

# RF 주파수 호핑을 고려한 UWB Multi-Band OFDM 시스템 채널 모델 성형

## Channel Modeling for UWB MB-OFDM System Considering RF Frequency Hopping

노정호\*, 허 주\*, 장경희\*

JungHo Noh\*, Joo Heo\*, and KyungHi Chang\*

### 요 약

기존의 통신 시스템은 일반적으로 Line-of-Sight (LOS)가 없을 경우 레일레이 분포를 따르는 진폭 특성을 갖는다. 그러나 Wireless Personal Area Network (WPAN)을 위하여 IEEE 802.15.3a 의 표준안으로 제안된 Ultra Wideband (UWB) Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MB-OFDM) 시스템의 경우에는, 측정결과 클러스터와 클러스터 내의 레이의 진폭 특성이 독립적으로 로그노말 분포로 해석될 수 있음이 밝혀졌다. 이를 기반으로 기존의 Saleh-Valenzuela 채널 모델의 수정을 통하여 MB-OFDM 시스템의 채널을 모델링 할 수 있다. 본 논문에서는 RF 주파수 호핑을 위하여 MB-OFDM 시스템의 채널 모델을 성형, 각 채널 모드에 따른 성능 및 전송률에 따른 성능을 확인한다.

### Abstract

In the case of Non-Line-of-Sight (NLOS), common telecommunication systems typically have Rayleigh distributed amplitude characteristics. However measurement result of Ultra Wideband (UWB) Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MB-OFDM) system which is proposed as one of candidate standard in IEEE 802. 15. 3a for Wireless Personal Area Network (WPAN) shows that it has independent log normal fading in each cluster as well as in each ray within the cluster. Based on this clustering phenomenon observed, MB-OFDM channel model derived from Saleh-Valenzuela model with a couple of slight modifications. In this paper, channel remodeling for RF frequency hopping in MB-OFDM system is achieved, and performances of MB-OFDM system for each channel mode and data rate are verified using modified channel model.

Key words : UWB, MB-OFDM, Channel Modeling.

### 1. 서 론

Ultra WideBand (UWB)는 지난 40여년간 미국방 성에서 군사용 무선 통신 기술로 사용되던 기술

로서 Wireless Personal Area Network (WPAN) 환경에서 수백 Mbps의 전송 속도를 제공하면서도 기존 Wireless Local Area Network (WLAN) 장치에서 소요되는 전력량의 10분의 1 수준의 전력을

\* 인하대학교 정보통신대학원(The Graduate School of Information Technology & Telecommunications INHA University)

