

# 다중경로 페이딩 채널에서 DAC 양자화 오차에 대한 IEEE P802.15.3a 멀티밴드 UWB 송수신기 성능 분석

정성원, 이승윤, 임승호, 박규호  
한국과학기술원 전자전산학과

## Performance Analysis of IEEE P802.15.3a Multi-band UWB Transceiver for DAC Quantization Error in Fading Channel

Sung-Won Chung, Seung-Yoon Lee, Seung-Ho Lim, and Kyu-Ho Park  
Korea Advanced Institute of Science and Technology  
E-mail : swchung@core.kaist.ac.kr

### Abstract

In this paper, we present performance analysis of an IEEE P802.15.3a high rate wireless personal area network transceiver. This physical layer standard uses QPSK as its sub-channel modulation scheme and orthogonal frequency domain modulation (OFDM) for sub-bands. OFDM is used for each sub-band so that multi-path effects are absorbed by equalizer and guard, and fading can be approximately modeled as additive white Gaussian noise. In multi-band ultra-wideband system, DAC quantization error is important noise source since high resolution conversion cannot be used due to high power consumption. Simulation result shows that, to get 640-Mbps throughput, at least 5-bits precision is necessary to maintain bit-error rate under  $10^{-2}$ , which can be lowered, with channel coding, to  $10^{-6}$  that is the bit-error rate required by IEEE 802.15 upper protocol layer, in 4-meter LOS fading channel.

### I. 서론

초광대역(Ultra-Wideband, UWB) 통신기술은 DVD 플레이어나 HDTV 스트리밍 데이터를 무선으로 전송하며, USB 또는 IEEE 1394 FireWire 와 같은 유선 플러그 앤 플레이 커넥션을 무선으로 대체하기에 충분한 480-Mbps 에서 1-Gbps 이상의 데이터 전송율을 제공한다 [1]. UWB 기술은 일반적으로 주기가 1 나노 초 이내인 저

전력 펄스를 이용한다. 최근 IEEE 802.15.3a 워킹그룹[2]에서 진행중인 UWB 물리계층 표준화 작업은 현재 주파수 호핑과 OFDM 에 기반한 멀티밴드를 이용하는 방식[3]으로 진행되고 있다.

일반적인 멀티밴드 UWB 송수신기의 구조는 협대역 송수신기와 유사하지만 수신기에 전력증폭기 없이 저전력 신호를 송신한다. 또한, UWB 신호는 대역폭이 500-MHz 이상이어야 한다는 FCC 규격에 의해, RF 프론트엔드와 디지털 베이스밴드 신호처리 모듈을 연결하는 ADC 와 DAC 는 높은 사양을 필요로 한다. 즉, 500-MHz 이상의 속도로 동작해야 하며, UWB 통신 시스템의 장점인 저전력 특성을 잃지 않기 위해 해상도가 가능하면 낮아야 한다.

본 논문에서는 페이딩 채널에서 멀티밴드 UWB 통신 시스템의 비트 에러율을 DAC 양자화 오차를 고려하여 해석하고, 이를 베이스밴드 신호처리를 포함한 시스템 성능과 비교하기 위해 다중경로 페이딩 채널 환경의 멀티밴드 UWB 송수신기에 대한 MATLAB 모델 시뮬레이션 결과를 제시한다.

### II. 멀티밴드 UWB 신호

멀티밴드 UWB 시스템은 7.5-GHz 대역폭의 스펙트럼을 500-MHz 이상의 대역폭을 가지는 여러 개의 부밴드로 분할하고, 주파수 다이버시티를 얻기 위해 데이

터 비트를 각 부 밴드에 인터리빙하여 전송한다. 본 절에서는 전송될 데이터 비트가 다중경로 페이딩 채널 환경에서 멀티밴드 UWB 송신기에 의해 어떤 신호로 표현되는지 설명한다.

