

# IEEE 802.16n 기반 단말간 직접통신을 위한 채널 모델링

준회원 이새롬\*, 이규범\*, 정회원 장성철\*\*, 종신회원 윤철식\*\*, 정회원 최지훈\*

## Channel Modeling for Mobile-to-Mobile Communications Based on IEEE 802.16n

Sae Rom Lee\*, Kyubum Lee\* Associate Members, Sungcheol Chang\*\* Regular Member, Chulsik Yoon\*\* Lifelong Member, Jihoon Choi\* Regular Member

### 요약

본 논문에서는 IEEE 802.16n 기반 단말간 직접통신을 위한 MIMO (multi-input multi-output) 채널 모델링 방법을 제안한다. 송신단과 수신단에 모두 이동성을 반영하기 위하여 기하학적 이중링 산란 환경을 적용하고 기존 802.16m에서 사용하는 채널 모델링 방식을 단말간 직접통신에 적합하도록 변형하여 새로운 채널 모델을 제안한다. 모의실험을 통해 시간영역 및 공간영역에서 제안된 채널 모델의 통계적 특성을 분석하고, 모의실험을 통해 기존 802.16m 기지국-단말간 채널 모델에서의 링크 성능과 제안된 채널 모델에서의 링크 성능을 비교한다.

**Key Words** : direct mode operation (DMO), mobile-to-mobile(M2M) communications, MIMO channel model, IEEE 802.16n, spatial correlation

### ABSTRACT

In this paper, we propose a new multi-input multi-output (MIMO) channel modeling method for mobile-to-mobile (M2M) communications based on IEEE 802.16n. To reflect the mobilities at the transmitter and the receiver, we propose a new channel model by invoking the geometrical two-ring scattering model and modifying the conventional IEEE 802.16m fixed-to-mobile (F2M) channel model considering M2M communication environments. Through computer simulations, we analyze the statistical properties of proposed channel model in terms of the time correlation and the spatial correlation. Finally, the performance of the system using the proposed M2M channel model is compared with that using the conventional 802.16m F2M channel model by link level simulations.

### 1. 서론

최근 모든 사물이 네트워크로 연결돼 언제나 어디서나 통신할 수 있는 사물지능통신의 중요성이 부각되고 있다. 특히 재난 발생시 기존 통신망이 붕괴된 상황에서 긴급 구조 혹은 비상 연락을 지원하는 국가

재난무선통신망의 필요성이 증대되고 있다. 기존에는 TETRA (terrestrial trunked radio)와 같은 별도의 통신 시스템을 사용하고 있지만, 최근에는 상용 이동통신망과 같은 기존 통신 시스템에서 단말간 직접통신 (M2M: mobile-to-mobile)을 이용하여 기존 재난망을 대신하고자 하는 연구가 진행되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 현재

\* 본 연구는 방송통신위원회의 방송통신기술개발사업의 일환으로 수행되었음 [10035156, WiBro 기반 차세대 국가통합망 무선접속기술 연구].  
 \* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 2011-0003592).  
 \* 한국항공대학교 항공전자및정보통신공학부 정보통신공학전공 ((lsr421004, up2225)@hanmail.net, jihoon@kau.ac.kr) (°: 교신저자)  
 \*\* 한국전자통신연구원 무선접속기술연구팀 (scchang@etri.re.kr, csyoon@etri.re.kr)  
 논문번호: KICS2011-07-280, 접수일자: 2011년 7월 4일, 최종논문접수일자: 2011년 9월 5일

IEEE 802.16 working group의 802.16n task group에서 단말간 직접통신에 대한 표준화 작업이 이루어지고 있고, 3GPP의 MTC (machine type communication), 3GPP2의 SED (smart embedded device) 등 상용 이동통신망에 재난통신을 지원하기 위한 표준화 활동이 진행되고 있다<sup>[2],[3]</sup>.

일반적으로 시스템의 성능을 평가하기 위해서는 실제 무선 채널과 유사한 특성을 가지는 채널을 모델링하여 모의실험을 수행한다. 그러나 일반적인 이동통신의 경우 기지국-단말간 통신 (F2M: fixed-to-mobile) 이므로 기지국은 고정되어 있고 단말만 이동하는 것으로 간주하여 무선 채널을 모델링 한다. 단말간 직접통신에서는 송신단과 수신단이 동시에 이동하므로 송수신단의 이동성이 모두 반영된 새로운 채널 모델이 필요하다.

단말간 직접통신을 고려한 SISO (single-input single output) 채널 모델에 관한 연구로는 주파수축에서 등간격으로 다수의 랜덤 정현파를 생성하는 이산 스펙트럼 모델 (discrete line spectrum model)과 백색 잡음을 도플러 필터에 통과시켜서 페이딩 채널을 생성하는 기저대역 도플러 필터링 모델 등이 있다<sup>[4],[5]</sup>. 단말간 직접통신의 통계적 특성에 대한 기준 채널 모델 (reference model)은 [6]에서 제안되었고, 이를 실제로 구현하기 위한 모의실험 모델은 [7]에서 제안되었다. 또한 단말간 직접통신을 위한 SISO 채널 모델을 확장하여 MIMO (multi-input multi-output) 채널 모델에 관한 연구도 진행되고 있다. [8]에서는 기하학적 이중링 산란 환경을 고려하여 MIMO 환경에서의 기준 채널 모델과 모의실험 모델이 제안되었다. [9-11]에서는 비등방성 산란 (non-isotropic scattering) 환경을 고려한 3차원 concentric-cylinder 모델로부터 기준 채널 모델과 모의실험 모델이 제안되었다.

