m로 랜덤하게 배치하였고, rural의 경우에는 건물의 높이를 3 m로 균일하게 두었다. 주파수는 본 논문의 모델링 대상인 차세대 이동 통신 WiMAX 주파수 대역인 3.7 GHz로 선택하였고, 송신 EIRP는 0 dBm, 편파는 TE 모드로 설정하였다. 송신 안테나는 omni-directional 안테나로서 정중앙 건물 높이 +2 m 높이에 위치시켰으며, 수신 안테나는 지상 2 m 높이에 9,801개를 5 m 간격으로 균일하게 분포시켰다. 그림 2는 광선 추적 시뮬레이션을 수행하기 위하여 모델링한 high rise 환경의 일부를 나타낸 것이다.

2-3 시뮬레이션 결과 분석

그림 3은 high rise, high density(30 %) 환경에서 특정 수신점에서의 power delay profile과 출발각(AoD)과 도착각(AoA)에 대한 power angle spectrum을 나타낸 것이다. 아래의 식 (1)～(3)를 사용하면 각 수신점에 대해 아래와 같은 전력 분포로부터 delay spread (DS)와 angular spread(AS)를 구할 수 있다.

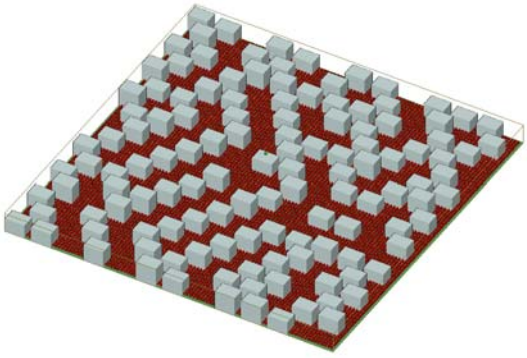
$$\sigma_\tau = \frac{\sqrt{\sum_n P_n \sum_n P_n \tau_n^2 - \left(\sum_n P_n \tau_n\right)^2}}{\sum_n P_n} \quad (1)$$

$$\sigma_\phi = \frac{\sqrt{\sum_n P_n \sum_n P_n \phi_n^2 - \left(\sum_n P_n \phi_n\right)^2}}{\sum_n P_n} \quad (2)$$

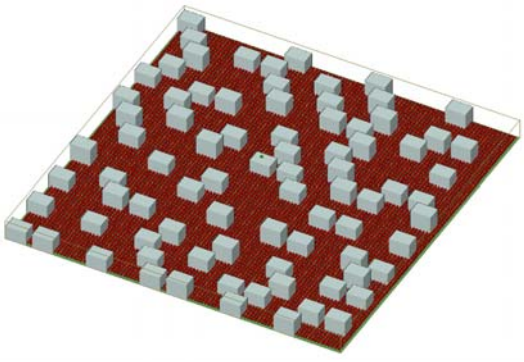
$$DS = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \sigma_{\tau,k}$$
$$AoA = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \phi_{r,k}$$
$$AoD = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \phi_{t,k} \quad (3)$$

위 식에서 P_n은 각 광선의 전력, N은 수신점의 개수, ϕ_t는 출발각, ϕ_r은 도착각을 나타낸다.

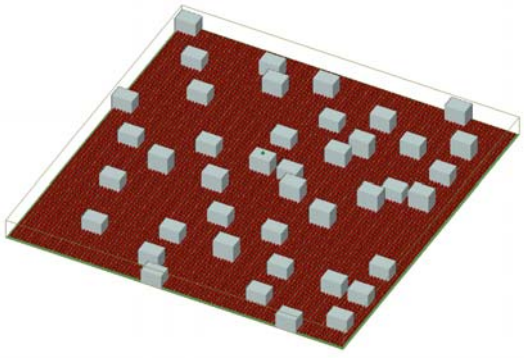
그림 4는 거리에 따른 delay spread(DS)와 출발각



(a) 고밀도(30 %)
(a) High density(30 %)



(b) 중밀도(20 %)
(b) Mid density(20 %)

