

主 題

# UWB 시간 도약 다원 접속 시스템

승실대학교 정보통신전자공학부 양 석 철(석사과정), 신 요 안(부교수)

차례

1. UWB 개요
2. UWB 실내 무선 채널 모델
3. 다원 접속을 위한 PN 부호 기반의 시간 도약 시퀀스
4. Binary UWB 다원 접속 시스템
5. 동일 상관 신호군 기반의 M-ary UWB 다원 접속 시스템
6. 향후 연구 방향
7. 감사의 글

## 1. UWB 개요

최근 들어 무선 PAN (Personal Area Network)과 같은 실내 무선 환경에서의 초고속 데이터 전송을 위한 새로운 방식으로서 UWB (Ultra Wide Band)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이미 2002년 4월에 미국 FCC (Federal Communications Commission)는 UWB를 위한 주파수 대역을 할당하였고, 특히 무선 통신 분야를 위해 3.1 - 10.6 GHz에 걸친 주파수 대역 제한과 -41.25 dBm 이하의 방사 제한을 두고 있다 [1]. 이에 발맞추어 Time Domain Corp.을 비롯한 유수 업체들에서는 UWB 칩셋 개발 및 각종 기술 특허 등을 선보이며 UWB의 상업화에 박차를 가하고 있다[2]. 연속적인 정현파를 사용하는 기존의 무선 통신 시스템과는 달리, UWB 시스템은 1 nsec 이하의 매우 좁은 폭을 갖는 펄스 또는 임펄스를 전송한다. 이러한 UWB의 장

점은 높은 채널 용량과 데이터 전송률을 가지며, 다중 경로에 대한 세밀한 분해가 용이하여 위치 예측과 Rake 수신이 가능하다는 점이다. 또한 UWB는 저전력의 초광대역 특성을 나타내므로 비화성과 낮은 간섭 특성을 가지며, 초단거리의 정밀함에 의해 위치 추적이 가능하고, RF와 IF단의 생략으로 인해 시스템 구현 비용을 절감할 수 있다[3]. 한편, 실내 환경에서 초고속 무선 PAN의 표준화를 위해 창설된 IEEE 802.15.3 Alternate Study Group 3a (SG3a)에서는 Intel, Motorola, Sony, Time Domain Corp., Xtreme Spectrum 등과 같은 관련 업체들의 참여를 통해 UWB 기반으로 초고속 데이터 전송을 위한 물리 계층 (Alternate PHY)의 결정을 위해 활발히 연구 중에 있으며, 세부적으로는 기존의 IEEE 802 무선 통신 시스템들과의 공존 문제, 다중 경로 환경에서의 강인성, 여러 응용 분야를 위한 연구 등을 다루고 있다[4]. 또한, 현재 동 그룹에서는 UWB의 최근 급격한 추세에 발맞추어 표준화를 위한

기존 일정을 변경, 충분한 제안서의 검토와 선별을 위해 2004년까지 UWB 표준화 계획을 연장한 상태이다.

## 2. UWB 실내 무선 채널 모델

UWB 시스템에서는 연속적인 파형이 아닌 펄스를 전송하며, 다중 경로에 대한 세밀한 분해가 가능하므로 Rake 기법을 이용한 수신 다이버시티가 가능하다. 본고에서 소개되는 실내 무선 채널은 최근 Intel의 J. R. Foerster에 의해 제안된 확률적 탭지연선 (Stochastic Tapped-Delay-Line) 다중 경로 모델로서 다음과 같은 채널 임펄스 응답을 갖는다[5].

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L_m-1} \alpha_l \delta(t - lT_m) \quad (1)$$

위 식에서  $\alpha_l$ 은 표준 편차가 3 dB로 주어진 Log-Normal 분포를 따르는  $l$ 번째 경로에서의 랜덤한 신호 진폭 감쇠를 나타내고,  $T_m$ 은 분해 가능한 최소 시간 단위를 나타내며,  $L_m$ 은 다중 경로 성분의 수, 즉 총 경로수를 나타낸다. 한편, 채널의 다중 경로 강도 프로파일 (Multipath Intensity Profile)은 다음과 같이 해당 경로에서의 채널 계수들에 의해 표현되는 평균 수신 신호 전력에 의해 정의될 수 있다[5].

$$E[\alpha_l^2] = \Omega_0 e^{-\delta l} \quad (2)$$

$$\delta \approx -\ln(0.001)/L_m$$

위에서  $\Omega_0$ 는 전체 수신 전력 정규화를 위한 값이고,  $E[\cdot]$ 는 통계적 기대값 연산,  $\delta$ 는 페이딩 파라미터를 나타내는데, 실제로 유효한 전력을 직진 경로 성분의 전력으로부터 30 dB까지 떨어지는 전력까지로 감안한다면,  $\delta$ 는 위의 하단에 있는 식과 같은 근사가 가능해진다. 한편, 채널의 실효 지연 확산 (Root Mean Square Delay Spread)을  $\sigma_\tau$ 라 할 때, 이는 다중 경로에서의 신호 지연과 감쇠를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$\sigma_\tau \equiv \sqrt{E[\tau^2] - (E[\tau])^2}$$

$$E[\tau^n] \equiv \frac{\sum_{l=0}^{L_m-1} (\tau_l)^n \alpha_l^2}{\sum_{l=0}^{L_m-1} \alpha_l^2} \quad (3)$$

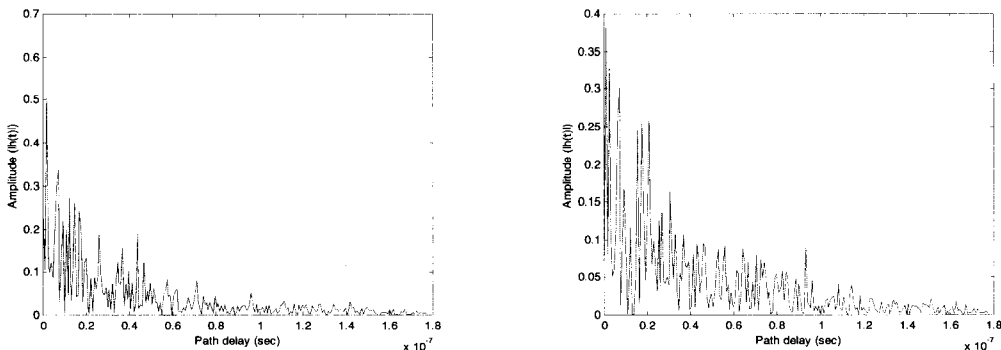


그림 1 : 도출된 파라미터들에 의해 생성된 UWB 실내 무선 채널 임펄스 응답의 예.