### 3.1 송신 신호

하나의 OFDM 심볼이  $N_s$  개의 부 채널로 구성될 때,  $k$ -번째 OFDM 심볼의  $n$ -번째 부 채널을 구성하는 송신 데이터 또는 파일럿 신호를  $c_n^k$ 라 하자. 이 때, 프리픽스 구간, 가드 구간, 전체 OFDM 심볼의 전송시간을 각각  $T_{cp}$ ,  $T_g$ ,  $T$ 라고 하고, 부 채널 간격을  $\Delta_f$ 라 하면, 부 밴드 중심 주파수가  $f_k$ 로 주어질 때, 기저대역  $k$ -번째 OFDM 심볼  $s_k(t)$ 를 포함하는 통과대역 송신 신호  $s(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t - kT) e^{j2\pi f_k t} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}} c_n^k(t - kT - T_{cp}) e^{j2\pi(n\Delta_f + f_k t)} \end{aligned}$$

이는 통과대역의 중심주파수가 호평한다는 것을 제외하고 멀티밴드 UWB 송신신호는 OFDM 송신신호와 동일하다는 것을 보여준다.

### 3.2 다중경로 페이딩 채널에 의한 신호 왜곡

UWB 신호에 대해서는 무선랜 실내 채널모델로 사용되는 Rayleigh 페이딩 모델보다 log-normal 분포를 가지는 Saleh-Valenzuela 모델 [4]이 측정 데이터와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 즉, 채널 임펄스 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3].

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

임펄스 응답은  $L$ -개의 클러스터로 구성되며, 각각의 클러스터는  $K$ -개의 다중경로 응답으로 이루어져 있다. 나머지 파라미터는 [5]에 의해 결정된다.

### 3.3 수신 신호

AWGN 채널 노이즈  $n(t)$ 와 경로 손실  $L_p$ 에 대한 통과대역 수신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r(t) = L_p \int_0^t s(t')h(t-t')dt' + n(t)$$

이상적인 심볼 동기과 AGC가 사용되었다고 가정하면,  $k$ -번째 OFDM 심볼에 대한 기저대역 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r_k(t) = r(t + kT)e^{-j2\pi f_k t} + n'(t)$$

그리고, 최종적으로 수신기의 복조기에 입력되는 신호는 다음과 같이 얻어진다.

$$d_n^k = H_n^k \cdot c_n^k + n_n^k + q_n^k$$

여기서  $H$ ,  $n$ ,  $q$ 는 각각  $k$ -번째 OFDM 심볼의  $n$ -번째 부 채널에 대한 무선채널의 주파수 응답, 채널 노이즈, 양자화 오차를 각각 나타낸다.

## III. 성능 분석

본 절에서는 시스템 성능에 영향을 주는 노이즈 소스에 대해서 살펴보고, 앞 절에서 설명한 멀티밴드 UWB 신호를 수신기에서 복조할 때의 비트 에러율을 해석한다. UWB 시스템은 대역폭은 넓게 사용하지만 SNR이 낮으므로 QPSK를 변복조에 사용하는 것으로 가정하였다.

### 3.1 노이즈 소스

멀티밴드 UWB 링크에서의 주된 노이즈 소스에는 OFDM 심볼 동기 오차, 샘플링 오차, 협대역 신호 간섭, DAC/ADC 양자화 오차, 능동소자 비선형성, 채널 페이딩 및 노이즈이다. 동기 오차는 OFDM 심볼에서 충분한 크기의 프리앰블을 이용하여 줄일 수 있다. 멀티밴드 UWB 링크는 국지적인 협대역 신호 간섭이 큰 부 밴드를 동적으로 제외시킬 수 있으므로, 싱글밴드 UWB 링크에서 문제되던 협대역 신호 간섭이 작다. 채널 페이딩과 주파수 의존적인 능동소자 비선형성은 수신기 측에서 모두 채널 주파수 특성으로 보이므로, 채널 등화기를 이용하여 보상할 수 있다.

하지만, DAC/ADC가 500-MHz 이상 고속으로 동작하면서 높은 해상도를 이용할 수 없으므로, 양자화 오차는 수신기의 비트 에러율에 영향을 주는 파라미터가 된다. 따라서, AWGN에 의한 SNR과 양자화 오차를 노이즈 소스로 보고 수신기 비트 에러율을 해석한다.

