

http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.1.1

JIWIT 2012-1-1

# Wavelet Pulse를 이용한 다중 사용자 환경에서의 TR-UWB 시스템의 성능 비교

## Performance Comparison of the TR-UWB System Using Wavelet Pulse in Multiuser Environment

이규섭\*, 최진규\*\*

Kyuseup Lee, Ginkyu Choi

**요 약** 본 논문에서는 다중 환경에서의 Wavelet Pulse를 이용한 TR-UWB 시스템의 성능에 대하여 DPSS 펄스와 2차 가우시안 펄스와 비교 분석하였다. TR-UWB 시스템은 데이터 신호와 레퍼런스 신호를 일정 시간 간격을 두고 같이 보낸다. 이때 두 개의 신호는 동일한 채널을 통과 하므로 수신기에서는 이 레퍼런스 신호를 템플릿으로 사용하여 채널 추정 없이 복조 할 수 있어 수신기의 복잡도를 낮출 수 있는 장점이 있다. 하지만 기존의 가우시안 신호 기반의 TR-UWB 시스템은 다중 사용자 환경에서 사용자간의 간섭으로 인한 수신기 성능이 저하되는 단점이 있다. 이 단점을 극복하기 위해 DPSS(Discrete Prolate Spheroidal Sequence)를 이용한 사용자간의 간섭을 줄이는 방법이 있다. 본 논문에서 제안하는 기법은 다 해상도 기법을 이용하여 직교 하는 Wavelet 기저 함수를 생성하고 이 함수를 전송 펄스로 이용하여 사용자간의 간섭을 없애 다중 사용자 환경에서 비트 오류 성능이 향상된 시스템을 제안한다.

**Abstract** In this paper, the performance comparison of the TR-UWB System using Wavelet Pulse, DPSS pulse, and second Gaussian pulse in multi-user environment is analyzed. The data signal and the reference signal is sent with some time intervals in TR-UWB system. At this time the two signals are through the same channel. In the receiver the reference signal is used as a template. This advantage results in demodulation without channel estimation and low complexity of it. However the conventional TR-UWB system based on a Gaussian signal in a multi-user environment has the disadvantage of poor performance due to the interferences between the users. To overcome this disadvantage, DPSS (Discrete Prolate Spheroidal Sequence) is used to reduce the interferences between the users. We propose the system with multiresolution function of orthogonal wavelet reducing the interferences, which has a better performance in multi-user environment when they are sent in transmission side.

**Key Words :** Wavelet, Discrete Prolate Spheroidal Sequence, Transmitted Reference Ultra Wide Band, Multiresolution

### 1. 서 론

UWB 시스템은 반송파를 사용하지 않고 기저대역에서 수GHz 이상의 매우 넓은 주파수 대역을 사용하여

근거리 통신이나 레이더 등에 응용되고 있는 통신 방식이다. UWB는 잡음과 같은 매우 낮은 스펙트럼 전력 밀도를 사용하여 기존의 통신 시스템과 상호 간섭 없이 주파수를 공유하여 사용할 수 있는 장점을 갖는다<sup>[1]</sup>.

\*준회원, 홍익대학교 전자전산공학과

\*\*정회원, 홍익대학교 전자전기공학과

접수일자 2011.12.10, 수정완료 2012.1.15

게재확정일자 2012.2.10

Received: 10 December 2011 / Revised: 15 January 2012 /

Accepted: 10 February 2012

\*\*Corresponding Author: gkchoi@hongik.ac.kr

Dept. of Electronic & Electrical Engineering College of Science & Technology, Hongik University, Korea

일반적으로 RAKE 수신기를 이용한 UWB 시스템은 채널을 통과한 수신신호를 효과적으로 복조하기 위해서는 정확한 채널추정과 동기 정보가 필요하다. 하지만 정확한 채널 추정과 동기 정보를 얻기 위해서는 시스템의 복잡도가 증가하는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 TR-UWB(Transmitted Reference Ultra Wide Band) 방식이 주목 받고 있다. TR-UWB 시스템은 데이터 신호와 레퍼런스 신호를 일정한 짧은 시간 간격을 두고 같이 보낸다. 이때 두 개의 신호는 동일한 채널을 통과 하므로 수신기에서는 이 레퍼런스 신호를 템플릿으로 사용하여 채널 추정 없이 복조 할 수 있다. 따라서 시스템의 복잡도를 낮출 수 있고 저 전력의 시스템을 구성 할 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>[2]</sup>.