여기서,  $\tau_l \equiv lT_m$ 으로서  $l$ 번째 경로의 시간 지연을 나타낸다.  $T_m$ 을 0.7626 nsec로 가정하고, 일반적인 실내 채널 환경에서의 단거리 통신을 고려한 25 nsec를 실효 지연 확산  $\sigma_\tau$ 로 사용한 결과, 총 다중 경로 수  $L_m$ 은 233이며 그에 따른 페이딩 파라미터  $\delta$ 는 0.029647이 됨을 알 수 있고, 그림 1은 이러한 파라미터들에 따른 첫 번째 경로와의 상대적인 경로 지연에 대한 채널 임펄스 응답의 예를 도시하고 있다.

### 3. 다원 접속을 위한 PN 부호 기반의 시간 도약 시퀀스

UWB 다원 접속 시스템에서는 하나의 프레임 내에서 다수의 사용자가 고유의 시간 도약 부호를 가지고 서로 다른 슬롯을 점유하는 방식으로 다원 접속이 수행되므로, 랜덤한 시간 도약에 의한 선 스펙트럼 (Line Spectrum)의 억제를 통해 의사 잡음 특성을 얻을 수 있다. 이를 위한 시간 도약 시퀀스로서 지금까지는 대부분 이상적인 랜덤 시퀀스를 가정하였으나 이는 실제 구현이 불가능하므로, 본고에서는 본 저자들이 제안하였던 방식인 동일 차수의 다수  $m$ -시퀀스와 십진화기를 이용한 시간 도약 시퀀스를 소개하기로 한다 [7,8,9]. 이 시퀀스는, 특정 원시 다항식으로 표현 가능한  $n$ -Stage LFSR (Linear Feedback Shift Register)로부터 얻어지는  $L \equiv 2^n - 1$  비트 주기의  $m$ -시퀀스를 이용하여 생성된다. 한편,  $m$ -시퀀스를 생성하는  $n$ 차 원시 다항식의 개수 즉 서로 다른  $m$ -시퀀스의 개수  $M_n$ 은 아래 식과 같이 주어지며[10,11], 여기서 심벌 " $p|L$ "은  $L$ 을 나누어 떨어지게 하는 모든 서로 다른 소수 (Prime Number)를 의미한다.

$$M_n = \frac{L}{n} \prod_{p|L} \left(1 - \frac{1}{p}\right) \equiv \frac{1}{n} \phi(L) \quad (4)$$

또한, 위 식에서  $\phi(L)$ 은 Euler Totient 함수라 불리며  $L$ 보다 작은 양의 정수 가운데  $L$ 과 서로소 (Relative Prime)인 것들의 개수를 나타낸다. 이제  $T_c$ 를 다원 접속을 위한 슬롯 시간이라 할 때, 하나의 프레임 시간  $T_f$ 가 총  $N_h$ 개의 시간 슬롯으로 구성되어  $T_f = N_h T_c$ 인 UWB 다원 접속 시스템에서 총  $N_u$ 명의 사용자가 다원 접속하는 경우를 고려하기로 하자. 여기서 또한  $N_h \leq N_u$ 라 가정하며, 일반성을 잃지 않고  $N_h \equiv 2^\ell$  (단,  $\ell$ 은 양의 정수)이라고 가정하면 하나의 시간 도약 시퀀스는 0부터  $N_h - 1$ 까지의 값으로 구성될 수 있다. 여기서, 주기가  $L = 2^n - 1$ 인 하나의  $m$ -시퀀스를  $\ell = \log_2 N_h$  비트 단위로 십진화하면 0부터  $N_h - 1$ 까지의 값들을 얻을 수 있게 되고, 십진화된  $m$ -시퀀스는 0부터  $N_h - 1$ 까지의 십진수가  $\lfloor L/\ell \rfloor$ 를 주기로 반복된다. 결과적으로 위와 같은 십진화 과정을 거친  $m$ -시퀀스는 사용자 한 명의 시간 도약 접속 패턴을 결정하는 시퀀스가 된다. 한편, 나머지 다른 사용자를 위한 시퀀스는  $m$ -시퀀스의 천이 (Shifting) 성질[10,11]을 기반으로 하여, 최초 십진화된  $m$ -시퀀스에 서로 다른 오프셋을 적용함으로써 생성할 수 있고, 결국 오프셋 순환 천이의 반복에 의해 하나의 원시 다항식에 대해서 총  $\lfloor L/f\ell \rfloor$ 개의 서로 다른 시간 도약 시퀀스를 얻을 수 있다. 결과적으로 총  $M_n$ 개의  $n$ 차 원시 다항식들을 모두 이용하여 생성 가능한 시간 도약 시퀀스의 개수는 총  $M_n \lfloor L/f\ell \rfloor$ 가 되고, 따라서 원시 다항식의 차수, 즉 LFSR의 메모리 수  $n$ 은 다음 조건을 만족하도록 선택되어야 한다.

Binary	1000000	0001001	0010011	0100110	1011111	0011000	1111100	.....
Decimal	64	9	19	38	95	24	124	.....

그림 2 :  $L = 1023$  비트인  $m$ -시퀀스와  $\ell = 7$  비트 단위로 십진수 변환된 시퀀스 예.

Original Sequence	64	9	19	38	95	24	124	71	63	.....
7-Offset Sequence	71	63	7	0	127	113	98	59	21	.....