· 논문번호 : 2004-1-9

· 접수일자 : 2004-05-28

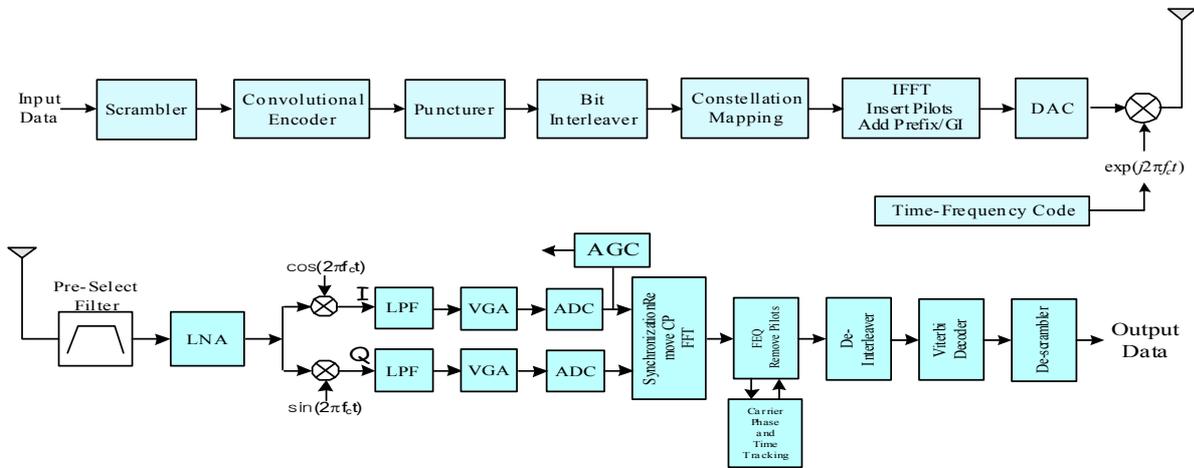


그림 1. MB-OFDM 모뎀의 블록도  
Figure 1. Block Diagram of MB-OFDM Modem

사용하여 통신이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 그럼에도 불구하고 매우 넓은 주파수 대역의 사용으로 인해 야기 될 수 있는 기존 통신과의 간섭 문제로 상업적 이용이 금지되어 왔다. 그러나 2002년 2월 미국 연방통신 위원회(FCC)는 3.1 GHz~10.6 GHz에 걸친 주파수 대역 제한과 1MHz당 -41.25dBm 이하의 방사제한을 조건으로 상업화를 허가하게 되었다 [1]. FCC에서는 UWB를 중심 주파수의 25% 이상의 점유 대역폭을 차지하거나 500 MHz 이상의 점유 대역폭을 갖는 무선기술로 정의하고 있다. 일반적으로 1 GHz 이상의 단일 대역폭을 갖는 기존의 UWB 방식과는 달리 현재 진행되고 있는 IEEE 802.15.3a Task Group의 표준화에서는 기존의 방식을 대폭 수정하여 Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MB-OFDM) 방식을 중심으로 논의가 이루어지고 있다.

MB-OFDM 방식은 FCC에서 제한한 대역을 528 MHz의 대역폭을 갖는 13개의 작은 대역으로 나누는 방식으로 제안되었고, 기본적으로 OFDM 기반이기 때문에 반송파의 수만큼 각 채널에서의 전송주기가 증가하게 되고, 이 경우 광대역 전송시에 나타나는 주파수 선택적 채널이 심볼간 간섭(ISI)이 없는 주파수 비선택적 채널로 나타나 간단한 1-Tap 등화기만으로도 채널의 보상이 가능하다 [2].

기존에 사용되지 않던 이러한 광대역 시스템에서는 일반적인 통신 시스템의 채널의 진폭이 Line-of-Sight (LOS)가 없는 상황에서 레일리 분포를 따르는 반면, UWB 시스템의 채널 모델은 로그노말 분포를 따르게 된다. 이를 위해서 IEEE 802.15.3Ga에서는 기존의 Saleh-Valenzuela 모델 [3]을 수정한 채널 모델을 제안하였다 [4].

본 논문에서는 UWB 시스템의 채널 모델을 분석하고, 이를 MB-OFDM 시스템의 RF 주파수 호핑에 적용할 수 있도록 채널을 성형하고, 각 채널 모드에 따른 BER 성능을 분석하였다. 본 논문의 2장에서는 MB-OFDM 시스템 모델을 설명하며, 3장은 MB-OFDM 채널 모델을 분석하고, 4장에서는 시뮬레이션 결과를 제시한다.

## II. UWB MB-OFDM 시스템

### 2-1 UWB MB-OFDM 시스템의 물리계층 사양

그림 1은 MB-OFDM 시스템의 기저 대역 모뎀의 구조를 보여준다. 기본적인 MB-OFDM 시스템은 스크램블러와 디스크램블러, 컨볼루션 인코더와 Viterbi 디코더, 그리고 인터리버와 디인터리버, 그리고 OFDM 변조기와 복조기로 구성된다. 528MHz의 대역폭을 128개의 부반송파에 의해 나누어서 사용하므로 부반송파간 주파수 간격은 528MHz /

128 = 4.125MHz 이다. 그리고 유효 심벌의 길이는 부반송파간 주파수 간격의 역수이므로 242.42ns 가 되며, Zero Padded Prefix 60.61ns 와 Guard Interval 9.47ns 을 합쳐 한 OFDM 심벌의 총 길이는 312.5ns 이다. 전체 128개의 부반송파중 100개의 부반송파는 정보를 전송하는 데이터 부반송파로, 12개의 부반송파는 동기를 위하여 전체 주파수에 걸쳐서 균등하게 분포된 파일럿 부반송파로 사용되며 나머지 10개의 부반송파는 송, 수신단 필터의 구현을 쉽게 하며, 그 외의 다양한 목적으로 이용 가능한 보호 및 가상 반송파로 사용된다.