여러 UWB 기기들이 한 공간에서 동시에 사용되었을 때 이 UWB 기기들은 다중 접속이 가능 하도록 설계 되어야 한다. 현재 다중접속을 위한 TDMA PAM, PPM 또는 CDMA PAM, PPM 등을 이용한 다중 접속 UWB 시스템에 대한 여러 연구가 이루어져 있다. 일반적으로 TR-UWB의 PPM, PAM 방식들은 모든 사용자에게 같은 펄스 모양으로 데이터를 송신하기 때문에 사용자가 증가 할수록 MUI(Multi User Interference)가 증가 한다는 문제점을 가지고 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 낮은 상관 계수를 갖는 직교 다중 펄스를 이용하는 방법이 있다<sup>[3][4]</sup>. 웨이브렛(wavelet) 기저 함수는 직교 하는 특성을 가지고 있으므로 다중 펄스를 이용하는 기법에 적용 하는데 적당하다. 때문에 본 논문에서는 웨이브렛 펄스와 TR-UWB를 결합한 웨이브렛 TR-UWB 시스템을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 웨이브렛 펄스와 DPSS 펄스의 생성 방법 그리고 TR-UWB 시스템에 대하여 언급하고, III장에서는 제안한 시스템의 성능 평가를 위해 시뮬레이션 결과에 대하여 설명한 후, IV장에서는 제안한 방법의 실험 및 결과를 바탕으로 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

### 1. DPSS

DPSS는 수열이 유한하면서 또한 특정 주파수 영역에 집중 될 수 있는 함수를 찾는 과정에서 시작 되었다.

주어진 시간 간격에서 어떤 주파수 영역에 최대로 집중되는 PSWF(Prolate Spheroidal Wave Function)가 구해지며 DPSS는 연속 시간 함수인 이 PSWF를 이산 시간 영역으로 확장하여 수열의 길이가 유한하며 특정 주파수 영역에 최대로 집중되는 수열이다<sup>[5]</sup>.

DPSS 펄스를 디자인 하는 알고리즘은 임의로 주어진 주파수 마스크  $H(f)$ 에 대응하는 임펄스 응답  $h(t)$ 를 이용하여 그림 1과 같이  $\psi(t)$ 를 생성한다.  $\psi(t)$ 는 펄스 길이가  $T_m$ 으로 제한되고 임펄스 응답  $h(t)$ 를 통과 할 때 최소의 왜곡이 생기는 것으로 디자인 되어야 한다. 여기서  $\lambda\psi(t)$ 는  $\psi(t)$ 가  $h(t)$ 를 통과할 때의 출력이고  $\lambda$ 는 감쇄 인자 이다. 이때  $\lambda$ 는 최대한 1에 가까울수록 주파수가 주파수 마스크  $H(f)$ 의 범위에 집중될 수 있다<sup>[6]</sup>.

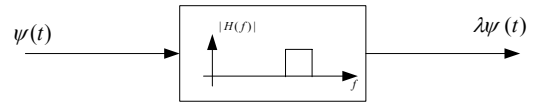


그림 1. 펄스 디자인 알고리즘의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of pulse design algorithm

$\psi(t)$ 는 유한한 범위에서 값을 가지므로 필터 출력  $\lambda\psi(t)$ 는  $\psi(t)$ 와  $h(t)$ 의 컨볼루션으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda\psi(t) = \int_{-T_m/2}^{T_m/2} \psi(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

DPSS 펄스의 주기가  $T_m$  일 때 펄스를 N개의 샘플을 하면 아래와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\lambda\psi[n] = \sum_{m=-N/2}^{N/2} \psi[m]h[n-m], n = -\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2} \quad (2)$$

위의 식 (2)를 벡터 형식으로 표현하면 다음과 같이  $(N+1) \times (N-1)$  토플릿츠(Toeplitz) 행렬 H 와 샘플 벡터  $\psi$ 의 곱으로 표현 된다.

$$\Lambda\psi = H\psi \quad (3)$$

여기서  $\psi$ 는 H의 고유 벡터이고  $\psi$ 는  $|\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_m|$  로 정의 한다. 그리고 고유 값  $\Lambda$

는  $diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 로 또한 정의 한다. 이때 고유 값은 다음과 같이 감소하는 순서로 배치된다.