그림 3 : 십진화된  $m$ -시퀀스와 이를  $f = 7$  오프셋만큼 천이하여 생성된 새로운 시퀀스.

$$N_u \leq \frac{1}{n} \phi(2^n - 1) \left\lfloor \frac{2^n - 1}{f\ell} \right\rfloor \quad (5)$$

본고에서는  $n = 10$  인 LFSR를 사용할 경우의 예를 들었는데, 이 경우 총 60개의 원시 다항식이 존재하고 이들로부터 생성되는 Binary  $m$ -시퀀스는  $L = 2^n - 1 = 1023$  비트를 주기로 반복된다. 그림 2는  $n = 10$  인 원시 다항식  $g(x) = x^{10} + x^3 + 1$  과 LFSR의 초기 상태 “000000001”을 이용하여 생성된 주기  $L = 1023$  비트의 Binary  $m$ -시퀀스와, 이를  $\ell = 7$  비트 단위로 십진수 변환한 시퀀스의 한 예를 나타내고 있다. 이러한 과정을 거쳐 십진화된  $m$ -시퀀스는 0부터  $N_h - 1 = 2^\ell - 1 = 127$  까지의 값을 갖게 되고  $\lfloor L/\ell \rfloor = 146$  의 주기를 가지므로, 마지막  $L - \ell \lfloor L/\ell \rfloor = 1$  비트를 제외한  $L - 1 = 1022$  비트만이  $\ell = 7$  비트 단위의 십진화에 적용된다. 또한 그림 3은 십진화된 주기  $\lfloor L/\ell \rfloor = 146$  의  $m$ -시퀀스 (즉 하나의 시간 도약 시퀀스)에  $f = 7$  의 십진수 오프셋 (즉  $f\ell = 49$  비트 오프셋) 천이를 적용하여 새로운 시퀀스를 생성하는 과정을 보여주고 있다. 위의 방법처럼, 하나의 원시 다항식에 의해 생성된 십

진  $m$ -시퀀스는 오프셋 천이의 연속적 적용에 의해서 총  $\lfloor L/f\ell \rfloor = 20$  개의 서로 다른 새로운 시퀀스를 생성하므로, 결국  $n = 10$  인 60개의 원시 다항식들 모두로부터 총  $60 \times 20 = 1200$  개의 서로 다른 시퀀스를 얻을 수 있고, 결과적으로 최대 1200명의 사용자가 고유의 시간 도약 시퀀스를 이용하여 다원 접속을 할 수 있게 된다.

#### 4. Binary UWB 다원 접속 시스템

UWB 시스템에서는 매우 짧은 폭의 펄스 (혹은 임펄스)를 사용하기 때문에 일반적으로 펄스 열의 형태로 신호가 구성되는데, 본고에서는 이러한 UWB 시스템의 대표적인 변조 방식중의 하나인 PPM (Pulse Position Modulation)을 이용하는 Binary UWB 시간 도약 다원 접속 시스템을 소개한다. 이 시스템의 송신단에서는 다음과 같은 가우시안 모노사이클 펄스  $p(t)$ 를 수신 단으로 전송한다[3].

$$p(t) = 2A\sqrt{\pi}e^{-\frac{t}{\tau_p}} e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (6)$$

위 식에서  $A$ 는 펄스 크기 상수이고  $\tau_p$ 는 펄스 폭을 결정하는 파라미터이다. 여기서 송수신 안테나 각각의 미분 특성으로 인해  $p(t)$ 를 미분한 형태의 다음과 같은 펄스  $w(t)$ 가 수신단의 상관기에 입력된다고 모델링된다[3].

$$w(t) = A' \left( 1 - \frac{4\pi t^2}{\tau_p^2} \right) e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (7)$$

위 식에서  $A'$ 은 적절한 크기의 상수이다. 위 식을 이용하면 결국, 수신단 상관기에 입력되는  $k$ 번째 사용자 전송 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다[3,7,8,9].

$$s^{(k)}(t) = \sum_j w(t - jT_f - c_j^{(k)}T_c - \delta d_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)}) \quad (8)$$

위 식에서,  $c_j^{(k)}$ 는  $k$ 번째 사용자의 시간 도약 시퀀스에서  $j$ 번째 시간 도약 부호를 나타내고,  $\delta d_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)}$ 에서  $\delta$ 는 비트 "0"과 "1"을 구분하는 PPM 펄스 시간 간격이며,  $d_{\lfloor j/N_s \rfloor}^{(k)}$ 는  $k$ 번째 사용자의  $\lfloor j/N_s \rfloor$ 번째 데이터 비트,  $N_s$ 는 펄스의 반복 전송 횟수를 나타낸다. 결국, 하나의 비트는 시간 도약에 의한 펄스의 위치 변화를 통해  $N_s$ 만큼 반복 전송되고, 그림 4는 위 식을 도식적으로 나타낸다.

UWB 다원 접속 시스템을 이용한 단일 기지

국 (혹은 액세스 포인트) - 다수 단말기 형태의 무선 네트워크 상황을 가정할 경우, 상향 링크에서는 다원 접속 신호들의 시간 지연이 비동기적으로 매우 랜덤하므로, 본고에서는 편의상 하향 링크의 경우만을 고려하기로 한다. 여기서 신호 파형 간의 부분적인 상관을 피하기 위해 슬롯 시간  $T_c$ 와  $L_m$ 개 경로로 구성된 다중 경로 채널의 분해 가능한 최소 시간인  $T_m$ 이 동일하다고 할 때, 이 UWB 시스템에  $N_u$ 명의 사용자 (혹은 단말기)가 다원 접속할 경우의 특정 사용자 수신단 입력 신호  $r(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{l=0}^{L_m-1} \alpha_l^{(k)} s^{(k)}(t - lT_m) + n(t) \quad (9)$$

여기서,  $\alpha_l^{(k)}$ 는  $k$ 번째 사용자 신호에 대한  $l$ 번째 경로의 감쇠 파라미터를 나타내며,  $n(t)$ 는 AWGN (Additive White Gaussian Noise)이다. 첫번째 사용자를 원하는 사용자로 감안하여 위 식을 다시 정리하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r^{(1)}(t) = \sum_{k=0}^{L_m-1} \alpha_k^{(1)} s^{(1)}(t - kT_m) + n_{tot}(t) \quad (10)$$

여기서  $n_{tot}(t)$ 는 첫번째 사용자 신호를 제외한 나머지 다른 사용자 신호들에 의한 다원 접속

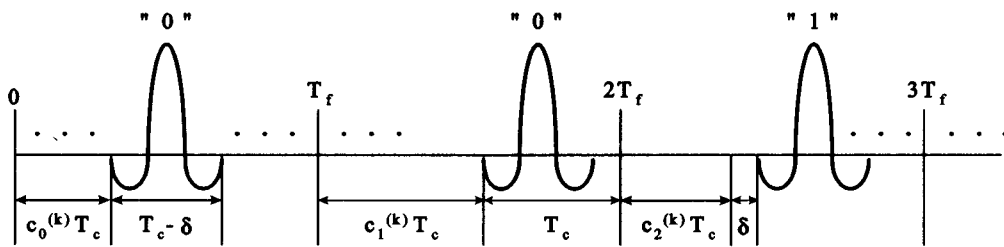


그림 4 : Binary UWB 다원 접속 시스템에서  $k$ 번째 사용자 신호 전송의 예시.