이상의 MB-OFDM 시스템을 대략 적으로 정의하면 표 1 과 같다.

표 1. MB-OFDM 시스템 파라미터.

Table 1. MB-OFDM system parameters.

Parameters	Value
Data subcarriers, $N_{SD}$	100
Pilot carriers, $N_{SDP}$	12
Guard carriers, $N_{SG}$	10
Total used subcarriers, $N_{ST}$	122
Subcarrier frequency spacing, $\Delta F$	4.125MHz(528MHz/128)
FFT period, $T_{FFT}$	242.42 ns
Cyclic prefix duration, $T_{CP}$	60.61 ns
Guard interval duration, $T_{GI}$	9.47 ns
Symbol interval, $T_{SYM}$	312.5 ns

## 2-2 UWB MB-OFDM 시스템의 신호 모델링

전송되는 신호는 복소 기저대역 신호 표현법을 이용하여 표현 될 수 있다. 실제 전송되는 RF 신호는 다음과 같다.

$$r_{RF}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} r_k(t - kT_{SYM}) \exp(j2\pi f_k t) \right\} \quad (1)$$

식 (1)에서, N은 OFDM 심벌의 개수,  $T_{SYM}$  은 심벌 주기,  $f_k$  는 k번째 밴드의 중심주파수이다.  $r_k(t)$  는 k번째 OFDM 심벌의 복소 기저대역 신호이고, 식 (2)와 같이 구성된다.

$$r_k(t) = \begin{cases} r_{preamble,k}(t) & 0 \leq k < N_{preamble} \\ r_{header,k-N_{preamble}}(t) & N_{preamble} \leq k < N_{header} \\ r_{data,k-N_{preamble}}(t) & N_{header} \leq k < N_{data} \end{cases} \quad (2)$$

OFDM 심벌  $r_k(t)$  는 계수  $C_n$  으로 각 데이터, 파일럿, 트레이닝 심벌로 표현될 수 있다.

$$r_k(t) = \begin{cases} 0 & t \in [0, T_{CP}] \\ \sum_{n=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} C_n \exp(j2\pi n \Delta_f)(t - T_{CP}) & t \in [T_{CP}, T_{FFT} + T_{CP}] \\ 0 & t \in [T_{FFT} + T_{CP}, T_{FFT} + T_{CP} + T_{GI}] \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 파라미터  $\Delta_f$  와  $N_{ST}$  는 각각 부반송파 주파수 간격과 이용된 총 부반송파의 수를 나타낸다. FFT 간격  $T_{FFT} = 1/\Delta_f$  이고,  $T_{CP}$  는 다중경로의 효과를 보완하기 위하여 OFDM에서 이용되는 cyclic prefix이고,  $T_{GI}$  는 보호구간이다.

## 2-3 OFDM 변조

전송률이 50, 80 Mbps일 때, 복소수 스트림은 50개의 그룹으로 나뉘며 각각의 복소수는 OFDM 심벌 k의 부반송파 n에 해당하는  $c_{n,k}$  로 표현되고,

$$\begin{cases} c_{n,k} = d_{n+50 \times k} & k = 0, 1, \dots, N_{SYM} - 1 \\ c_{(n+50),k} = d_{(49-n)+50 \times k} & n = 0, 1, \dots, 49 \end{cases} \quad (4)$$

전송률이 110, 160, 200, 320, 480 Mbps일 때, 복소수 스트림은 100개의 그룹으로 나뉘며, 각각의 복소수는 OFDM 심벌 k의 부반송파 n에 해당하는  $c_{n,k}$  로 표현되며 식 (5)와 같다.