현재 IEEE 802.16 working group에서 단말간 직접통신에 대한 표준화 작업이 이루어지고 있으나 아직까지 이에 적합한 채널 모델링 방식은 제시되지 않고 있다. IEEE 802.16m에서는 기지국-단말간 MIMO 채널 생성을 위해 ray-based SCM (spatial channel model) 방식을 사용하여 안테나간의 상관성을 반영한다<sup>[12]</sup>. 그러나 SCM의 경우 단말만 이동하는 것으로 가정하여 채널 모델링이 이루어지므로 단말간 직접통신의 경우 송수신단이 모두 이동하는 경우를 고려한 새로운 채널 모델링 방식이 요구된다. 본 논문에서는 송수신단의 이동성을 모두 반영하기 위해 [8]에서 제안된 기하학적 이중링 (geometrical two-ring) 산란 모델을 적용하여 IEEE 802.16n에 적합한 단말간 직

접통신 채널 모델링 기법을 제안한다. 제안된 방식에서는 ray-based 방식을 사용하고, [13]에 정의된 채널 생성 시나리오를 단말간 직접통신 환경에 맞게 변형하여 MIMO 페이딩 채널을 생성한다. 모의실험을 통해 제안된 채널 모델의 시간적 상관 특성 (time correlation)과 공간적 상관 특성 (spatial correlation)을 분석하고 검증하며 기지국-단말간 채널 모델과 직접통신 채널 모델의 링크 레벨 모의실험을 통해 링크 성능을 비교 분석한다.

본 논문의 2절에서는 기존의 기지국-단말간 통신의 채널 모델링 방식과 802.16m 및 단말간 직접통신에서의 MIMO 채널 모델링 기법에 대해 설명한다. 3절에서는 IEEE 802.16n 기반 단말간 직접통신을 위한 채널 모델을 제안한다. 4절에서 모의실험을 통해 제안된 채널 모델의 통계적 특성을 분석하고 링크 레벨 모의실험을 통해 성능을 평가한다.

## II. 기존 채널 모델링 기법

### 2.1 기존 채널 모델과 단말간 직접통신 채널 모델 비교

그림 1은 기지국-단말간 통신에서의 채널을 나타낸다. 기지국은 고정되어 있고 단말만 이동성이 있으므로 기지국으로부터 송신된 신호는 단말 주변에 위치한 다수의 산란기 (scatterer)에 의해 산란된 후 단말로 수신된다. 일반적으로 단말 주변에 링 형태로 산란기가 균일하게 존재하는 것으로 가정하고 기하학적 단일링 산란 환경을 적용하여 채널을 모델링한다<sup>[14]</sup>. 기지국-단말간 통신 채널의 이론적인 자기상관 (autocorrelation) 특성은 다음과 같다.

$$R(\tau) = J_0(2\pi f_{R_x}\tau) \quad (1)$$

이때  $J_0()$ 는 0차 베셀 함수이고,  $f_{R_x}$ 는 수신단에서의 도플러 주파수를 나타낸다.

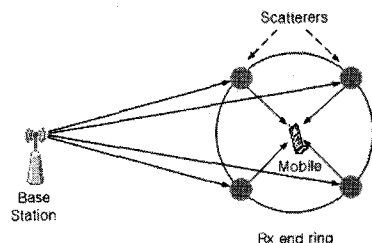


그림 1. 기지국-단말간 통신의 채널 환경  
Fig 1. Channel environment for fixed-to-mobile communications

그림 2는 단말간 직접통신을 고려할 때 채널 환경을 나타낸다. 이 경우 기존 기지국-단말 채널 모델과는 달리 수신단 뿐만 아니라 송신단도 이동성이 있으므로 송신단과 수신단 주변에 모두 산란기가 존재하는 환경을 가정하고 채널을 모델링한다. 단말간 직접통신에 대한 구체적인 채널 모델링 방법에 대해서는 2.3절에서 설명한다. 단말간 직접통신 채널의 이론적인 자기상관 특성은 다음과 같이 주어진다[7].

$$R(\tau) = J_0(2\pi f_{Tx}\tau)J_0(2\pi f_{Rx}\tau) \quad (2)$$

이때  $f_{Tx}$ 는 송신단 도플러 주파수를 나타낸다.

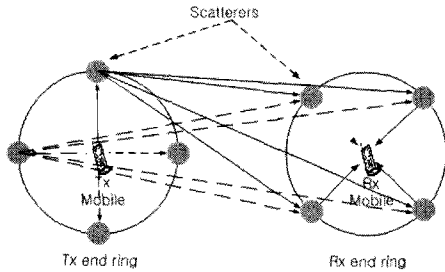


그림 2. 단말간 직접통신의 채널 환경  
Fig 2. Channel environment for mobile-to-mobile communications

### 2.2 802.16m의 MIMO 채널 모델링 기법

IEEE 802.16m EMD (evaluation methodology document) 문서에 정의된 ray-based MIMO 페이딩 채널 생성 방법은 다음과 같다[13].