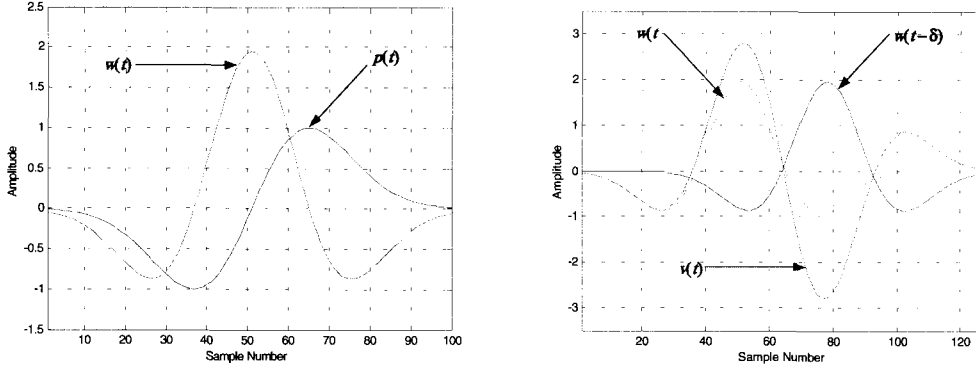


그림 5 : 전송 펄스  $p(t)$ , 수신 펄스  $w(t)$  및 참조 펄스  $v(t)$ 의 형태 비교.

간섭과 AWGN의 합을 나타낸다. 이 때, 각 사용자 신호들의 시간 지연이 단지 다중 경로 채널의 분해 가능한 최소 시간  $T_m$ , 즉 슬롯 시간  $T_c$ 에 의존하여 동기적인 특성을 갖게 되므로, Rake 수신기를 이용하면 채널로 인한 다른 사용자 신호들의 간섭을 완벽히 배제할 수 있다. 한편, 첫번째 사용자의  $i$ 번째 비트 복조를 위한 상관기에서의 참조 신호  $v_{\text{bit}}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다[3].

$$v(t) \equiv w(t) - w(t - \delta) \quad (11)$$

$$v_{\text{bit}}(t) \equiv \sum_{j=1}^{(i+1)N_s-1} v(t - jT_f - c_i^{(1)}T_c) \quad (12)$$

위 식에서  $v(t)$ 는 단일 펄스 복조를 위한 참조 펄스를 나타낸다. 참고로, 그림 5는 전송 펄스  $p(t)$ , 수신 펄스  $w(t)$ , 참조 펄스  $v(t)$ 의 형태에 대한 상호 비교를 도시하고 있다.

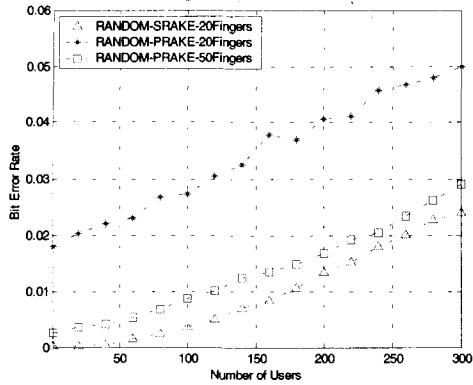
첫번째 사용자의 Rake 수신기 입력 신호를  $R^{(1)}(t)$ 라 할 때, 결국 이 수신 신호는 해당 경로에 따른 각각의 Rake Finger에 대한 입력으로 분리되어  $v_{\text{bit}}(t)$ 와 곱해진 후 상관 적분되고, 다음과 같은 비트 판정을 거치게 된다[7].

$$\sum_{l=0}^{L_R-1} \left[ c_l^{(1)} \times \int_{t \in T_i} R_l^{(1)}(t) v_{\text{bit}}(t) dt \right] > 0 \Leftrightarrow "0" \quad (13)$$

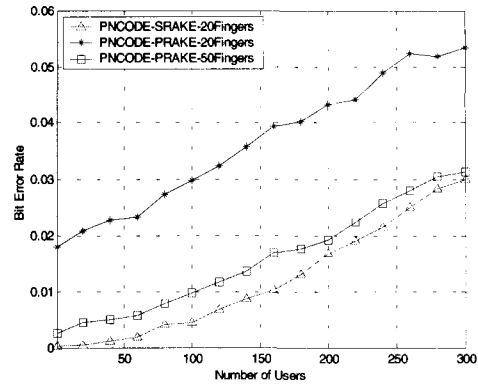
$$\sum_{l=0}^{L_R-1} \left[ c_l^{(1)} \times \int_{t \in T_i} R_l^{(1)}(t) v_{\text{bit}}(t) dt \right] < 0 \Leftrightarrow "1"$$

위 식에서  $T_i$ 는 첫번째 사용자의 한 비트를 나타내는, 즉 프레임 내 서로 다른 위치의  $T_c$  구간이  $N_s$ 만큼 지속되는 시간을 의미하고,  $L_R (\leq L_m)$ 은 Rake 수신기의 Finger 개수를 나타낸다. 또한  $R_l^{(1)}(t)$ 는 첫번째 사용자의 Rake 수신기에서  $l$ 번째 Finger의 입력 신호를 나타내며,  $c_l^{(1)}$ 는 해당 경로에서의 채널 보상을 위해 상관기 출력에 곱해지는 파라미터로 완벽한 채널 추정을 가정했을 경우  $\alpha_l^{(1)}$ 과 동일한 값을 갖는다.

Rake 수신기는 분해 가능한 모든 다중 경로 성분들 중 가장 빠른 경로 성분들을 결합하는 방식 (First Path Combining)에 의해 신호 복조를 수행하는 PRake (Partial Rake) 수신기와, 이와는 다르게 가장 강한 경로 성분들을 결합하는 방식 (Strongest Path Combining)에 의해 신호를 복조하는 SRake (Selective Rake) 수신기로 분류될 수 있다[12]. 특히, SRake 수신기는 PRake 수신기와 비교할 때 다중 경로 성분들을 모두 파악



(a) 이상적인 랜덤 시퀀스 적용



(b) PN 부호 기반의 시퀀스 적용

그림 6 : 시간 도약 시퀀스와 Rake 수신기에 따른 UWB 다원 접속 시스템의 성능 비교.