$$c_{n,k} = d_{n+100 \times k} \quad n = 0, 1, \dots, 49, \quad k = 0, 1, \dots, N_{SYM} - 1 \quad (5)$$

OFDM 심벌  $r_{data,k}(t)$  는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{data,k}(t) = \sum_{n=0}^{N_{ST}} c_{n,k} \exp(j2\pi M(n)\Delta_f(t - T_{CP})) + p_{\text{mod}(k,127)} \sum_{n=-N_{ST}/2}^{N_{ST}/2} P_n \exp(j2\pi n \Delta_f(t - T_{CP})) \quad (6)$$

식 (6)에서  $N_{SD}$  는 데이터 부반송파 수이고,

$N_{ST}$ 는 전체 부반송파 수이다. Function  $M(n)$ 은 이미 할당되어 있는 파일럿 부반송파와 DC 부반송파에 대한 위치는 배제하고 0부터 99까지의 인덱스로 논리적인 주파수 옵션 인덱스인 -56부터 56까지의 맵핑을 다음과 같이 정의한다 [6].

$$M(n) = \begin{cases} n - 56 & n = 0 \\ n - 55 & 1 \leq n \leq 9 \\ n - 54 & 10 \leq n \leq 18 \\ n - 53 & 19 \leq n \leq 27 \\ n - 52 & 28 \leq n \leq 36 \\ n - 51 & 37 \leq n \leq 45 \\ n - 50 & 46 \leq n \leq 49 \\ n - 49 & 50 \leq n \leq 53 \\ n - 48 & 54 \leq n \leq 62 \\ n - 47 & 63 \leq n \leq 71 \\ n - 46 & 72 \leq n \leq 80 \\ n - 45 & 81 \leq n \leq 89 \\ n - 44 & 90 \leq n \leq 98 \\ n - 43 & n = 99 \end{cases} \quad (7)$$

#### 2-4 시간영역 확산

MB-OFDM 시스템에서 시간영역 확산을 통하여 OFDM 2 심볼에 걸쳐 같은 정보를 전송하게 된다 [6]. 이러한 OFDM 2심볼은 주파수 다이버시티를 얻기 위하여 주파수 호핑 패턴에 따라 서로 다른 대역으로 전송된다. MB-OFDM방식에서 전송률이 55, 80, 110, 160, 200 Mbps인 경우 시간영역 확산이 수행된다.

#### 2-5 파일럿 부반송파

OFDM 심볼의 부반송파중 12개의 부반송파는 주파수 옵션이나 동기 검출을 위한 파일럿으로 식 (8)과 같이 -55, -45, -35, -25, -15, -5, 15, 25, 35, 45, 55의 위치에 할당된다.

$$P_n = \begin{cases} \frac{1+j}{\sqrt{2}} & n = 15, 45 \\ \frac{-1-j}{\sqrt{2}} & n = 5, 25, 35, 55 \\ 0 & \text{o.w.} \end{cases} \quad (8)$$

전송률이 106.67 Mbps 미만인 경우 주파수 영역확산을 사용하므로 파일럿 할당은 식 (9)와 같고, 106.67 Mbps 이상인 경우는 식 (10)과 같다.

$$P_{n,k} = P_{-n,k}^* \quad n = -5, -15, -25, -35, -45, -55 \quad (9)$$

$$P_{n,k} = P_{-n,k} \quad n = -5, -15, -25, -35, -45, -55 \quad (10)$$

### III. UWB MB-OFDM 채널 모델링

#### 3-1 IEEE 802.15.3 SG3a 채널 모델링

UWB 채널 모델은 UWB 환경에 적합한 채널 모델을 개발하기 위하여 구성된 IEEE 802.15.3 SG3a의 분과 위원회가 2003년 2월 802.15.3 SG3a의 물리계층 성능 분석을 위하여 최종 제안된 모델이다. 측정을 통하여 관찰된 클러스터링 현상을 기초로 UWB 채널은 기존의 Saleh-Valenzuela 모델의 약간의 수정을 통하여 모델링 할 수 있다. 채널 측정 결과에 따르면 UWB 채널의 경우 일반적인 채널 모델에 적용되는 레일리 분포 보다는 로그노말 분포를 따르고, 클러스터뿐만 아니라 클러스터 내의 각 레이드 독립적인 페이딩을 겪음을 알 수 있다. 그러므로 다중경로 채널 모델은 다음의 이산 시간 임펄스 응답으로 이루어진다.