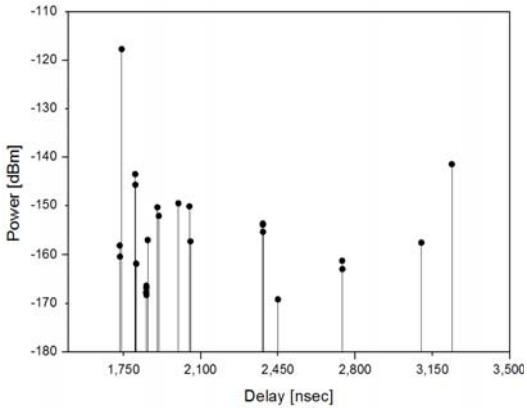


(c) 저밀도(10 %)
(c) Low density(10 %)

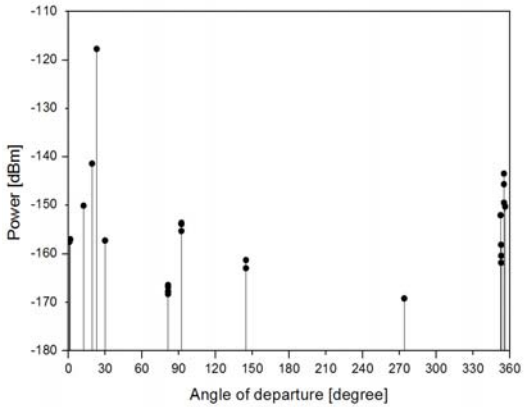
그림 2. 전파 환경 모델링(고층)
Fig. 2. Modeling of propagation environment(high rise).

과 도착각의 angular spread(AS)에 대한 분석 결과를 나타낸 것이다. 여기서는 high rise, high density 환경에 대한 결과만 나타내었다.

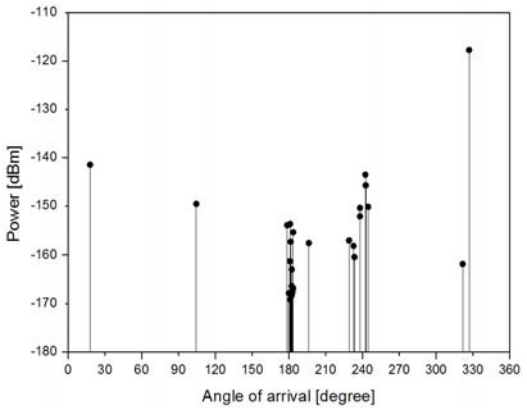
표 2는 DS와 AS에 대한 path morphology 모델링



(a) 전력 지연 프로파일
(a) Power delay profile

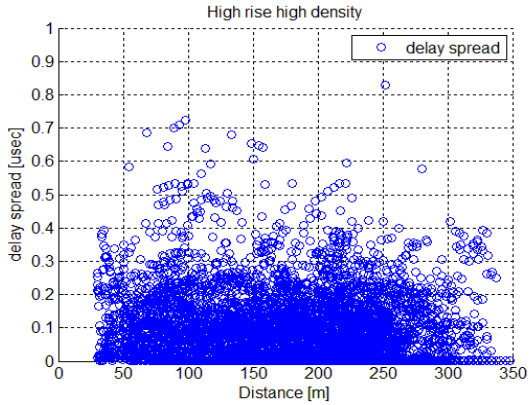


(b) 전력 각도 스펙트럼(출발각)
(b) Power angle spectrum(AoD)

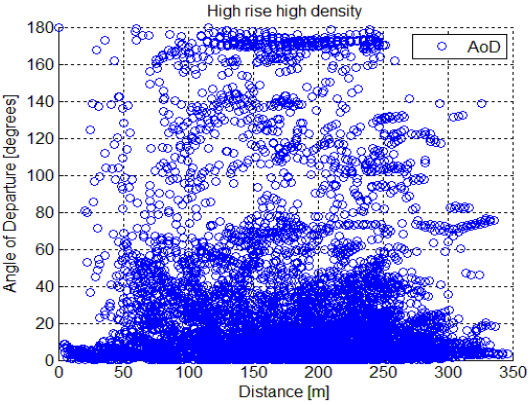


(c) 전력 각도 스펙트럼(도착각)
(c) Power angle spectrum(AoA)