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m \quad (4)$$

식 (3)의 수치적인 해법은 고유 값 분해를 이용하여 찾을 수 있다. 행렬  $H$ 는 고유 값 분해를 통해 고유벡터  $\psi = |\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_m|$  와 고유 값  $diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 로 분해 될 수 있다. 여기서 각각의 고유 값은 고유 벡터의 전력이 주파수 마스크  $H(f)$  안에 얼마나 집중 되었는가를 나타낸다. 그러므로 고유 값이 클수록 고유 벡터의 파워 스펙트럼은  $H(f)$ 에 꼭 들어 맞는다. 때문에 가장 주파수에 집중된 펄스를 선택하기 위해서는 고유 값이 큰 고유벡터를 선택해야한다.

이러한 방법으로 고유 값이 가장 큰 순서로 신호를 생성하면 DPSS 펄스를 생성할 수 있다. 그림 2는 이렇게 하여 얻을 수 있는 가장 큰 고유 값을 갖는 DPSS 펄스이다.

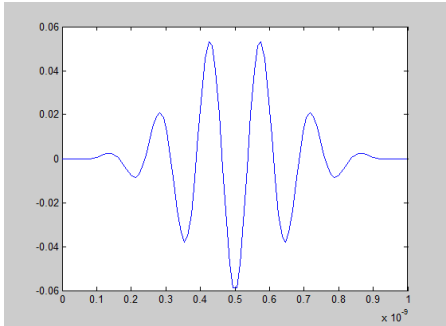


그림 2. DPSS 펄스  
Fig. 2. DPSS pulse

## 2. Wavelet 기저 함수

웨이브렛 기저함수는 스케일링 (scaling) 함수  $\phi(t)$  와 웨이브렛 함수  $\psi(t)$ 로 대표된다<sup>[7]</sup>.

$$\phi(t) = \sum_n h_0[n] \phi[2t - n] \quad (4)$$

$$\psi(t) = \sum_n h_1[n] \phi[2t - n] \quad (5)$$

여기서  $h_0[n]$  과  $h_1[n]$  은 일반적으로 LPF (low pass filter)와 HPF (high pass filter)이다.

$h_0[n]$  이 식 (6)과 같은 4-tap 필터라고 가정 한다면 주파수 영역에서  $H_0(z)$ 은 식 (7)과 같고 스케일링 함수는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_0[n] = [a \ b \ c \ d] \quad (6)$$

$$H_0(z) = a + bz^{-1} + cz^{-2} + dz^{-3} \quad (7)$$

$$\phi(t) = a\phi(2t) + b\phi(2t-1) + c\phi(2t-2) + d\phi(2t-3) \quad (8)$$

위 식 (8)로 표현된 스케일링 함수의 주파수 영역 표현  $\Phi(\Omega)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi(\Omega) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2^L} \Phi\left(\frac{\Omega}{2^L}\right) \prod_{m=1}^L H_0\left(\frac{\Omega}{2^m}\right) \quad (9)$$

식 (9)가 아래의 식 (10)을 만족 한다고 하면

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \Phi\left(\frac{\Omega}{2^L}\right) \cong \Phi(0) = \int \phi(t) dt = 1 \quad (10)$$

스케일링 함수의 시간 영역에서의 표현  $\phi(t)$ 는  $\Phi(\Omega)$ 를 푸리에 역변환을 이용하여 구할 수 있다. 따라서 스케일링 함수  $\phi(t)$ 는 아래와 같이 무한 컨벌루션으로 표현 된다.

$$\phi(t) = \frac{1}{2^L} \left[ \sum_n h_0[n] \delta_a(2t-n) * \sum_n h_0[n] \delta_a(4t-n) * \sum_n h_0[n] \delta_a(8t-n) \dots \right] \quad (11)$$

이때 필터계수를 다우비치(daubech)의 필터 계수로 이용하여 스케일링 함수  $\phi(t)$ 를 나타내면 그림 3과 같이 표현된다.

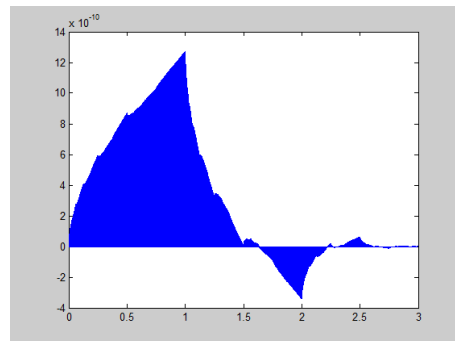


그림 3. 스케일링 함수  $\phi(t)$   
Fig. 3. Scaling function  $\phi(t)$

### III. Wavelet TR-UWB

본 논문에서는 TR-UWB 시스템의 송신 펄스로 Wavelet 기저(Basis)중 scaling 함수를 이용 하는 방법을 제안한다. Wavelet의 기저는 서로 직교하는 성질을 갖고 있기 때문에 TR-UWB 시스템에서 다른 사용자간 펄스의 간섭을 줄일 수 있다.

