

# 간섭 환경에서 초광대역 임펄스 무선 전송 시스템의 성능 분석

이양선\* · 김지용\* · 우병훈\*\* · 강희조\*

\* 동신대학교 전기전자정보통신공학부

\*\* 전주공업대학 정보통신과

## Performance Analysis of Ultra Wideband Impulse Radio System in Interference Environment

Yang-Sun Lee\* Ji-Woong Kim\* Byung-hoon Woo\*\* Heau-Jo Kang\*

\* Dept. of Electrical & Electronic Information & Communication Eng., Dongshin Univ.

\*\* Dept of Information & Communication Eng., Jeonju Technical College.

E-mail : satcom2000@korea.com

### ABSTRACT

본 논문에서는 UWB/TH(Ultra Wideband/Time Hopping : 이하 Impulse Radio) 시스템을 의사 잡음 부호 발생기에 의해 생성된 시간도약 패턴을 사용하여 시간 영역에서 다원 접속 간섭이 배제되는 경우에 대해 동일 주파수 대역을 사용하는 기존 시스템에 의한 간섭 발생시 IR 시스템의 성능을 분석하였다. 간섭 점유율이 0.1 이하인 경우는 5GHz 대역에서 ISM 대역의 80MHz 대역폭이나 802.11a의 사용대역폭 20MHz와 같은 IR(Impulse Radio) 시스템에 비해 매우 협소한 대역을 사용하는 경우로써 향후 5-10GHz 대역에서 공유되는 IR 시스템에서 간섭으로 영향을 미칠 경우를 상정하여 분석하였다.

결과에 의하면, IR 전체 대역폭에서 간섭 점유율이 할수록 시스템 성능이 크게 열화 되고 부분대역 간섭 자체가 시스템 성능을 크게 열화 시킴을 알 수 있었다. SIR 30dB 이하에서 간섭 점유율이 0.1 이상 일 때는 SIR이 증가할수록 성능 향상폭이 커지지만 점유율이 0.1 이하에서는  $1 \times 10^{-1}$  이하의 성능개선이 이루어지고 30dB 이상에서는 일정 성능을 유지함을 알 수 있었다. 또한, 간섭 전력의 증가면에서는 간섭 점유율이 적을수록 거의 영향이 미치지 않았다. 따라서, IR 시스템에서는 간섭의 전력면 보다는 간섭의 점유 대역폭에 따라서 성능 열화가 크게 나타남을 알 수 있었다.

### 1. 서론

최근 전자기술의 발달로 나노 초 이하의 극히 짧은 펄스를 이용한 레이더와 통신기기의 개발이 가능하게 되었다. 이렇게 극히 짧은 펄스를 이용하는 기기를 "초광대역 기기"라 하는데, 일반적으로 그 사용 대역폭이 중심주파수의 25%(점유대역폭/중심주파수=0.25) 이상으로 광대역이다(점유대역폭은 통상 -10dB 대역폭을 적용한다)[1].

최근 임펄스 라디오 송신기에서 방사되는 신호의 전력스펙트럼이 비의도적으로 방사되는 전자파의 전력 스펙트럼과 거의 같은, 배경 잡음 이하의 매우 미미한 수준이며[2], 수백 만대의 임펄스 라디오 송신기가 동시에 동작하여도 여타 통신 시스템에 미치는 영향이 거의 없을 것이라는 연구 결과가 발표되었다[3]. 또한, 2002년 2월 FCC에서 5-10GHz 대역에서 부분적인 IR 기술을 승인함으로써 본격적인 개발이 이루어지고 있다[4]. IR

시스템에서는 1 nsec 이하의 매우 짧은 펄스폭을 갖는 가우시안 모노사이클 펄스를 펄스 위치 변조(pulse position modulation : PPM)를 이용하여 상향 변조 없이 그대로 기저대역 신호로 전송하고, 수신단에서는 상관기를 통해 복조한다[5],[6]. 다원접속 측면에서는 시간도약 PN 시퀀스를 사용한다. 이러한 특징들로 IR 시스템의 주파수 특성은 PPM 및 시간도약에 의해 평탄화되고, 스펙트럼은 백색 잡음과 유사한 수 GHz 대의 주파수 대역에 걸친 매우 낮은 전력의 초광대역 스펙트럼을 갖게된다.

본 논문에서는 IR 시스템의 성능 분석으로 의사 잡음 부호 발생기에 의해 생성된 시간도약 패턴을 사용하여 시간 영역에서 다원접속간섭이 배제되는 경우에 한정하였다. 또한, IR 시스템과 동일 주파수 대역을 사용하는 기존 시스템에 의한

간접 발생시 IR 시스템의 성능을 분석하였다.