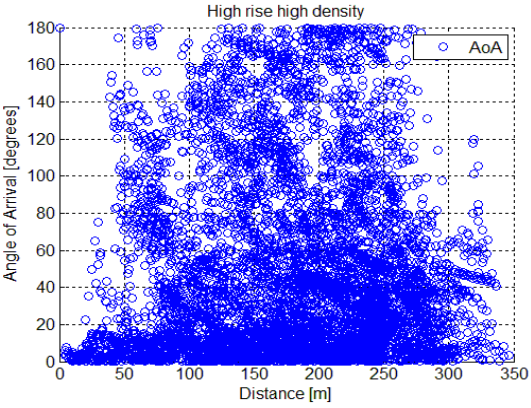
그림 3. 지연 프로파일 및 각도 스펙트럼 특성(고층, 고밀도)
Fig. 3. Characteristics of delay profile and angular spectrum(high rise, high density).



(a) 지연 시간 확산
(a) Delay spread



(b) 출발각의 각도 확산
(b) Angular spread of AoD



(c) 도착각의 각도 확산
(c) Angular spread of AoA

그림 4. 지연 시간 확산 및 각도 확산 특성(고층, 고밀도)
Fig. 4. Characteristics of delay spread and angular spread(high rise, high density).

표 2. Path morphology 모델링 결과(DS, AS)
Table 2. Modeling results for path morphologies(DS, AS).

Path morphology		Parameter		
Rise	Density	DS [nsec]	AS(AoD) [degrees]	AS(AoA) [degrees]
High	High(30 %)	108.3	34.27	48.51
	Mid(20 %)	167.9	38.41	38.23
	Low(10 %)	189.7	44.84	27.02
Mid	High(40 %)	64.9	23.53	59.55
	Mid(30 %)	116.1	31.66	49.84
	Low(20 %)	168.5	36.94	38.24
Low	High(40 %)	92.8	20.04	59.24
	Mid(30 %)	128.7	22.56	52.32
	Low(20 %)	187.4	28.68	38.38
Rural	High(30 %)	33.7	7.89	28.84
	Low(10 %)	15.4	1.58	6.89
Open area		0.38	0.20	0.21

결과를 정리한 것으로 DS와 AS는 전파 환경별 거리에 따른 값을 평균한 것이다.

표 2의 결과를 분석해 보면 밀집도가 높을수록, 건물의 높이가 높을수록 delay spread는 작아지는 것을 확인할 수 있다. 밀집도와 높이가 높아질수록 다중 경로에 의한 다중 반사가 많아져 전파 도달 거리가 짧아지기 때문에 수신점까지 도달하는 유효 광선이 적어짐으로써 delay spread가 작게 나타남을 알 수 있다. Open area는 자유 공간을 모델링한 것으로 대부분의 광선이 직접파인 경우로 delay spread를 확인한 결과 0 nsec에 근접함을 확인하였다.

그리고 밀집도가 높을수록, 건물의 높이가 낮을수록 AoD의 angular spread가 작아지는 경향을 확인할 수 있다. AoD는 송신점과 수신점의 직접파를 기준으로 한 반사파의 출발각의 개념으로, 밀집도가 높아질수록 사방으로 퍼져나가는 광선은 많지만 다중 경로에 의한 반사가 많아져 수신점까지 도달하는 유효 광선이 적어지기 때문에 delay spread와 같이 밀집도가 높을수록 angular spread가 작아지게 된다.

AoA의 경우에는 밀집도가 높을수록 수신기 주변의 다중 경로가 많이 형성될 수 있기 때문에 angular spread 값이 커지게 된다. Open area에서의 AoD와

AoA에 대한 angular spread는 모든 수신점이 LOS 환경이므로 0°에 근접한 작은 값이 됨을 알 수 있다.

실제 건물 환경을 고려하여 정밀 분류한 표 1의 path morphology 분류는 앞에서 분석한 전파 특성 측면에서 살펴볼 때 delay spread(DS), AoD와 AoA의 angular spread(AS) 모두 명확한 전파 환경별 차이와 경향성을 보이고 있기 때문에 매우 타당한 것으로 판단된다.