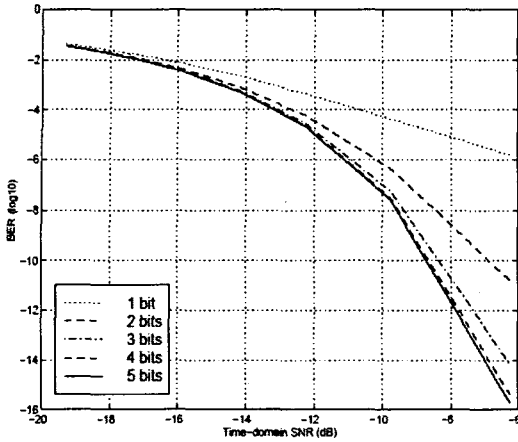


그림 1 DAC 해상도와 SNR 변화에 따른 BER

### 3.2 비트 에러율

수신기의 FFT 에 입력되기 전인 시간 영역에서 샘플링된 멀티밴드 UWB 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r[n] = s[n] + w[n] + q[n]$$

시간영역에서 신호크기가 A 이고, OFDM 부 채널 수가  $N_s$  로 주어지면, 부 채널 신호  $s[n]$  에 대한 FFT 의 최대 크기는 다음과 같이 얻어진다.

$$|\text{FFT}(s[n])|^2 = \left(\frac{A \cdot N_s}{2}\right)^2 = \frac{A^2 \cdot N_s^2}{4}$$

DAC 의 입력 범위가  $(-m_{\max}, m_{\max})$  이고, 해상도가 R 비트이면, LSB 크기  $\Delta$  에 대한 양자화 오차는

$$\sigma_Q^2 = \frac{\Delta^2}{12}$$

이므로, FFT 를 거쳐서 복조기로 입력되는 신호의 SNR 은 다음과 같이 얻어진다.

$$\text{SNR} = \frac{A^2 N_s}{4} \left(\frac{\Delta^2}{12} + \sigma_n^2\right)^{-1}$$

따라서, QPSK 복조기에서 비트 에러율은 다음과 같이 구해진다.

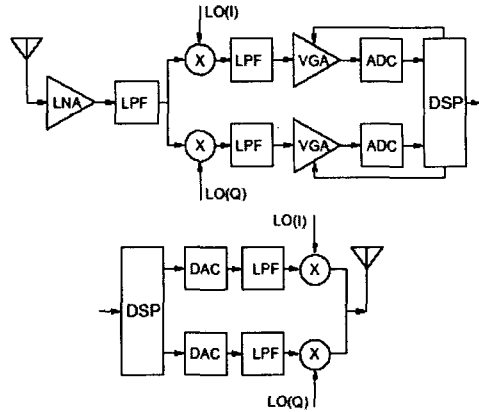


그림 2 멀티밴드 UWB 송수신기 블록다이어그램

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\text{SNR} \cdot \frac{W}{R_b}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{A^2 N_s W}{2 R_b} \left[ \frac{m_{\max}^2}{3 \cdot 2^{2R}} + \sigma_n^2 \right]^{-1}} \right) \end{aligned}$$

그림 1 은 시간영역에서의 AWGN 노이즈에 대한 SNR 과 DAC 해상도에 따른 양자화 오차에 따라 주어지는 이론적인 비트 에러율을 보여주며, 여기에서 적어도 4-비트의 DAC 해상도가 필요함을 알 수 있다.

## IV. 시뮬레이션

베이스밴드 신호처리를 포함한 페이딩 채널환경에서의 AWGN 노이즈와 양자화 오차의 영향을 앞 절에서 제시한 해석적인 비트에러율과 비교하기 위하여, 그림 2 에 보여진 멀티밴드 UWB 송수신기의 블록다이어그램을 MATLAB 으로 모델링하여 시뮬레이션하였다.

현재 표준화가 진행중인 IEEE 802.15.3a [3] 에 따라, OFDM 부 채널 수는 128, OFDM 심볼 주기는 242.42-ns, 프리픽스 길이는 60.61-ns, 가드 구간은 9.47-ns, 채널 간격은 4.125-MHz 로 정하였다. 부 밴드는 3168-MHz 에서 4752-MHz 사이에서 528-MHz 씩 3 개의 밴드로 구성되며, 이 구간에 이득이 일정한 UWB 용 광대역 안테나를 사용한다고 가정하였다.