$$h_i(t) = X_i \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \alpha_{k,l}^i \delta(t - T_l^i - \tau_{k,l}^i) \quad (11)$$

식 (11)에서  $T_l^i$ 는  $l$ 번째 클러스터의 지연,  $\tau_{k,l}^i$ 는  $T_l^i$ 와 관련된 다중경로 성분의 지연,  $X_i$ 는 로그노말 섀도잉,  $i$ 는  $i$ 번째 출현을 의미하며, 100개의 구현 채널을 갖는다. BER 성능 평가 시에는 이중 우수한 성능을 보인 90개만이 사용된다.  $\alpha_{k,l}^i$ 는 멀티패스 계인으로 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_{k,l}^i = p_{k,l} \xi_l \beta_{k,l} \quad (12)$$

식 (12)에서  $\xi_l$ 은  $l$ 번째 클러스터와 관련된 페이

당,  $\beta_{k,l}$ 은  $l$ 번째 클러스터의  $k$ 번째 레이와 관련된 페이딩,  $p_{k,l}$ 은 반사로 인한 신호의 반전을 계산하기 위한  $\pm 1$ 값이다.

클러스터 도달시간과 레이 도달시간을 지수 확률 밀도함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p(T_l | T_{l-1}) &= \Lambda \exp[-\Lambda(T_l - T_{l-1})], \quad l > 0 \\ p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) &= \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})], \quad k > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서  $\Lambda$ 는 클러스터 도달률,  $\lambda$ 는 레이 도달률을 나타낸다.

$$\begin{aligned} 20 \log_{10}(\xi_i \beta_{k,l}) &\propto \text{Normal}(\mu_{k,l}, \sigma_1^2 + \sigma_2^2), \\ \text{or } |\xi_i \beta_{k,l}| &= 10^{(\mu_{k,l} + n_1 + n_2)/20} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서  $n_1$ 과  $n_2$ 는 서로 독립적이고, 각각의 클러스터와 레이의 페이딩에 해당하며,  $\mu_{k,l}$ 은 다음과 같다.

$$\mu_{k,l} = \frac{10 \ln(\Omega_0) - 10 T_l / \Gamma - 10 \tau_{k,l} / \gamma - (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \ln(10)}{\ln(10)} \quad (15)$$

식 (15)에서  $\Gamma$ 는 클러스터 감쇄 요소,  $\gamma$ 는 레이 감쇄 요소,  $\sigma_1$ 은 클러스터 로그노말 페이딩의 표준편차, 그리고,  $\sigma_2$ 는 레이 로그노말 페이딩의 표준편차를 나타낸다. 채널의 총 에너지는 다음과 같다.

$$E \left[ |\xi_i \beta_{k,l}|^2 \right] = \Omega_0 e^{-T_l / \Gamma} e^{-\tau_{k,l} / \gamma} \quad (16)$$

식 (16)에서  $T_l$ 은 빈  $l$ 의 초과 지연이고,  $\Omega_0$ 는 첫 번째 클러스터의 첫 번째 경로의 평균 에너지로써, 전체 수신 에너지 정규화를 위한 값이고,

총 다중경로 에너지의 로그노말 쉐도잉은  $X_i$ 이고,  $\alpha_{k,l}^i$ 에 포함된 총 에너지는 각각의 구현 채널에 대하여 정규화된다. 이러한 쉐도잉은 식 (17)과 같은 특성을 갖는다.

$$20 \log_{10}(X_i) \propto \text{Normal}(0, \sigma_x^2) \quad (17)$$

실제로 유효한 에너지는 직진 경로 성분의 에너지로부터 최대 10dB까지 떨어지는 것까지 감안한다.