- Step1) 채널 생성 시나리오를 선택한다 (urban / suburban / rural, macro / micro 등).
- Step2) 송수신 단말의 위치를 정하고, 송수신 안테나 사이의 거리, 안테나의 방향, 단말의 이동 방향 등 거리와 방향에 대한 파라미터를 정의한다.
- Step3) [13]의 3.2.4절 표 8을 기반으로 단말 위치에 따른 shadowing factor를 결정한다.
- Step4) 각 클러스터(cluster)의 시간 지연 및 전력을 결정하고 송수신단의 AS (angle spread)를 반영하여 클러스터에 포함되는 부경로(subpath)의 AOD (angle of departure)와 AOA (angle of arrival)를 계산한다.
- Step4) AOD와 AOA에 따라 송신단과 수신단의 안테나 이득을 계산한다.
- Step5) MIMO 채널을 생성한다. Ray-based MIMO 채널의 경우 여러 개의 부경로들을 더해서 하나의

클러스터를 생성하고 이를 [13]의 3.2.8.절 표 22에 정의된 클러스터 수 만큼 생성하여 다중 경로 채널을 생성한다.  $u$ 번째 수신 안테나,  $s$ 번째 송신 안테나,  $k$ 번째 클러스터에 대한 채널값은 다음과 같다.

$$h_{u,s,k}(t) = \sqrt{\frac{P_k \sigma_{SF}}{20}} \sum_{m=1}^{20} \left[ \chi_T^{(v)}(\theta_{k,m,AOD}) \right]^T \times \begin{bmatrix} e^{j\Phi_{k,m}^{(v,i)}} & \sqrt{r_k} e^{j\Phi_{k,m}^{(v,h)}} \\ \sqrt{r_k} e^{j\Phi_{k,m}^{(h,i)}} & e^{j\Phi_{k,m}^{(h,h)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_R^{(v)}(\theta_{k,m,AOA}) \\ \chi_R^{(h)}(\theta_{k,m,AOA}) \end{bmatrix} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_s \sin(\theta_{k,m,AOD})} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d_r \sin(\theta_{k,m,AOA})} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda}|v_R| \cos(\theta_{k,m,AOA} - \theta_{R,s})t}$$

Step6) LOS (line of sight) 환경인 경우에는 K-factor를 고려하여 NLOS (non LOS)의 전력을 조절하고, 직접 경로(direct path) 성분을 더해준다.

$$h_{u,s,k}(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{K+1}} h_{u,s,k} + \sqrt{\frac{K}{K+1}} h^{LOS} & k = 1 \text{ (first tap)} \\ \sqrt{\frac{1}{K+1}} h_{u,s,k} & k \neq 1 \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 K-factor를 의미하고  $h^{LOS}$ 는 직접 경로 성분을 의미한다.

### 2.3 단말간 직접통신을 고려한 MIMO 채널 모델

그림 3은 하나의 클러스터에 대한 단말간 직접통신의 기하학적 이중링 MIMO 채널 환경을 나타낸다. 그림에서는 설명의 편의를 위해 2x2 MIMO 채널을 가정하였다. 송수신단 사이의 거리는  $D$ 이고, 송신단과 수신단에는 반지름이  $R_T$ 와  $R_R$ 인 링 상에 각각  $M, N$ 개의 산란기가 존재한다.  $\theta_{m,AOD}$ ,  $\theta_{n,AOA}$ 는 각각  $m$ 번째 송신 부경로의 AOD와  $n$ 번째 수신 부경로의 AOA를

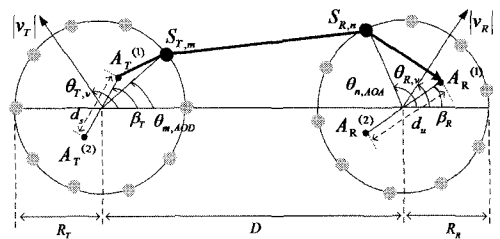


그림 3. 단말간 직접통신을 고려한 기하학적 이중링 MIMO 채널 모델  
Fig 3. The geometrical two-ring MIMO channel model for mobile-to-mobile communications

의미하며,  $d_s$ 와  $d_u$ 는 송신 안테나 사이의 간격과 수신 안테나 사이의 간격을 나타낸다.  $\beta_T, \beta_R$ 은 송/수신 안테나와 x축과의 각도이고, 송/수신 단말은 각각  $\theta_{T,v}, \theta_{R,v}$ 의 방향으로  $|v_T|, |v_R|$ 의 속도로 이동한다고 가정한다. 이 때 첫 번째 송신 안테나  $A_T^{(1)}$ 에서  $m$ 번째 송신단 산란기  $S_{T,m}$ 과  $n$ 번째 수신단 산란기  $S_{R,n}$ 에서 반사된 후 첫 번째 수신 안테나  $A_R^{(1)}$ 에 도달하는 경로는 다음과 같이 유도된다<sup>[8]</sup>.