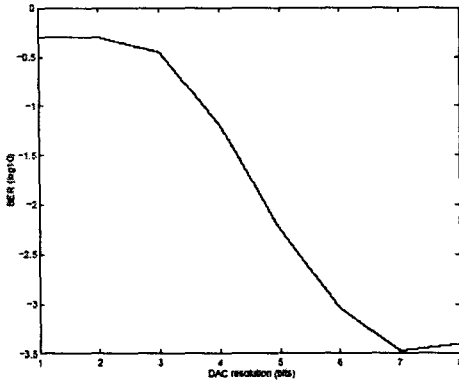


그림 3 AWGN 채널에서의 비트 에러율

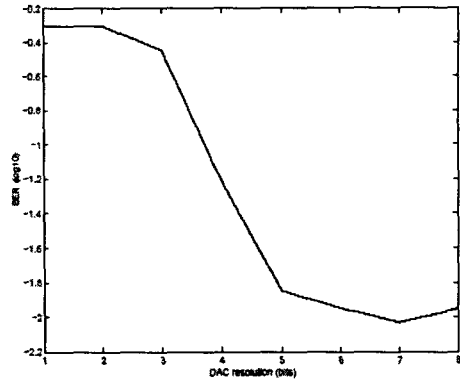


그림 4 페이딩 채널에서의 비트 에러율

송신기 필터에 의한 위상천이, 통과대역과 베이스 밴드 사이를 변환하기 위해 믹서에 입력되는 주파수 합성기의 출력 주파수 오프셋, 채널 페이딩에 의한 그룹 지연을 모델하였고, 이를 보상하기 위해 수신기의 FFT 출력과 복조기 입력 사이에 심볼 동기, 채널 추정 및 단입탐 등화기를 모델하였다. 그리고 PAPR (peak-to-average power ratio) 을 줄이고 주파수 선택적인 페이딩 효과에 강인성을 가지기 위해, 스크램블링과 인터리빙을 IEEE 802.15.3a 제안서[3]에 따라 모델하였다. 페이딩 채널 모델은 앞 절에서 설명한 Saleh-Valenzuela 모델을 4-m LOS 채널에 대해 사용하였다.

양자화 오차가 없을 경우, 1/2 코딩이득을 가지는 채널코딩을 사용하여 IEEE 802.15.3 MAC 레이어가 요구하는  $10^{-6}$  근방의 비트 에러율을 얻기 위한 최소 SNR 에서 DAC 해상도에 따른 양자화 오차를 변화시키면서 수신 측에서의 비트 에러율을 얻었다. 그림 3 과 그림 4 는 AWGN 채널과 페이딩 채널에 대한 이 결과를 각각 보여준다. 여기서, 페이딩 채널에 대하여  $10^{-2}$  비트 에러율을 얻기 위해서는 AWGN 채널에서  $10^{-3}$  비트 에러율을 얻기 위해 필요한 SNR 보다 10-dB 높은 SNR 이 요구됨을 볼 수 있다. 또한, DAC/ADC 해상도는 AWGN 채널과 페이딩 채널에 대해, 각각 6-bit 와 5-bit 이상이라야 비트 에러율이 최소화 됨을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 페이딩 채널에서의 OFDM 기반의

멀티밴드 UWB 송수신기 비트 에러율을, AWGN 노이즈에 의한 SNR 감소와 DAC 해상도에 따른 양자화 오차, 이 두 가지 파라미터로 해석하고, 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 페이딩 채널에서는, AWGN 채널과 동일한 수준의 비트 에러율을 유지하기 위하여 10-dB 이상 높은 SNR 이 필요하다. 페이딩 채널에서 비트 에러율이 양자화 오차의 영향을 받지 않기 위해서는 해석적으로는 4-bit, 시뮬레이션 상으로는 5-bit 이상의 DAC 와 ADC 해상도가 필요함을 보였다.

## 참고문헌

- [1] Steve Stroh, "Ultra-Wideband: Multimedia Unplugged," *IEEE Spectrum*, pp. 23-27, Sep. 2003.
- [2] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3a.html>
- [3] A. Batra *et al.*, "Multi-band OFDM Physical Layer Proposal", *IEEE 802.15 TG3a document*, No. P802.15-03/109r1, Mar. 2003.
- [4] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-5, No. 2, pp. 128-137, Feb. 1987.
- [5] J. Foerster, "Channel Modeling Sub-committee Report Final", *IEEE 802.15 TG3a document*, No. P802.15-02/368r5-SG3a, Nov. 2002.
- [6] S. Wei *et al.*, "A Modern Extreme Value Theory Approach to Calculating the Distribution of the Peak-to-Average Power Ratio in OFDM Systems," *Proc. Of IEEE Int'l Conf. on Comm.*, Vol. 3, pp. 1686-1690, May, 2002.