UWB채널 모델은 Channel Model 1 (CM1) ~ CM4까지를 갖으며 각각의 파라미터는 표 2와 같다. CM1~CM3는 측정된 결과를 토대로 모델링 되었고, CM4는 최악의 경우로 Non-Line-of-Sight (NLOS) 다중경로 채널을 나타내기 위하여 RMS 지연이 25 nsec 이르는 경우로 모델링 되었다[4].

표 2. UWB 채널 모델 특성 및 파라미터.

Table 2. UWB channel model characteristics and parameters.

channel characteristic	CM1 LOS (0-4 m)	CM2 NLOS (0-4 m)	CM3 NLOS (4-10 m)	CM4 NLOS
Mean excess Delay (nsec) ( $\tau_m$ )	5.05	10.38	14.18	
RMS delay (nsec) ( $\tau_{rms}$ )	5.28	8.03	14.28	25
NP			35	
NP (85%)	24	36.1	61.54	
<b>Model parameter</b>				
$\Lambda$ (1/nsec)	0.0233	0.4	0.0667	0.0667
$\lambda$ (1/nsec)	2.5	0.5	2.1	2.1
$\gamma$	4.3	6.7	7.9	12
$\Gamma$	7.1	5.5	14.00	24.00
$\sigma_1$ (dB)	3.3941	3.3941	3.3941	3.3941
$\sigma_2$ (dB)	3.3941	3.3941	3.3941	3.3941
$\sigma_x$ (dB)	3	3	3	3

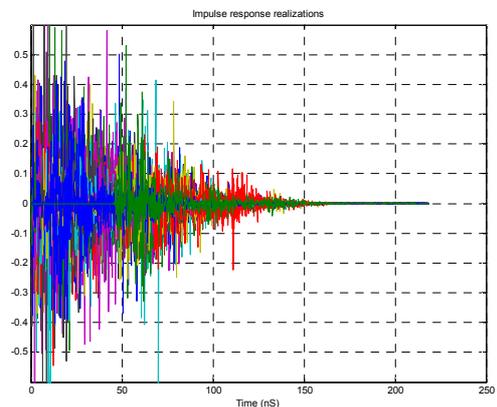


그림 2. 임펄스 응답 모델 (CM3).

Fig. 2. Impulse response realization (CM3).

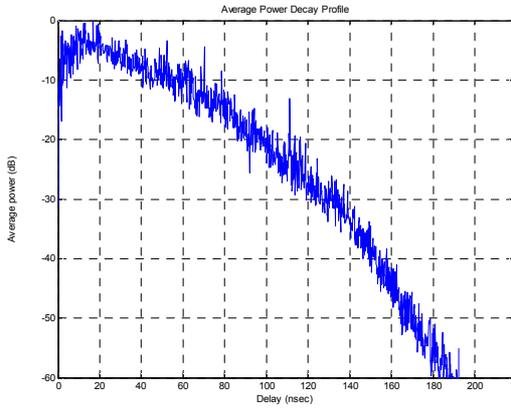


그림 3. 평균 전력 감쇄 모델 (CM3).  
Fig. 3. Average power decay profile (CM3).

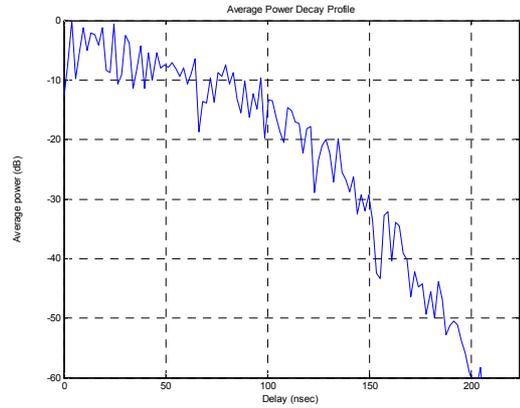


그림 5. 성형된 채널 모델의 평균 전력 감쇄 모델 (CM3).