$$\hat{h}_{11}(t) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mn} e^{j\{2\pi[f_T^{(m)} + f_R^{(n)}]t + \theta_{mn} + \theta_0\}} \quad (5)$$

여기서  $g_{mn}$ 은 송신단과 수신단 사이의 기하학적 경로에 의해 결정되는 이득과 위상을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$g_{mn} = a_m b_n \quad (6)$$

$$a_m = e^{j\pi(d_s/\lambda)\cos(\theta_{m,AOD} - \beta_T)} \quad (7)$$

$$b_n = e^{j\pi(d_u/\lambda)\cos(\theta_{n,AOA} - \beta_R)} \quad (8)$$

또한  $f_T^{(m)}, f_R^{(n)}$ 는 송신단과 수신단에 의한 도플러 주파수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_T^{(m)} = f_{T,max} \cos(\theta_{m,AOD} - \theta_{T,v}) \quad (9)$$

$$f_R^{(n)} = f_{R,max} \cos(\theta_{n,AOA} - \theta_{R,v}) \quad (10)$$

$\theta_{m,n}$ 은 0과  $2\pi$  사이에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 위상이고,  $\theta_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_0 = -\frac{2\pi}{\lambda} \{R_T + D + R_R + R_R \cos(\theta_{n,AOA}) - R_T \cos(\theta_{m,AOD})\} \quad (11)$$

$\theta_{m,AOD}, \theta_{n,AOA}$ 가 정해지면  $\theta_0$ 는 하나의 상수값으로 표현되고  $\theta_{m,n}$ 은 0과  $2\pi$  사이의 랜덤 위상이므로  $\theta_{m,n}$ 에  $\theta_0$ 를 포함하여 식 (5)을 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\hat{h}_{11}(t) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g_{mn} e^{j\{2\pi[f_T^{(m)} + f_R^{(n)}]t + \theta_{mn}\}} \quad (12)$$

### III. 제안된 채널 모델링 기법

#### 3.1 단말간 직접통신에서의 채널 분류

기지국-단말간 통신의 채널은 직접 경로(direct-path)가 있는 경우 LOS, 직접 경로가 없이 산란 경로만 존재하는 경우 NLOS로 구분된다. 이 경우 LOS의 K factor는 산란 경로들의 전력 대비 직접 경로의 전력으로 계산할 수 있다. 기지국-단말간 채널에서의 K factor는 다음과 같다.

$$K \text{ factor} = \text{LOS 전력} / \text{NLOS 전력} \quad (13)$$

반면 단말간 직접통신에서는 직접 경로 없이 송신단과 수신단에서 모두 산란이 발생하여 오직 DB(double-bounced) 경로만 존재하는 경우를 NLOS 채널 모델로 정의하고, DB 경로 이외의 성분이 존재하는 경우 LOS 채널 모델로 정의한다. LOS 채널 모델의 경우, 송수신 안테나간의 직접 경로, SBT(single-bounced transmit), SBR(single-bounced receive), DB 경로가 모두 존재한다<sup>[9]</sup>. 여기서 직접 경로는 송수신단에서 모두 산란이 일어나지 않고 수신된 신호 성분을 의미하고 SBT는 송신단에서 산란된 신호가 수신 안테나로 산란 없이 직접 수신되는 경우이며, SBR은 송신단에서 산란 없이 전송된 신호가 수신단에서만 산란이 발생하는 것으로 기존 기지국-단말간 채널에서 NLOS 경우와 유사하다. 단말간 직접 통신을 위한 LOS 채널 생성 시 K factor는 다음과 같이 결정된다.

$$K \text{ factor} = (\text{직접경로 전력}) / (\text{SBT+SBR+DB-경로 전력}) \quad (14)$$

즉, 비 직접경로(non-direct path) 전력은 SBT, SBR, DB 전력의 합으로 주어지며 단말간 직접통신의 채널 모델에서는 SBT, SBR, DB 전력의 비율이 추가적으로 정의되어야 한다.

#### 3.2 제안된 채널 모델링 기법

식 (5)는 각 ray의 AOD, AOA가 정해진 경우 MIMO 송수신 안테나간의 시간 영역에서 1개의 탭에 대한 채널을 정의한다. 본 논문에서는 ray-based 기법을 이용하여 802.16m EMD에 정의된 채널 생성 시나리오별로 power delay profile 및 공간 영역에서의 angle spread 특성을 반영하여 단말간 직접통신을 위한 MIMO 채널을 생성한다. 채널 생성시 송수신 단말

은 모두 omni directional 안테나를 사용하는 것으로 가정한다. 채널 생성 방법은 다음과 같이 요약된다.