TR-UWB 시스템의 송신기에서 전송 되는 펄스는 칩 시간(chip time) 동안 한 쌍의 펄스를 보낸다. 첫 번째 펄스는 레퍼런스 신호이고 두 번째 펄스는 데이터 신호이다. TR-UWB 수신기에서 레퍼런스 신호는 템플릿(Template)으로 사용된다. n번째 사용자의 전송 신호의 표현은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$S_n(t) = \sqrt{E_{TX}^{(n)}} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} p_n(t - jT_s - c_n(j)T_c) + (-1)^{b \lfloor j/N_s \rfloor} p_n(t - jT_s - c_n(j)T_c - D_n) \quad (12)$$

여기에서 n은 각각의 사용자를 나타낸다.  $E_{TX}^{(n)}$ 은 n 번째 사용자의 비트당 전송 에너지이다. 그리고  $p_n(t)$ 는 전송할 신호로서 웨이브렛 함수의 기저인 scaling 함수가 된다.  $T_s$ 는  $(N_s, 1)$ 반복(Repetition) 코더를 사용했을 때의 심볼(Symbol)시간이다.  $c_n(j)$ 는 n번째 사용자 고유의 PN 코드에서 j번째 요소이다. 여기서  $c_n$ 은 주기가  $N_p$ 이고 원소의 수(Cardinality)는  $N_h$ 인 주기성을 갖고 있다.  $T_c$ 는 시간 도약 시퀀스(Time Hopping Sequence)의 칩 시간(Chip Time)이고 데이터 펄스와 레퍼런스 펄스의 간의 ISI(Inter Symbol Interference)가 생기지 않기 위해 두 펄스의 시간 간격보다 크게 한다.  $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 내림 연산을 나타낸다. 그리고  $b \lfloor j/N_s \rfloor$ 는 이진 데이터(source binary data)이고  $b \lfloor j/N_s \rfloor \in [0, 1]$ 이다.  $D_n$ 은 사용자에 따라 다르게 정해진 두 펄스 간의 시간 간격이다.

전체 사용자의 수를  $N_u$ 라고 했을때 TR-UWB 수신기에서  $N_u$ 명의 사용자 중 1 번째 사용자의 수신 신호를 나타내면 아래와 같다.

$$r_1(t) = \sum_{n=1}^{N_u} s_n(t) * h_n(t) + n(t) \quad (13)$$

여기서  $h_n(t)$ 은 n번째 사용자가 통과하는 채널 임펄스 응답이다. 그리고  $n(t)$ 는 평균이 0 인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이다. 이때 TR-UWB 수신기의 상관기 출력 Z는 다음과 같다.

$$Z = \int_{T_j}^{T_j + T_p} z(t) dt \quad (14)$$

여기서 z(t)는 식 (15)와 같이 주어진다. 식 (15)의  $D_1$ 은 첫 번째 사용자  $r_1$ 의 레퍼런스 신호와 데이터 신호사이의 지연시간으로 더블렛 지연(doublet delay)이다.

$$z(t) = r_1(t) \cdot r_1(t - D_1) \quad (15)$$

식 (14)의  $T_p$ 는 TR-UWB의 멀티패스 채널에서의 상관기의 효율적인 적분 길이이고<sup>[9]</sup>.  $T_j$ 는 z(t)의 j번째 프레임의 적분 시작시간이며 다음과 같이 표현된다.

$$T_j = \delta^{(1)} + D_1 \quad (16)$$

여기서  $\delta^{(1)}$ 은 첫 번째 사용자의 프레임 시간과 칩 시간 오프셋이다.

위와 같은 구조의 TR-UWB 시스템의 수신기는 그림 4와 같이 대략적으로 도식화 할 수 있다.