Fig. 5. Average power decay profile of considering RF frequency hopping channel model (CM3).

3-2 Multi Band 적용을 위한 채널 모델 성형

3-1절에서 논의한 채널은 샘플링 타임이 0.167 ns인 하나의 채널만을 제공한다. MB-OFDM 시스템은 주파수 다이버시티를 얻을 수 있도록 시간영역 확산을 하게 되는데 이 과정에서 하나의 OFDM 심볼을 서로 다른 시간에 다른 주파수 대역을 통하여 전송하게 된다. MB-OFDM 밴드 그룹 A의 경우 중심 주파수가 각각 3432, 3960, 4488 MHz인 3 서브밴드로 호핑 패턴에 따라 RF주파수를 호핑하게 된다. 따라서 MB-OFDM 시스템의 경우 각각의 중심주파수마다 서로 다른 채널이 필요하다.

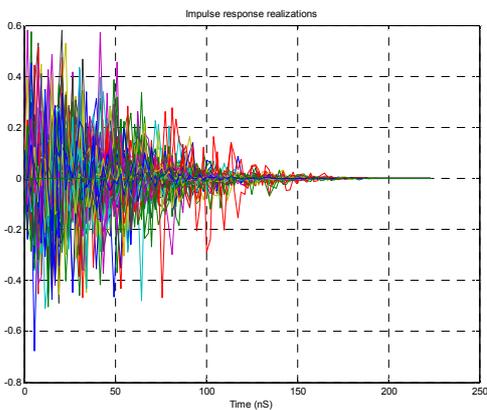


그림 4. 성형된 채널 모델의 임펄스 응답 모델 (CM3).  
Fig. 4. Impulse response realization of considering RF frequency hopping channel model (CM3).

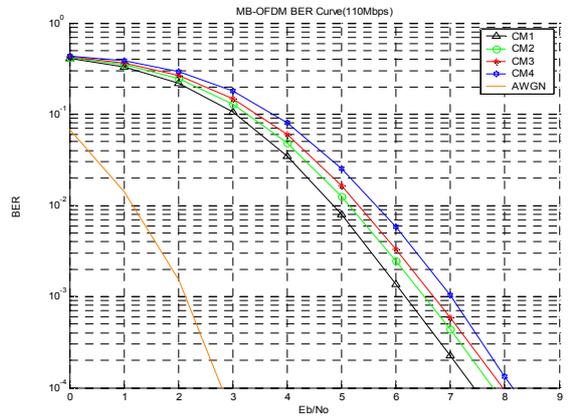


그림 6. CM 1-4에서의 BER Curve (110Mbps).  
Fig 6. BER curve in CM 1-4 (110Mbps).

이를 위하여 IEEE 802.15. SG3a에서 제안한 채널을 MB-OFDM의 샘플링 타임인 1.894 ns으로 다운 샘플링 하고, 중심주파수에 맞게 데이터를 천이 해줌으로서 원하는 채널을 얻을 수 있다 [7]. 그림 2, 3은 각각 IEEE 802.15. SG3a에서 제안한 채널의 임펄스 응답 모델과 전력 감쇄 모델이고, 그림 4, 5는 각각 성형된 채널의 임펄스 응답 모델과 전력 감쇄 모델이다. 그림 2, 3과 그림 4, 5의 비교를 통하여 원래의 채널을 성형 하더라도 채널의 특성은 변하지 않음을 알 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 3과 같다. 각 채널모드의 성능 검증에 앞서 시뮬레이션의 이론적인 검증을 위하여 AWGN 환경에서의 Eb/No vs. BER과 IEEE 802.15.TG 3a에서 제시한 AWGN BER 성능을 비교하였다. 그림 6에서 AWGN 환경에서 IEEE 802.15.TG 3a에서 제시한 BER 성능과 시뮬레이션 결과가 일치함을 알 수 있고, CM1 ~ CM4의 시뮬레이션 결과를 통하여 최악의 상황으로 모델링 된 CM4의 경우에도 CM1에 비하여 약 1 dB 정도의 성능열화만이 나타남을 알 수 있다. 그림 7에서는 성형된 채널 중 CM3를 이용하여 MB-OFDM 시스템의 규정된 전송률에 따른 Eb/No vs. BER 성능을 검증해 보았다. 전송률이 55 Mbps와 110 Mbps 일 때의 BER 성능 비교를 통하여 주파수영역 확산기법을 사용하면 target BER  $10^{-3}$ 에서 약 4dB 정도의 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