- Step1) 802.16m EMD를 고려하여 채널 생성 시나리오를 선택한다.
- Step2) 송수신 단말의 위치를 정하고, 송신 안테나 사이의 거리, 수신 안테나 사이의 거리, 안테나의 방향, 단말의 이동 방향 등 거리와 방향에 대한 파라미터를 정의한다.
- Step3) Shadowing factor를 결정한다 (802.16m EMD [13]의 3.2.4절 표 8참조).
- Step4) 각 클러스터의 시간 지연 및 전력은 802.16m EMD에 시나리오 별로 정의된 값을 그대로 이용한다. 동일한 클러스터에 속한 모든 부경로의 시간 지연은 동일하다고 가정한다.
- Step5) 공간 파라미터를 정의한다. 수신단의 경우 802.16m EMD의 3.2.5절에 정의된 파라미터를 이용하고 송신단의 경우 단말간의 통신을 고려하여 파라미터를 다음과 같이 정의한다.
  - 송신단 AOD는 802.16m EMD에 정의된 파라미터에 상수값을 곱해서 AOA의 분산과 AOD의 분산이 동일해지도록 한다.
  - 송신단 angle spread는 수신단 angle spread와 동일한 값을 사용한다.
- Step6) 802.16m EMD의 표 65를 이용하여 AOD offset과 AOA offset을 계산한다.
- Step7) MIMO 채널을 생성한다. u번째 수신 안테나, s번째 송신 안테나, k번째 클러스터에 대한 채널값을 다음과 같이 생성한다.

$$\begin{aligned}
 h_{u,s,k}(t) = & \sqrt{\frac{P_k \sigma_{SF}}{400}} \sum_{m=1}^{20} \sum_{n=1}^{20} \left[ \begin{array}{c} \chi_T^{(v)}(\theta_{k,m,AOD}) \\ \chi_T^{(h)}(\theta_{k,m,AOD}) \end{array} \right]^T \\
 & \times \begin{bmatrix} e^{j\Phi_{k,m,n}^{(v,v)}} & \sqrt{r_k} e^{j\Phi_{k,m,n}^{(v,k)}} \\ \sqrt{r_k} e^{j\Phi_{k,m,n}^{(h,v)}} & e^{j\Phi_{k,m,n}^{(h,k)}} \end{bmatrix} \\
 & \times \begin{bmatrix} \chi_R^{(v)}(\theta_{k,n,AOA}) \\ \chi_R^{(h)}(\theta_{k,n,AOA}) \end{bmatrix} \\
 & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_{k,m,AOD})} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_r \sin(\theta_{k,n,AOA})} \\
 & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} |v_T| \cos(\theta_{k,m,AOD} - \theta_{r,v})t} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} |v_R| \cos(\theta_{k,n,AOA} - \theta_{r,v})t}
 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서  $P_k$ 는  $k$ 번째 클러스터의 전력이고,  $\sigma_{SF}$ 는 shadowing factor이며,  $\theta_{k,m,AOD}$ 와  $\theta_{k,n,AOA}$ 는 안테나의 정면 방향을 기준으로  $k$ 번째 클러스터의  $m$ 번째 부경

로의 송신 각도,  $n$ 번째 부경로의 수신 각도를 각각 나타낸다.  $\chi_T^{(v)}(\theta_{k,m,AOD})$ ,  $\chi_R^{(v)}(\theta_{k,n,AOA})$ 는 송수신단의 V-pol 안테나 특성을 의미하고,  $\chi_T^{(h)}(\theta_{k,m,AOD})$ ,  $\chi_R^{(h)}(\theta_{k,n,AOA})$ 는 송수신단의 H-pol 안테나 특성을 나타낸다.  $r_k$ 는  $k$ 번째 클러스터에서 송수신단의 vertical-horizontal 과 vertical-vertical의 전력비를 나타낸다.  $\Phi_{k,m,n}^{(r,v)}$ 는  $k$ 번째 클러스터의  $m$ 번째 송신 부경로와  $n$ 번째 수신 부경로의 위상 오프셋이다. 이때, 송신단측은  $x$ , 수신단측은  $y$ 로 나타내며 H-pol은  $h$ 로 V-pol은  $v$ 로 표시한다. 안테나의 polarization이 없는 경우 식 (15)은 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_{u,s,k}(t) = & \sqrt{\frac{P_k \sigma_{SF}}{400}} \sum_{m=1}^{20} \sum_{n=1}^{20} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_s \sin(\theta_{k,m,AOD})} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_r \sin(\theta_{k,n,AOA})} \\
 & \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} |v_T| |\cos(\theta_{k,m,AOD} - \theta_{r,v})t|} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} |v_R| |\cos(\theta_{k,n,AOA} - \theta_{r,v})t|} e^{j\Phi_{k,m,n}}
 \end{aligned} \quad (16)$$

#### IV. 모의실험 결과

모의실험을 통해 제안된 채널 모델의 유효성을 확인한다. 모의실험에서는 16m EMD에 정의된 채널 시나리오 중에서 urban macro NLOS를 사용하고, 송수신단에 쌍극(dipole) 안테나를 각각 2개씩 사용하였다. 반송파 주파수는 2GHz이고, 송수신단의 이동속도는 각각 30km/h로 설정하였다.