해야 하므로 복잡하다는 단점이 있지만, 비교적 적은 Rake Finger의 수를 고려했을 경우 신호 정보 획득의 측면에서 매우 우수한 성능을 가지고 있다. 그림 6는 펄스 반복 횟수  $N_s$ 를 20회, 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)를 10 dB, 최대 다원 접속이 가능한 사용자수  $N_u$ 를 300명이라 했을 때, 시간 도약 시퀀스와 Rake 수신기에 따른 UWB 다원 접속 시스템의 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능을 사용자 수의 변화에 대해 도시하고 있다[7]. 그림에서 알 수 있듯이, 이상적인 랜덤 시퀀스와 PN 부호 기반 시퀀스의 성능 차이가 매우 근소하고, 동일한 Rake Finger 수를 고려했을 때 SRake 수신기가 PRake 수신기보다 다중 경로 페이딩에 대해 월등한 강인성을 가지며, 특히 20개의 비교적 적은 수의 Finger를 가진 SRake 수신기의 성능이 50개의 Finger를 가진 PRake 수신기의 성능보다도 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

### 5. 동일 상관 신호군 기반의 $M$ -ary UWB 다원 접속 시스템

기존의 일반적인  $M$ -ary UWB 시스템 송신단에서는, Binary UWB 시스템의 경우와 유사하게  $M$ -ary PPM에 의해 결정된 해당 심벌의 펄스 위치 (혹은 시간 지연)를 통해 펄스를 전송하고, 수신단에서는  $M$ 개의 펄스 상관기와 참조 신호를 이용하여 심벌 복조를 수행 및 판정하게 된다[13]. 이와는 달리, 본고에서는 Binary PPM 방식과  $m$ -시퀀스 성질 기반의 동일 상관 신호군을 이용하여 심벌 신호를 결정하는  $M$ -ary UWB 시간 도약 다원 접속 시스템을 소개한다[14].

앞서 언급된 수신 펄스  $w(t)$ 의 지속 시간이  $T_p$ 이고 펄스당 에너지를  $E_p$ 라 할 때, 펄스의 정규화된 신호 상관 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$r_p(\tau) \equiv \frac{1}{E_p} \int_{-\infty}^{\infty} w(t)w(t-\tau)dt \quad (14)$$

$$E_p = \int_{-\infty}^{\infty} w^2(t)dt$$

위 식에서 Binary PPM을 위한 최적의 시간 간격 (앞서의 PPM 시간 간격  $\delta$ 와 동일)을 결

정하기 위하여  $\tau \in (0, T_p]$  구간 내에서 신호 상관 함수  $\gamma_p(\tau)$ 의 최소값을  $\gamma_{\min} \equiv \gamma_p(\tau_{\min})$ 이라 정의할 때, 수신단 상관기 입력 펄스인  $w(t)$ 를 이용하여 기본적인 Binary UWB 시스템의  $j$ 번째 전송되는 심벌을 표현하면 다음과 같다[14].

$$\Psi_j(t) = \sum_{k=0}^{N_s-1} w(t - kT_p - b_j^k \tau_{\min}), \quad j=1,2 \quad (15)$$

여기서  $T_p$ 는 앞서와 마찬가지로 프레임 시간을 나타내고,  $b_j^k$ 는 임의 차수의 원시 다항식과 해당 LFSR 메모리의 특정 초기 상태에 의해 최초로 생성된 길이가  $N_s$ 인  $m$ -시퀀스를,  $j$ 번째 심벌 신호를 위해  $j-1$ 번 순환 천이시킨 새로운  $m$ -시퀀스에서  $k$ 번째 비트 패턴을 나타낸다. 결국 연속적인 순환 천이 적용에 의해 생성된 각각의  $m$ -시퀀스는 각각의 심벌 신호를 표현하는 펄스 열의 비트 패턴을 결정하게 되고, 또한  $m$ -시퀀스의 성질에 의해서  $m$ -시퀀스간 즉 심벌 신호간의 상관은 서로 동일한 값을 갖게 된다. 따라서 Binary UWB 시스템의 심벌 신호간 상관 행렬  $\Gamma_b$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다 [14].

$$\Gamma_b = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} \\ \beta_{21} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_b \\ \lambda_b & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \beta_{ij} &\equiv \frac{1}{E_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_i(t) \Psi_j(t) dt \\ E_{\Psi} &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_j^2(t) dt \end{aligned} \quad (17)$$

위에서  $E_{\Psi}$ 는 심벌 신호 에너지를 나타내며,  $\beta_{ij}$ 는  $i$ 번째 심벌 신호와  $j$ 번째 심벌 신호간 정규화된 상관값이며 특히  $i \neq j$ 인 경우에는  $m$

-시퀀스의 상관 특성에 의해 모두 동일한 상관값  $\lambda_b$ 로서 표현 가능하다. 위 식에 의해, Binary UWB 시스템의 심벌 신호간 동일 상관값  $\lambda_b$ 는 다음과 같이 정규화된 신호 상관 함수  $\gamma_p(\tau)$ 의 최대값  $\gamma_p(0)$ 와 최소값  $\gamma_{\min}$ 에 의해 표현될 수 있다[14].

$$\lambda_b = \frac{\frac{N_s-1}{2} \gamma_p(0) + \frac{N_s+1}{2} \gamma_{\min}}{N_s} \quad (18)$$

이러한 Binary UWB 시스템을 기반으로 하여 본고에서 소개할  $M$ -ary UWB 시스템은, 심벌 신호를 위한 펄스열의 길이가 심벌수  $M$ 의 증가에 관계없이 일정하여 동일한 심벌 전송률을 갖는  $M$ -ary UWB 시스템 (“시스템 #1”)과 심벌수가 증가할수록 심벌 신호를 위한 펄스열의 길이가 증가하여  $M$ 에 무관하게 동일한 비트 전송률을 갖게되는  $M$ -ary UWB 시스템 (“시스템 #2”)이다[15,16]. 먼저, 두 시스템 공히 이용되는 Binary UWB 시스템 신호의 펄스열 구성을 위한  $m$ -시퀀스 행렬  $\Delta_b$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_b = \tau_{\min} \times \begin{bmatrix} b_1^0 & \dots & b_1^{N_s-1} \\ b_2^0 & \dots & b_2^{N_s-1} \end{bmatrix} = \tau_{\min} \times \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서,  $\mathbf{B}_1$ 은 첫번째 심벌을 나타내는 최초 생성된  $m$ -시퀀스의 벡터 표현이며, 이를 비트 단위로 한번 순환 천이시킨  $m$ -시퀀스 벡터  $\mathbf{B}_2$ 는 두번째 심벌을 위한 시퀀스를 나타낸다. 따라서 순환 천이 적용에 의해 동일한 비트 패턴의 시퀀스로 표현되는 심벌이 생성되는 것을 방지하기 위해  $M < N_s$ 의 조건이 만족된다고 할 때, 먼저  $M$ -ary UWB 시스템 #1의  $M$ 개 심벌을 위한 시퀀스 행렬  $\Delta_M^S$ 는 위 식을 확대 적용