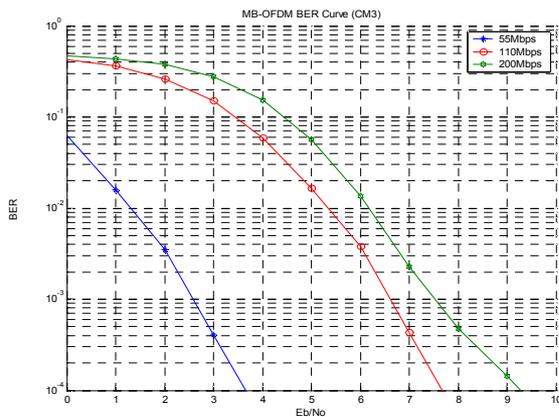


그림 7. MB-OFDM 시스템의 규정된 전송률에 따른 Eb/No 대 BER 성능 Curve (CM3).

Fig 7. Eb/No vs. BER performance curve for mandatory data rates in MB-OFDM system (CM3).

표 3. 시뮬레이션 파라미터.

Table 3. Simulation parameters.

Info. Data Rate	55 Mbps	110 Mbps	200 Mbps
FFT size	128	128	128
Modulation	QPSK	QPSK	QPSK
Frequency-domain spreading	Yes	No	No
Coding rate	11/32	11/32	5/8

#### V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.SG3a가 제안한 UWB 채널 모델을 분석 하고, MB-OFDM 시스템의 RF 주파수 호핑에 적용할 수 있도록 모델을 성형하였다. 그리고 그에 따른 각 채널의 특성을 확인하고, 각 채널 모드에 따른 성능을 분석하였다. 성형된 채널 중 CM3를 이용하여 각각의 전송률에 따른 MB-OFDM 시스템의 성능을 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Revision of part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra Wideband Transmission Systems.
- [2] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House, 2000.
- [3] A.A. Saleh and R. A. Valenzuela "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE Commun.*, vol. SAC-5, no. 2, pp. 128-137, Feb. 1987.
- [4] IEEE P802.15-02/368r5-SG3a, "Channel Modeling Sub-committee Report Final."
- [5] IEEE P802.15-03/268r3, "Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a."
- [6] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing, 2th Edition*. Prentice Hall, 1999.

## 노 정 호(盧正鎬)



2004년 2월: 인하대학교 전자공학과  
(공학사)

2004년 2월 ~ 현재: 인하대학교  
정보통신대학원 석사과정  
관심분야: 4세대 이동통신, WiBro 및  
UWB 등 OFDM 시스템  
성능분석

## 허 주(許 周)



2002년 2월: 인하대학교 전자공학과  
(공학사)

2004년 2월: 인하대학교 전자공학과  
(공학석사)

2004년 2월 ~ 현재: 인하대학교  
정보통신대학원 박사과정  
관심분야: 4세대 이동통신 시스템,  
MIMO 및 Smart Antenna

## 장 경 희(張慶熙)



1985년 2월: 연세대학교 전자공학과  
(공학사)

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과  
(공학석사)

1992년 2월: Texas A&M Univ.  
EE Dept.(Ph.D.)

1989년 ~ 1990년 : 삼성종합기술원  
주임연구원

1992년 ~ 2003년 : 한국전자통신연구원 책임연구원 (팀장)

2003년 ~ 현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수

관심분야: 4세대 이동통신 시스템, WiBro, UWB 및  
DMB 시스템 무선 전송규격