##### 4.1 단말간 직접통신에서의 통계적 채널 특성

그림 4와 그림 5는 기지국 단말간 채널과 단말간 직접통신 채널의 시간적 상관 특성을 나타낸다. 송신단과 수신단의 이동 방향은 각각  $\pi/3$ ,  $\pi/3$ 로 가정하고, 첫 번째 송신 안테나와 첫 번째 수신 안테나간 채널의 시간적 상관 특성을 고려하였다. 기지국-단말간 통신

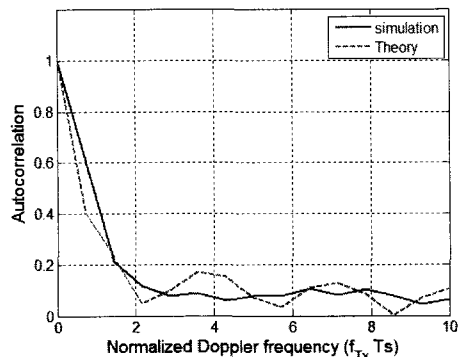


그림 4. 기지국-단말간 통신 채널의 시간적 상관 특성  
Fig 4. Time correlation properties for fixed-to-mobile communication channels

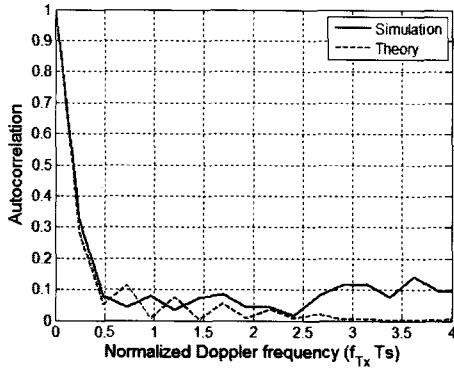


그림 5. 단말간 직접통신 채널의 시간적 상관 특성  
Fig 5. Time correlation properties for mobile-to-mobile communication channels

과 단말간 직접통신의 이론적인 상관 특성은 식 (1), (2)로 주어진다. 단말간 직접통신 채널의 이론적 상관 특성은 두 베셀 함수의 곱으로 표현되므로 기지국-단말간 통신에 비해 상관 특성의 변동이 심하다. 그림 5에서 제안된 채널 모델을 사용하여 생성된 채널의 시간적 상관 특성이 이론적 상관 특성과 유사함을 알 수 있다. 참고로 모의실험에서는 ray-based 방식을 사용하여 채널을 1회 생성한 후 상관값을 구하였다. 참고 문헌 [7]의 그림 5에서 보인 통계적 채널 모델의 상관 값 오차가 최대 0.17 정도인 점을 감안할 때 제안된 채널 모델의 상관 특성이 이론적 상관 특성과 유사하다고 판단할 수 있다.

그림 6 및 그림 7은 기지국-단말간 채널과 단말간 직접통신 채널의 공간적 상관 특성을 도시한다. 기본적인 모의실험 환경은 그림 4 및 5와 동일하고, 공간적 상관 특성을 평가하기 위해 안테나 사이의 간격을 변화시키면서 모의실험을 진행하였다. 그림에서 x축은 안테나 사이의 간격을 나타내고, 송신 안테나 간격

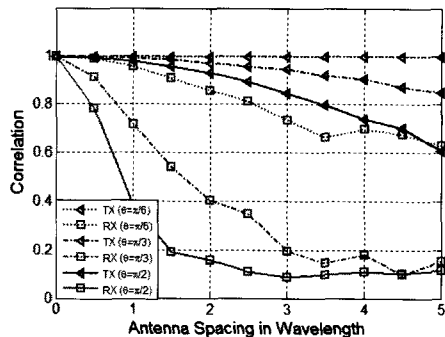


그림 6. 기지국-단말간 통신 채널의 공간적 상관 특성  
Fig 6. Spatial correlation properties for fixed-to-mobile communication channels

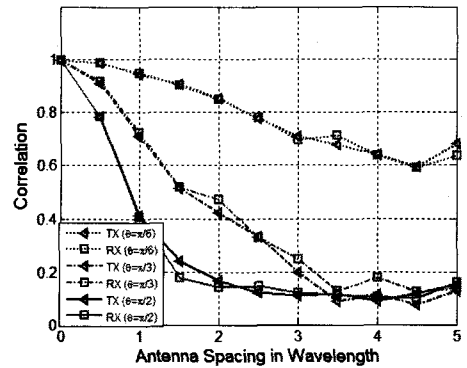


그림 7. 단말간 직접통신 채널의 공간적 상관 특성  
Fig 7. Spatial correlation properties for mobile-to-mobile communication channels

과 수신 안테나 간격은 동일하게 설정하였다. 전체적으로 안테나 사이의 간격이 커질수록 송수신 안테나의 공간적 상관값이 작아진다. 그림 6에서 기지국-단말간 통신의 경우 기지국은 고정되어 있으므로 송신단이 수신단에 비해 전체적으로 상관값이 크게 나타난다. 그림 7에서 단말간 직접통신의 경우 송수신단 모두 이동성이 있고, 채널 생성시 송수신단에서 사용되는 공간 파라미터가 유사하므로 송수신단의 공간적 상관 특성이 거의 동일하게 나타난다. 또한  $\theta$  값이  $90^\circ$ 에 가까울수록 유효 안테나 간격이 커지므로 안테나 간격이 증가할 때 공간 상관 특성이 상대적으로 빨리 줄어든다.