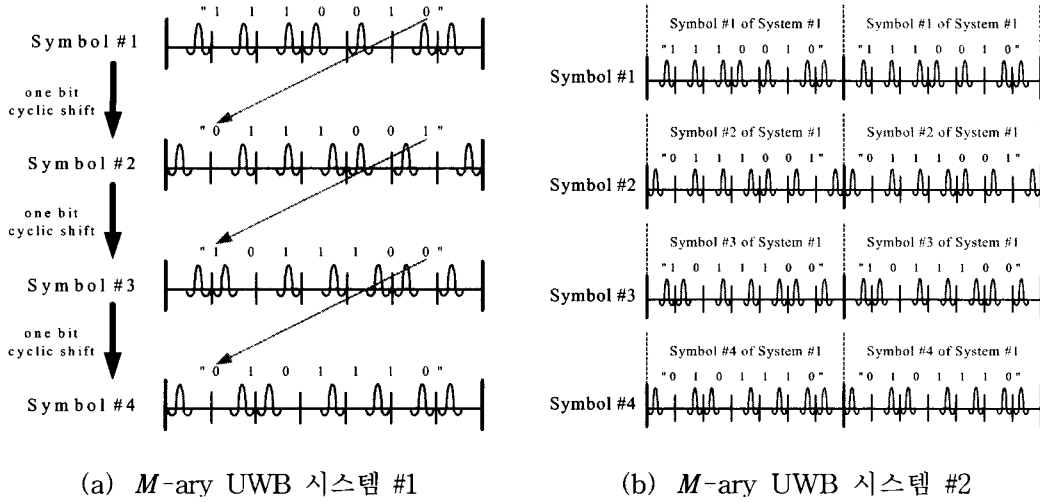


그림 7 : 동일 상관 신호군을 이용하는  $M$ -ary UWB 시스템의 심벌 구성 예 ( $M = 4$ ).

하여 다음과 같은  $m$ -시퀀스 벡터들로 표현 가능하다.

$$\Delta_M^S = \tau_{\min} \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_M \end{bmatrix}_{M \times 1} \quad (20)$$

한편  $N \equiv \log_2 M$ 이라 정의할 때,  $M$ -ary UWB 시스템 #2의 심벌 신호를 위한 시퀀스 행렬  $\Delta_M^B$ 은 다음과 같이 확장된 행렬로써 표현된다.

$$\Delta_M^B = \tau_{\min} \times \begin{bmatrix} B_1 & B_1 & \cdots & B_1 \\ B_2 & B_2 & \cdots & B_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_M & B_M & \cdots & B_M \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (21)$$

여기서 시스템 #1의 심벌간 상관 특성은 Binary UWB 시스템의 경우와 동일하게 고려되며, 시스템 #2의 경우에도 행렬 내 임의의 열을 이루고 있는 시퀀스 벡터들간의 상관 특성, 즉 서로 순환 천이의 관계에 있는  $m$ -시퀀스들간의 상관 특성이 시스템 #1의 경우와 동일하므로 심벌수의

증가에 따라 펄스열 길이는 증가하지만 심벌 신호간 상관은 마찬가지로 동일한 값을 유지하게 된다. 따라서 시스템 #1의 동일 상관값을  $\lambda_M^S$ 이라 하고 시스템 #2의 동일 상관값을  $\lambda_M^B$ 라 할 때, 두 값은 아래의 식에 의해 결국  $\lambda_b$ 과 같은 값을 갖게 된다.

$$\begin{aligned} \lambda_M^B &= \frac{N \frac{N_s - 1}{2} \gamma_p(0) + N \frac{N_s + 1}{2} \gamma_{\min}}{N \times N_s} \\ &= \frac{N \times \lambda_b}{N} = \lambda_b = \lambda_M^S \end{aligned} \quad (22)$$

따라서 두  $M$ -ary UWB 시스템의 심벌 신호간 상관 행렬  $\Gamma_M$ 은 동일 상관값  $\lambda_b$ 에 의해 다음과 같이 일반화될 수 있다.

$$\Gamma_M = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1M} \\ \beta_{21} & 1 & \cdots & \beta_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{M1} & \beta_{M2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_b & \cdots & \lambda_b \\ \lambda_b & 1 & \cdots & \lambda_b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_b & \lambda_b & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

결론적으로, 일반적인  $M$ -ary UWB 시스템에

서의  $j$ 번째 전송 심벌은 다음과 같다[15,16].

$$\psi_j(t) = \sum_{k=0}^{N_s N_s - 1} w(t - kT_f - b_j^k \tau_{\min}), \quad j=1, \dots, M \quad (24)$$

위 식에서, 시스템 #1의 경우에는  $N=1$ 로써 행렬 내 벡터열의 확장이 없고, 시스템 #2의 경우에는  $N=\log_2 M$ 만큼 행렬 내 벡터열이 확장되며 또한  $b_j^k$ 에서의  $k$ 도 동일한  $m$ -시퀀스의 반복으로 인해  $k \bmod N_s$ 와 동일하게 된다. 그림 7은  $M=4$ 일 때 시스템 #1 및 시스템 #2의 심벌 구성 방법들을 예시하고 있다.