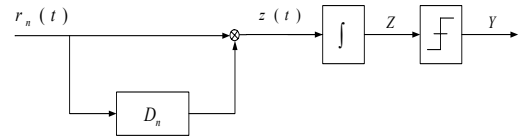


그림 4. 대략적인 TR-UWB 시스템의 수신기 구조  
Fig. 4. Simple Receiver Structure for TR-UWB system

### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 웨이브렛 펄스 기반의 TR-UWB 시스템, DPSS 펄스 기반의 TR-UWB 시스템, Gaussian 펄스 기반의 TR-UWB 시스템, 이 세 가지 TR-UWB 시스템의 비트 오류 성능을 비교 하였다. BER 성능 비교를 위해 IEEE 802.15.SG3a UWB study group의 채널 모델<sup>[10]</sup>에서의 시뮬레이션을 비교 분석 하였다. 그리고 동기는 서로 맞다고 가정 하여 시뮬레이션을 하

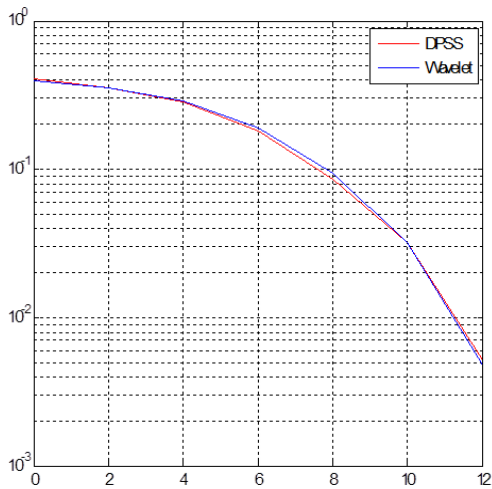


그림 5. 사용자가 1명일 때 CM1 채널의 BER 성능비교  
Fig. 5. BER Performance for 1 User in CM1 Channel

였다. 시뮬레이션 실행 시 10만개의 데이터를 임의로 생성하여 BER을 계산하고 평균을 하여 각 시스템에 대한 성능을 비교 분석 하였다.

첫 번째로 그림 5의 시뮬레이션은 0~4미터 거리의 LOS(line of sight)인 IEEE CMI 채널로 가정 하고 1명의 사용자를 가정한 웨이브렛 TR-UWB 시스템과 DPSS 펄스기반의 TR-UWB 시스템의 BER 성능을 비교 하였다. 이때 파라미터는  $N_s = 10$ ,  $N_h = 10$ ,  $N_p = 1$ ,  $T_c = 103ns$ ,  $T_s = N_h T_c$ , data rate = 97 kbit/s 이다.

윗 그림에서 알 수 있듯이 1명의 사용자가 있을 때 시뮬레이션의 결과는 웨이브렛 기반의 TR-UWB 시스템과 DPSS 기반의 TR-UWB는 비슷한 성능이 나오는 것을 확인 할 수 있다.

다음으로는 4명의 다중 사용자가 동시에 데이터를 전송할 때 IEEE CMI 채널에서 웨이브렛 TR-UWB 시스템과 DPSS 펄스기반의 TR-UWB 시스템의 BER 성능을 비교 하였다. 이때 시뮬레이션의 파라미터는  $N_s = 10$ ,  $N_h = 10$ ,  $N_p = 1$ ,  $T_c = 103ns$ ,  $T_s = N_h T_c$ , data rate = 97 kbit/s 이다.

그림 6에서와 같이 4명의 사용자가 있을 때는 기존 UWB에서 사용하는 일반적인 2차 가우시안 펄스를 사용하였을 때 보다 DPSS와 Wavelet를 이용 시 성능 향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 펄스의 직교성을

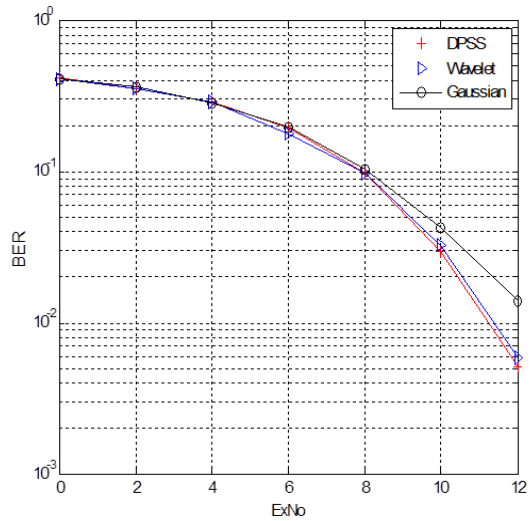


그림 6. 사용자가 4명일 때 CM1 채널의 BER 성능비교  
Fig. 6. BER Performance for 4 User in CM1 Channel

갖는 DPSS나 웨이브렛 펄스가 다중 사용자 환경에서 보다 적합하다는 요인에서 비롯된다고 간주된다. 한편 TR-UWB 시스템에 다우비치의 필터 계수만을 이용한 Wavelet 기반 결과와 DPSS 기반 결과의 성능이 서로 비슷한 것으로 판명되었다. 이는 TR-UWB 시스템에 multiresolution 개념인 Wavelet 함수를 접목시킬 수 있음을 나타낸다. 여러 tap 중에 하나의 tap만을 변화시켜 다양한 Wavelet 함수를 발생시켜 가장 최적화된 TR-UWB 시스템을 구성할 것으로 기대된다.