#### 4.2 기지국-단말간 통신과 단말간 직접통신의 링크 성능 비교

802.16m 시스템에 제안된 직접통신 채널 모델을 적용하여 링크 레벨 모의실험을 수행하였다. 실제 통신 환경에서의 기지국은 채널의 상관 특성을 낮추도록 안테나 간격을 넓게 배치하므로 기지국-단말간 통신의 경우 송수신단 안테나 간격을 각각  $10\lambda$ ,  $0.5\lambda$ 로 하였고, 단말간 직접통신에서는 송수신단 모두  $0.5\lambda$ 로 설정하였다. 2개의 송수신 안테나간에 공간 다중화 (spatial multiplexing)을 사용하여 두 개의 데이터 스트림을 동시에 전송하고, 수신단에서 채널 추정 오차가 없다고 가정하였으며, 수신단에서 공간 다중화 검파시 MMSE (minimum mean square error) 방식으로 채널을 보상하였다. 802.16m에 정의된 터보 코드를 사용하고, 부호화율은 1/2, 패킷 크기는 96비트로 하였으며, 변조 방식으로 QPSK와 16QAM을 고려하였다. 표 1과 같이 3가지 시나리오를 정의하여 송수신단의 이동방향과 안테나 방향을 변경하며 기지국-단말

표 1. 링크 성능 비교를 위한 모의실험 파라미터  
Table 1. Simulation parameters for comparison of link performance

		이동방향		안테나 방향	
		Tx	Rx	Tx	Rx
시나리오 1	F2M	0	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$
	M2M	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$
시나리오 2	F2M	0	$-\pi/3$	$-\pi/3$	$\pi/6$
	M2M	$-\pi/3$	$-\pi/3$	$-\pi/3$	$\pi/6$
시나리오 3	F2M	0	$-\pi/4$	$-\pi/3$	$\pi/6$
	M2M	$\pi/6$	$-\pi/4$	$-\pi/3$	$\pi/6$

간 통신과 단말간 직접통신의 블록에러율(BLER: block error rate)을 비교하였다. 시나리오 1에서는 송수신단의 이동방향과 안테나 방향이 모두 동일하고, 시나리오 2는 송수신단의 이동방향은 동일하고 안테나 방향이 다른 경우이며, 시나리오 3은 송수신단의 이동방향과 안테나 방향이 모두 다른 경우이다.

그림 8은 송수신단의 이동방향과 안테나 방향이 모두 동일한 경우로 기지국-단말간 통신 채널과 단말간 직접통신 채널의 특성이 유사하므로 링크 성능이 거의 동일하게 나타난다. 그림 9는 송수신단의 이동방향은 동일하고 안테나 방향이 다른 경우이다. 모의실험에서 기지국-단말간 통신의 경우 기지국 안테나 간격이  $10\lambda$ 이고 단말간 직접통신의 경우 송신 안테나 간격이  $0.5\lambda$  이므로, 단말간 직접통신의 송신단 공간 상관값이 기지국-단말간 통신에 비해 커진다. 따라서 단말간 직접통신의 MIMO 채널 용량이 기지국-단말간 통신에 비해 감소하여 링크 성능이 열화된다. 그림 10의 경우 단말간 직접통신에서 안테나 방향은 시나리오 2와 동일하고 이동방향만 달라지므로 채널의 공간적 상관 특성은 시나리오 2와 동일하고 시간적 상관 특성만 달라진다. 따라서 그림 10의 링크 성능은 그림 9와 유사하게 나타난다.