Binary UWB 시스템의 경우와 유사하게,  $M$ -ary UWB 시간 도약 다원 접속 시스템에서의  $\nu$ 번째 사용자 전송 신호는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[15,16].

$$s^{(\nu)}(t) = \sum_k w(t - kT_f - c_k^{(\nu)} T_c - b^k \tau_{\min}) \quad (25)$$

위 식에서  $c_k^{(\nu)}$ 는  $\nu$ 번째 사용자의  $k$ 번째 시간 도약 부호를 나타내고,  $b^k$ 는 전송되는  $\nu$ 번째 사용자의 심벌 신호 시퀀스 열에서  $k$ 번째 비트 패턴을 나타낸다. 한편, 동일 상관 신호군의

특성상,  $M$ -ary UWB 시스템의 수신단은 PPM 시간 간격에 따른 펄스 단위 복조를 위한 2개의 상관기와 각 심벌 결정을 위한 수신 버퍼를 기반으로 하는 비교적 간단한 구조로 되어있다. 여기서 심벌 단위 복조의 수행을 위해,  $j$ 번째 심벌이  $L_m$ 개의 경로로 구성된 다중 경로 채널을 통과한 후 수신기에 입력되는 신호  $x(t)$ 를 표현하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \psi_j(t) * h(t) + n(t) \\ &= \sum_{l=0}^{L_m-1} \alpha_l \psi_j(t - lT_m) + n(t) \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 '\*'는 컨벌루션 연산을 나타낸다. 따라서 상관기를 거쳐 각 심벌을 위한 수신 버퍼에 저장되는 값  $y_j$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다 [15,16].

$$y_j = \sum_{k=0}^{N_s N_s - 1} \sum_{l=0}^{L_m - 1} c_{k,l} \times [(b_j^k \oplus 1)z_1(l) + b_j^k z_2(l)] \quad (27)$$

여기서  $\oplus$ 는 Exclusive-OR 논리 연산자를 나타내고,  $c_{k,l}$ 은  $k$ 번째 펄스에 대한  $l$ 번째 경

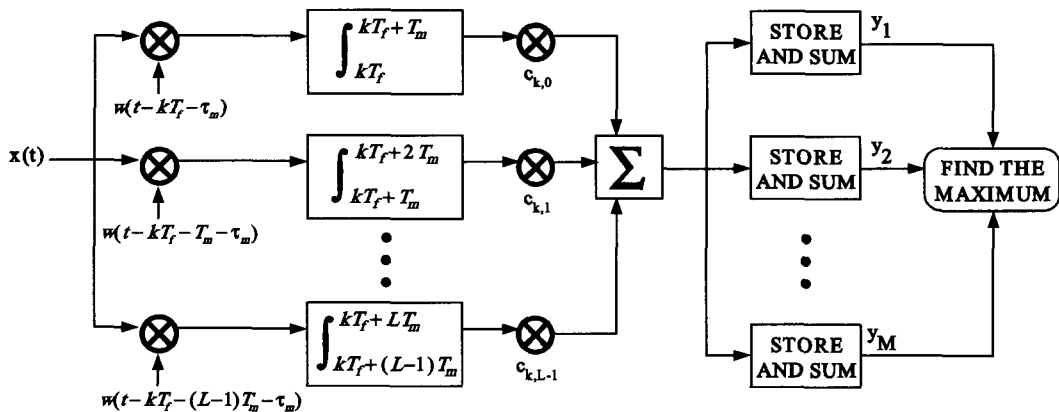
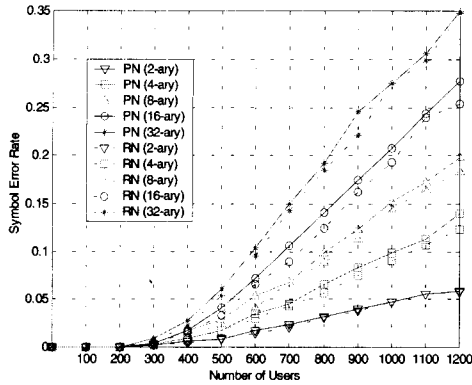
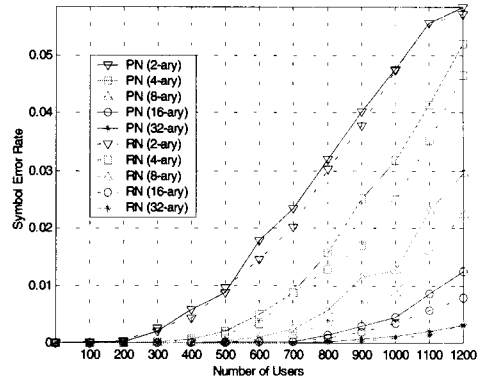


그림 8 : 동일 상관 신호군을 이용하는  $M$ -ary UWB 다원 접속 시스템 수신기 구조.



(a)  $M$ -ary UWB 시스템 #1



(b)  $M$ -ary UWB 시스템 #2

그림 9 : 동일 상관 신호군을 이용하는  $M$ -ary UWB 다원 접속 시스템의 성능 비교.

로에서의 신호 감쇠 성분을 보상하기 위해 상관기의 출력에 곱해지는 파라미터로서  $\alpha_{k,l}$ 과 동일하다. 또한,  $z_m(l)$ 는 PPM 시간 간격  $\tau_1=0, \tau_2=\tau_{\min}$  과 다중 경로 시간 지연에 따른 상관기의 출력으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다[15,16].

$$z_m(l) \equiv \int_{kT_f+lT_m}^{kT_f+(l+1)T_m} x(t)w(t-kT_f-lT_m-\tau_m)dt \quad (m=1,2) \quad (28)$$

위 식에서,  $T_m$ 는 앞서와 마찬가지로 슬롯 시간, 즉  $T_c = T_p + \tau_{\min}$  과 동일하다. 결국 수신 심벌은 최대값을 갖는 수신 버퍼에 의해 결정되며, 그림 8은  $M$ -ary UWB 시간 도약 다원 접속 시스템의 수신기 구조를 도시하고 있다.

그림 9는 수신 비트 SNR이 20 dB이고 10개의 Rake Finger를 가지는 SRake 수신기를 사용했을 때,  $g(x) = x^6 + x + 1$ 의 원시 다항식으로부터 도출된  $N_s = 63$  길이의  $m$ -시퀀스를 기반으로 하여 심벌을 결정하는 두  $M$ -ary UWB 시간 도약 다원 접속 시스템의 BER 성능을 다

원 접속 사용자 수의 변화에 대해 각각 도시하고 있다[15,16]. 그림에서 실선은 PN 부호 기반의 시퀀스를 적용한 경우, 점선은 이상적인 랜덤 시퀀스를 적용한 경우를 각각 나타내는데, 두 경우의 성능 차이가 매우 근소함을 알 수 있다. 한편 그림에서 알 수 있듯이, 동일한 심벌 전송률을 갖는 시스템 #1의 경우, 심벌수가 증가해도 동일 상관 신호군의 길이가 일정하여 심벌 신호간 직교성이 감소하기 때문에 다원 접속 간섭에 의한 성능 저하를 초래하는 반면, 동일한 비트 전송률을 갖는 시스템 #2의 경우에는 심벌수 증가에 따라 동일 상관 신호군의 길이 역시 증가하여 심벌 신호간 직교성이 유지되므로 다원 접속 간섭에 대한 강인성을 보임을 확인할 수 있다.