## V. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 웨이브렛 함수 중 스케일링 함수를 적용한 TR-UWB 시스템을 제시하고 이 시스템과 DPSS 펄스와 2차 가우시안 펄스를 이용한 TR-UWB 시스템과의 성능 비교를 분석하였다. 사용자가 4명일 경우 서로 직교하는 펄스를 갖는 DPSS와 Wavelet의 성능이 기존 2차 가우시안 펄스를 사용했을 때 보다 향상되는 것을 볼 수 있었다. 또한 이러한 다중 사용자 환경에서 Wavelet를 이용시 다우비치의 필터 계수만을 사용한 결과와 DPSS의 결과가 서로 성능이 비슷하여 DPSS 기반 TR-UWB 시스템을 Wavelet 기반 TR-UWB 시스템으로 적용 대체할 수 있음을 보여준다. 이런 결과를

바탕으로 추후 향후 연구 계획으로는 웨이브렛 기저 함수를 생성할 때 다우비치의 필터 계수만을 이용하지 않고 최적화된 Wavelet 필터 계수를 유도하여 보다 향상된 성능의 시스템을 연구할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Maria-Gabriella Di Benedetto, Guerino Giancola, "understanding ultra wide band radio Fundamentals", Prentice Hall, NJ, 2004
- [2] R. T. Hoctor and H. W. Tomlinson, "An overview of delay-hopped, transmitted reference RF communications," General Elect. Res. and Develop. Center, Tech. Rep. 2001CRD198, Jan. 2002
- [3] Hen-Geul Yeh, Karrem Shabaik, "Time Hopped Transmitted Reference with Multiple Autocorrelation Sampling for Ultra Wideband Radio", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, vol.13 No.10 p.767-769 Oct 2009
- [4] Dowla and F. Nekoogar, "Multiple access in ultra-wideband communications using multiple pulses and the use of least squares filters," in Proc. Radio and Wireless Conf., 2003, pp. 211-214.
- [5] D. Slepian and H. O. Pollak, "Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis, and uncertainty" in Bell Syst. Tech. J., vol. 40, no.1, pp.43 - 46, Jan. 1961.
- [6] B. Parr, B. Cho, K. Wallace, and Z. Ding, "A novel ultra-wideband pulse design algorithm", IEEE Commun. Lett., vol. 7, no. 5, pp. 219 - 21, May 2003.
- [7] P. P. Vaidyanathan, "Multirate Systems and Filter Banks", Prentice Hall NJ, 1993
- [8] Hen-Geul Yeh, Karrem Shabaik, "Time Hopped Transmitted Reference with Multiple Autocorrelation Sampling for Ultra Wideband Radio", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, vol.13 No.10 p.767-769 Oct. 2009
- [9] T. Zasowski, F. Althaus, and A. Wittneben, "An energy efficient transmitted-reference scheme for ultra wideband communications," in Proc. 2004 Int. Workshop Ultra Wideband Systems, pp. 146 - 50.
- [10] J. Foerster et. al., "Channel modeling sub-committee report final" in IEEE P802.15 WG for WPANs Technical Report, no. 02/490r0-SG34 2002.

※ 이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음

## 저자 소개

### 이 규 섭(학생회원)



- 2009년: 홍익대학교 전자전기공학과 (BS),
- 2011년: 홍익대학교 전자전산공학과 (MS),
- 2011년 - 현재: 홍익대학교 전자전산공학과 박사과정

<관심분야 : 차세대이동통신, wavelet, uwb, 통신신호처리>

### 최 진 규(정회원)



- 1983년: 성균관대학교 전자공학과 (BS),
- 1990년: (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (MS),
- 1994년: (미)Polytechnic Univ. 전산과학과 (MS),
- 1996년: (미)Polytechnic Univ. 전자전기공학과 (Ph.D),

- 1983년-1986년: LG 전자, Motorola Korea 연구원,
- 1996년-2004년: 삼성전자 통신연구소 수석연구원,
- 2004년 - 현재: 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 부교수

<관심분야 : 차세대이동통신, 초광대역 통신, 통신신호처리>