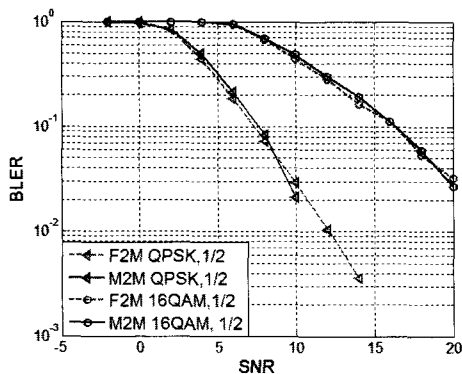


그림 8. 시나리오 1의 링크 성능 비교  
Fig 8. Comparison of link performance for scenario 1

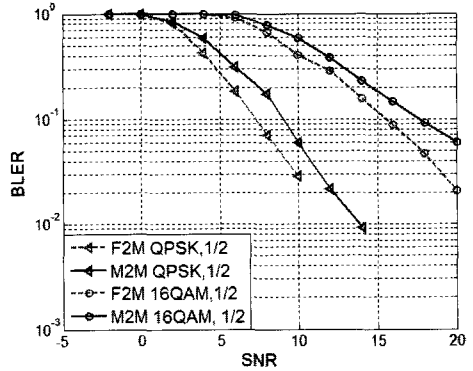


그림 9. 시나리오 2의 링크 성능 비교  
Fig 9. Comparison of link performance for scenario 2

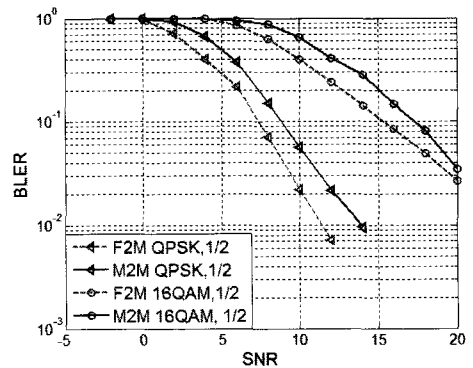


그림 10. 시나리오 3의 링크 성능 비교  
Fig 10. Comparison of link performance for scenario 3

### V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.16n 기반 단말간 직접통신을 위한 MIMO 채널 모델링 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해 제안된 채널의 통계적 특성을 도출하고, 802.16n 시스템에 제안된 직접통신 채널 모델을 적용하여 링크 레벨 모의실험을 통해 단말간 직접통신 채널과 기지국-단말간 채널의 링크 성능을 비교하였다. 본 논문에서 제안된 단말간 직접통신 채널 모델은 802.16n 시스템의 시뮬레이터에 적용 가능하며, 향후 802.16n 표준화를 위해 제안되는 기술들의 성능 평가에 활용될 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] 김응배, "한국형 디지털 TRS(TETRA)," TTA 저널, 제99호, pp.87-95, 2005년 5월.
- [2] 김기영, 정성훈, "차세대 이동통신(3GPP LTE) 재난 통신 기술 및 표준," TTA 저널, 제131호, pp.

67-73, 2010년 9월.

[3] <http://www.ieee802.org/16/gridman/index.html>

[4] R. Wang, D. Cox, "Channel modeling for ad hoc mobile wireless networks," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., vol.1, Birmingham, AL, May 2002, pp.21-25.

[5] Y. R. Zheng, C. Xiao, "Improved models for the generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms," IEEE Commun. Lett., Vol.6, No.6, pp.256 - 258, Jun. 2002.

[6] A. S. Akki, F. Haber, "A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel," IEEE Trans. Veh. Technol, Vol.35, No.1, Feb. 1986.

[7] C. S. Patel et al., "Simulation of Rayleigh-faded mobile-to-mobile communication channels," IEEE Trans. Commun., Vol.53, No.11, Nov. 2005.

[8] M. Patzold, B. O. Hogstad, N. Youssef, "Modeling, analysis, and simulation of MIMO mobile-to-mobile fading channels," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol.7, No.2, Feb. 2008.

[9] A. G. Zajic, G. L. Stuber, "Three-Dimensional Modeling, Simulation, and Capacity Analysis of Space-Time Correlated Mobile-to-Mobile Channels," IEEE Trans. Veh. Technol, July. 2008.

[10] A. G. Zajic, G. L. Stuber, T. G. Pratt, "Wideband MIMO Mobile-to-Mobile Channels: Geometry- Based Statistical Modeling With Experimental Verification," IEEE Trans. Veh. Technol., Feb. 2009.

[11] A.G. Zajic, G. L. Stuber, "Three-Dimensional Modeling, Simulation of Wideband MIMO Mobile-to-Mobile Channels," IEEE Trans. Commun., Mar. 2009.

[12] 3GPP TR-T12-25.996 V6.1.0, "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations (Release 6)," Sept. 2003.

[13] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, "IEEE 802.16m evaluation methodology document (EMD)," IEEE 802.16m -08/004r5, Jan. 2009.

[14] W.C. Jakes, Microwave Mobile Communi-

cations, John Wiley & Sons, New York, 1974.

이 새 롸 (Sae Rom Lee)

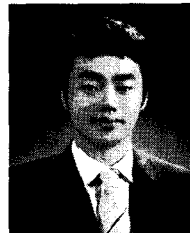
준회원



2007년~2010년 한국항공대학교 정보통신공학전공 학사  
 2010년~현재 한국항공대학교 정보통신공학전공 석사과정  
 <관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 모뎀 설계

이 규 범 (Kyu Bum Lee)

준회원



2003년~2010년 한국항공대학교 정보통신공학전공 학사  
 2010년~현재 한국항공대학교 정보통신공학전공 석사과정  
 <관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 모뎀 설계

장 성 철 (Sungcheol Chang)

정회원



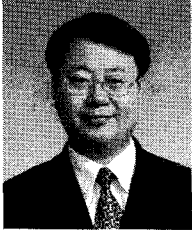
1988년~1992년 경북대학교 전자공학과 학사  
 1992년~1994년 KAIST 전기및전자공학과 석사  
 1994년~1999년 KAIST 전기및전자공학과 박사  
 1999년~현재 한국전자통신연구원

<관심분야> 이동통신



윤철식 (Chulsik Yoon)

중신회원

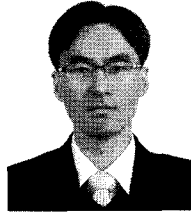


1984년~1988년 서울대학교 물리교육과 학사  
1988년~1990년 포항공대 물리학과 석사  
1998년~2000년 서강대학교 전자공학과 박사수료  
1993년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 이동통신프로토콜

최지훈 (Jihoon Choi)

정회원



1993년~1997년 KAIST 전기및 전자공학과 학사  
1997년~2003년 KAIST 전자전산학과 석사 및 박사  
2003년~2004년 University of Texas, Austin 방문연구원  
2004년~2008년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2008년~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 조교수

<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 모뎀 설계