## 6. 향후 연구 방향

현재 UWB에 대한 규제가 발표되고 이를 이용한 물리 계층 표준화가 계속 진행되고 있는 상태이며, 특히 향후 실내 무선 PAN 등의 응용 분야에서 UWB의 활용이 무궁무진할 것으로 기대되어 이에 대한 연구가 계속 활발히 진행되어야

할 것으로 생각된다. 먼저, 시스템의 설계 측면에서는 주파수 다이버시티 등에 의한 초광대역폭의 활용, 시간 도약 부호 등에 의한 저간섭 다원 접속 방안, 초단시간 변조에 요구되는 고속 동기 획득 방법 등을 들 수 있다. 또한, UWB 시스템은 초광대역폭으로 인해 막대한 채널 용량(Capacity)을 가지게 되므로 시스템 설계에 있어서 절충 관계에 있는 데이터 전송률과 적용 가능 거리, 즉 반복 전송과 신호대잡음비에 관한 최적의 조합이 요구된다. 그 외 UWB 전송 채널 및 간섭 모델링, UWB에 적합한 안테나 설계, 더 나아가 UWB 시스템을 위한 소프트웨어 및 하드웨어 Testbed 제작 또한 앞으로 연구해야 할 사항들이다.

## 7. 감사의 글

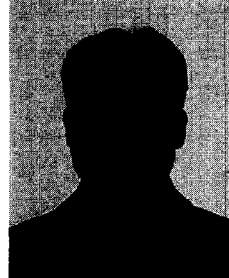
본 논문은 한국과학재단 특정기초연구 (과제번호 R01-2001-00329-0)의 지원 결과입니다.

## 8. 참고 문헌

- [1] Federal Communications Commission, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission, ET Docket 98-153, April 2002.
- [2] <http://www.time-domain.com>
- [3] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse radio : How it works," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 36-38, February 1998.
- [4] <http://www.ieee802.org/15/pub//SG3a.html>
- [5] J. R. Foerster, "The effects of multipath interference on the performance of UWB systems in an indoor wireless channel," *Proc. Vehicular Technol. Conf. (VTC 2001 - Spring)*, vol. 2, pp. 1176-1180, Rhodes, Greece, May 2001.
- [6] M. Z. Win, F. Ramirez-Mireles, R. A. Scholtz, and M. A. Barnes, "Ultra-wide bandwidth (UWB) signal propagation for outdoor wireless communications," *Proc. Vehicular Technol. Conf. (VTC '97)*, vol. 1, pp. 251-255, Phoenix, USA, May 1997.
- [7] S. Yang and Y. Shin, "Performance of multiple access UWB systems in indoor channels," (Invited Paper), *Proc. 4th Korea-Japan Joint Workshop Microwave & Millimeter-Wave Photonics*, pp. 177-180, Daejeon, Korea, January 2003.
- [8] 박광희, 신요안, "초광대역 임펄스 무선 전송 시스템을 위한 의사 잡음 부호 기반의 시간 도약 시퀀스," *한국통신학회논문지*, 제26권, 제7B호, pp. 1021-1033, 2001년 7월.
- [9] S. Kim, K.-H. Park, S. Yang, H.-S. Kim, and Y. Shin, "Time hopping sequences based on pseudo random codes for ultra wideband impulse radio systems," *Proc. Int'l Tech. Conf. on Circuits/Systems, Computers & Commun. (ITC-CSCC 2002)*, vol. 2, pp. 1354-1357, Phuket, Thailand, July 2002.
- [10] M. Simon et. al., *Spread Spectrum Communications Handbook*, McGraw-Hill, 1994.
- [11] A. W. Lam and S. Tantaratana, *Theory and Applications of Spread-Spectrum Systems*, IEEE Press, 1994.
- [12] D. Cassioli, and M. Z. Win, F. Vatala

ro, and A. F. Molisch, "Performance of low-complexity rake reception in a realistic UWB channel," Proc. Int'l Conf. Commun. (ICC 2002), vol. 2, pp. 763-767, New York City, USA, April 2002.

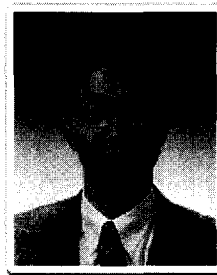
- [13] 안진철, 박광희, 신요안, "초광대역  $M$ 진 펄스 위치 변조 임펄스 무선 전송 시스템의 성능," 한국통신학회논문지, 제25권, 제11A호, pp. 1682-1690, 2000년 11월.
- [14] F. Ramirez-Mireles, "Performance of ultrawideband SSMA using time hopping and  $M$ -ary PPM," IEEE Jour. Selected Areas in Commun., vol. 19, no. 6, pp. 1186-1196, June 2002.
- [15] 양석철, 김산해, 김학성, 신요안, "동일 상관 신호군을 이용하는  $M$ -ary 다원 접속 UWB 시스템에서 PN 부호 기반 시간 도약 시퀀스의 성능," 2002년도 한국통신학회 추계종합학술발표회 논문집, 논문번호 11B-10-4, 2002년 11월.
- [16] 양석철, 신요안, "동일 상관 신호군을 이용하는  $M$ -ary UWB 다원 접속 시스템에서 PN 부호 기반 시간 도약 시퀀스의 성능," 한국통신학회논문지, 2003년 1월, 심사중.



**양 석 철 (梁錫喆)**

2002. 2 : 송실대학교 정보통신전자공학부 (학사)  
 2002. 3 - 현재 : 송실대학교 정보통신전자공학부 (석사과정)

관심분야 : UWB 전송 시스템



**신 요 안 (辛堯安)**

1987. 2 : 서울대학교 전자공학과 (학사)  
 1989. 2 : 서울대학교 전자공학과 (석사)  
 1992. 12 : Univ. of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터 공학과 (박사)

1992. 12 - 1994. 7 : 오스틴 소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.) 연구 콘소시엄 연구원

1994. 9 - 현재 : 송실대학교 정보통신전자공학부 부교수

관심분야 : CDMA 및 OFDM 모뎀, UWB 전송 시스템, 통신 신호처리 (MIMO 시공간 신호처리, 증폭기 선형화)