Ⅲ. 측정을 통한 검증

3-1 측정 환경

Path morphology에 의한 전파 환경 모델링에 사용된 시뮬레이션 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 도심 지역의 밀집지역 1개 루트에 대해서 예비 측정을 실시하였다. MIMO 채널 특성 측정을 위해 12층 건물 옥상에 설치된 송신단에 8개의 배열 안테나를 설치하고, 차량에 설치된 수신단에 8개의 배열 안테나를 1 λ 간격으로 설치하여 측정을 수행하였다. 측정은 한국전자통신연구원에서 개발된 BECS 시스템을 사용하여 수행하였다. 그림 5는 MIMO 채널 특성 측정에 사용한 측정 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 측정 시스템에 대한 세부 규격은 표 3과 같다.

3-2 측정 사이트

측정 지역은 앞에서 분류한 path morphology 환경을 고려하여 high rise, high density 환경을 선정하였다. 선정된 지역은 대전시 둔산동 지역으로 측정 경로는 그림 6과 같다.

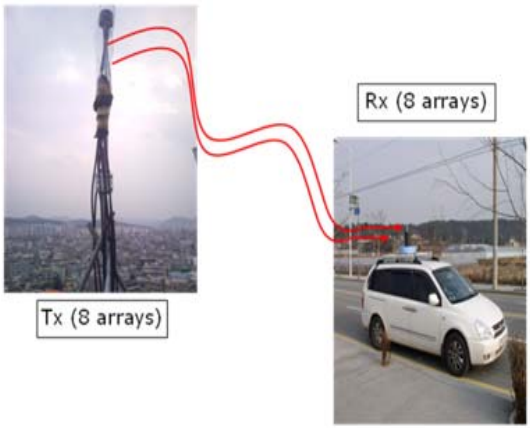


그림 5. 측정 시스템 구성
Fig. 5. Measurement set-up.

표 3. 측정 시스템 세부 규격
Table 3. Specification of the measurement system.

Item	Unit	Value
Frequency	GHz	3.7
Bandwidth	MHz	100/40/20/10/5
Chip rate	Mcps	100
PN length	chips	31～4,095
Rx ADC sampling	MSa/s	400
Rx ADC resolution	bits	12
Rx ADC memory	Gsa	2
Tx output power	dBm	+35
Tx attenuation	dB	30
Rx attenuation	dB	60
Rx input power	dBm	−40
Receiver NF	dB	7.5

그림 6. 측정 경로(고층, 고밀도 지역: 대전 둔산)
Fig. 6. Measurement route(high rise, high density: Doonsan, Dajeon).

3-3 측정치와 시뮬레이션 결과 비교 및 검증

측정 환경에서는 송신안테나의 높이가 각 환경마다 다르기 때문에 실제 안테나의 높이를 고려하여 시뮬레이션하고 측정 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교, 검증하였다. 본 논문에 보이지는 않았지만 측정된 delay profile과 power angle spectrum은 통계적으로 그림 3과 그림 4에 보인 시뮬레이션 결과와 유사

표 4. 측정치와 시뮬레이션 결과 비교(DS, AS)
Table 4. Comparison of the measurement results with the simulated ones(DS, AS).

측정 데이터		시뮬레이션 데이터	
DS [ns]	AS(AoA) [degree]	DS [ns]	AS(AoA) [degree]
98.1	50.40	108.3	47.95

한 특성을 가지며, 측정치에 대한 DS와 AS 결과는 측정 데이터에서 BECS 시스템에 의해 잡음 성분이 제거된 CIR(Channel Impulse Response)과 PAS(Power Azimuth Spectrum) 데이터로부터 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 계산하였다. 표 4는 측정치와 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로 주어진 전파 환경에 대한 거리에 따른 값을 평균한 것이다.

측정 데이터에서 AoD 데이터에 근본적인 오류가 발견되어 본 논문에서는 delay spread(DS)와 AoA의 angular spread 만을 비교 분석하였다.

측정 데이터와 시뮬레이션 데이터를 모델링한 결과를 비교해 보면, 두 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과는 시뮬레이션 알고리즘이 정확함을 입증해 주고 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 기존의 MIMO 채널 모델에서 사용하고 있는 도심, 부심, 시골, 개활지 등 포괄적인 전파 환경 분류 방법보다 더 효율적인 path morphology 분류 개념을 제안하고, morphology 분류의 타당성을 측정과 시뮬레이션 결과를 이용하여 검증하였다.

Path morphology는 건물의 높이와 밀집도에 따라 12개 환경으로 분류하였고, 전파 특성 시뮬레이션을 위해 광선 추적 기법을 이용하였다. 시뮬레이션과 측정 데이터를 사용하여 MIMO 채널 모델 파라미터인 delay spread, AoD와 AoA의 angular spread 특성을 분석하였다. 측정치와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 확인하였으며, path morphology에 있어서 건물의 높이와 밀집도 차이에 따른 뚜렷한 경향성을 확인함으로써 path morphology 분류 개념의 타당성을 입증하였다.

국내 환경에서의 path morphology에 기반한 MIMO 채널 모델은 MIMO 시스템 설계 단계에서의 성능 향상 및 무선 통신 서비스의 품질 향상을 위한 매우 중요한 자료가 될 것이다. 또한 실제의 MIMO 채널 환경에 대해 path morphology별로 포괄적이고 정확한 모델링을 하기 위하여 향후 많은 측정을 통해서 모델 파라미터 값을 도출하고, 각 파라미터에 대한 통계적 특성까지 분석할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] 김원섭, 박재준, 이준환, 김명돈, 정현규, "이동통신 MIMO 채널 모델링 기술 동향", 전자통신동향 분석, 제23권, 2008년.

[2] 3GPP, "Spatial channel model for MIMO simulation", TR 25.996 v6.1.0, Sep. 2003, [Online] http://www.3gpp.org/.

[3] L. Mucchi, C. Staderini, J. Ylitalo, and P. Kyosti, "Modified spatial channel model for MIMO wireless system", *EURASIP Journal on Wireless Comm. and Networking*, Article ID 68512, 2007.

[4] WINNER I WP5, "Final report on link level and system level channel models", D5.4 v.1.4, 2005.

[5] WINNER II WP1: "WINNER II channel models", Deliverable D1.1.2, Sep. 2007.

[6] D. S. Baum, J. Salo, G. Del Galdo, M. Milojevic, P. Kyosti, and J. Hansen, "An interim channel model for beyond-3G systems", *IEEE VTC'05*, Stockholm, Sweden, May 2005.

[7] 한국전파진흥원, 무선국 실태 조사 자료(개인 적 자료 협조), 2009년.

정 원 정

2009년 2월: 충남대학교 전자·전파·정보통신공학부 (공학사)
2009년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란, 전파전파 특성 예측 모델링

김 명 돈

1993년 2월: 동아대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 충남대학교 전자공학과 박사과정수료
1995년 8월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
[주 관심분야] 전파전파, 채널 모델링, MIMO, 이동 통신

유 지 호

2009년 8월: 충남대학교 전자·전파·정보통신공학부 (공학사)
2009년 9월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 전자파 전파 및 산란, 전파전파 특성 예측 모델링

정 현 규

1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 12월: Polytechnic Institute of NYU Elect. Eng. (공학박사)
2001년 10월~현재: 한국전자통신연구원 무선통신연구부장
[주 관심분야] 전파전파, 채널 모델링, MIMO, 이동 통신

김 태 홍

1997년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 2월: 전남대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
2002년 5월~2006년 2월: 전남대학교 고품질전기전자부품 및 시스템 연구센터 전문연구요원
2006년 3월~현재: 충남대학교 전자파환경기술연구센터 연구교수
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 수동 소자 설계

배 석 희

1989년 2월: 연세대학교 천문기상학 (이학사)
1991년 2월: 연세대학교 천문대기학 (이학석사)
2000년 4월: 연세대학교 천문우주학 박사수료
2007년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
1991년~2006년 5월: 정보통신부 전파연구소 공업연구사
2006년~2007년: 정보통신부 전파연구소 공업연구관
2008년~현재: 방송통신위원회 전파연구소 공업연구관
1999년~현재: 한국 ITU-R 연구위원회 SG3(전파전파) 분과 의장
[주 관심분야] Radio Propagation & Modeling, Spectrum Management & Computer-aided Technigues

백 정 기

1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학석사)
1988년 9월: Virginia Tech. 전자파 전파 (공학박사)
1978년 3월～1983년 2월: 국방과학연구소
1988년 10월～1989년 2월: 한국전자통신연구원
1989년 3월～1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 부교수
2009년 1월～2009년 12월: 한국전자파학회 회장
1995년 2월～현재: 충남대학교 전파공학과 교수
2002년 3월～현재: 충남대학교 전자파환경기술연구(EMERC) 센터장
[주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향