## II. IR 시스템의 원리

### 2.1 가우시안 모노사이클 펄스

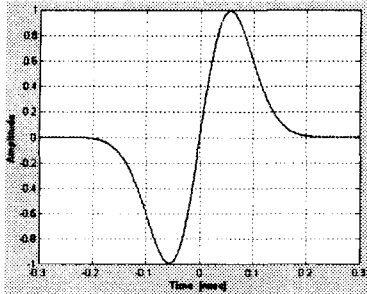


그림 1. 가우시안 모노사이클 펄스 ( $\tau=0.2$  nsec)

IR 시스템의 송신기에서는 아래 식(1)로 표현되는 가우시안 모노사이클 펄스  $v(t)$ 를 전송한다.

$$v(t) = 2A\sqrt{\pi}e^{-\frac{t}{\tau}} e^{-2\pi(t/\tau)^2} \quad (1)$$

여기서,  $A$ 는 펄스의 크기이고  $\tau$ 는 펄스의 폭을 결정하는 파라미터이다. 일반적으로  $\tau$ 는 1 nsec 이하의 매우작은 값을 사용한다. 그림 1은  $A=1$ ,  $\tau=0.2$  nsec일 때  $v(t)$ 를 도시한 그림이다. 식(1)과 같은 가우시안 모노사이클 펄스가 수신기에 입사되는 경우 수신단 안테나의 특성에 의해 수신단의 상관기에는 이의 미분된 형태의 펄스가 입력된다[5]-[7]. 따라서, 수신기 내 상관기의 입력 파형  $w(t)$ 는 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$w(t) = 2A\sqrt{\pi}e\left(\frac{1}{\tau} - \frac{4\pi t^2}{\tau^3}\right)e^{-2\pi(t/\tau)^2} \quad (2)$$

그림 2는  $A=1$ ,  $\tau=0.2$  nsec 일 때,  $v(t)$ ,  $w(t)$ , 그리고 상관기의 기준 신호(reference signal)에 사용되는 펄스  $p(t)$ 를 도시하고 있다.

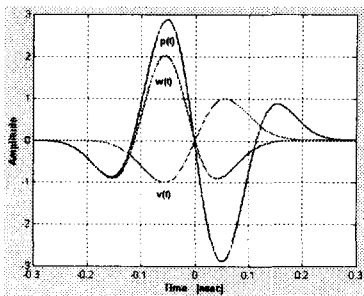


그림 2. 가우시안 모노사이클 송신 펄스  $v(t)$ , 이 펄스가 수신단 안테나를 통과한 후의 펄스  $w(t)$ , 상관 복조기의 기준 신호에 사용되는 펄스  $p(t)$ 의 예시( $\tau=0.2$  nsec).

### 2.2 디지털 PPM 변조와 시간도약 다원 접속

IR 시스템에서는 위 식(2)와 같은 펄스가 전송된다고 등가적으로 모델링하며, 이러한 펄스를 이용할 경우  $k$ 번째 사용자의 전송 신호는 다음과 같이 표현된다[5]-[7].

$$s^{(k)}(t) = \sum_j w(t - jT_f - c_j^{(k)}T_c - \delta d_{[j/N_s]}^{(k)}) \quad (3)$$

여기서,  $T_f$ 는 펄스 반복 시간으로서 일반적으로 펄스 폭의 수백 혹은 수천 배의 값을 이용한다. 따라서 IR 시스템의 duty cycle은 매우 작은 값을 갖게 된다. 이는 하나의  $T_f$ 내에 각각의 사용자가 시간도약 패턴에 따라 충돌을 최소화하면서 펄스를 전송하기 위해서이다.

IR 시스템에서는 사용자 간의 충돌을 방지하고 비화성을 유지하기 위해, 시간도약 패턴을 이용한 다원접속 방법을 이용한다. 위 식(3)에서  $c_j^{(k)}$ 는  $k$ 번째 사용자의 (10진수로 표현된)  $j$ 번째 도약 부호를 나타내며,  $T_c$ 는 우리가 제어 가능한 단위 시간이다.  $N_h$ 를 도약 부호가 가질 수 있는 최대 값이라 할 때  $0 \leq c_j^{(k)} < N_h$ 를 만족하며, 다음 펄스와의 충돌을 피하기 위해서는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$N_h T_c \leq T_f \quad (4)$$

식(4)에서  $N_h T_c \ll T_f$ 이면, 도약을 위한 부호의 수가 적어 여러 사용자의 펄스간에 충돌이 발생할 가능성이 커지게 되므로,  $N_h T_c \approx T_f$ 를 만족하도록  $N_h$ 와  $T_c$ 를 결정한다. 위에서 언급한 조건들을 만족하는 경우,  $k$ 번째 사용자의 펄스는  $jT_f + c_j^{(k)}T_c$ 에 존재하고, 다음 펄스는  $(j+1)T_f + c_{j+1}^{(k)}T_c$ 에 존재한다.

식(3)에서  $\delta d_{[j/N_s]}^{(k)}$ 는 디지털 데이터 "0"과 "1"에 대한 PPM 과정을 나타낸다. 여기서  $\delta$ 는 PPM 간격을 의미하고,  $d_{[j/N_s]}^{(k)} \in \{0, 1\}$ 는  $k$ 번째 사용자의  $[j/N_s]$ 번째 데이터 비트를 나타내며,  $N_s$ 는 하나의 데이터비트에 대한 반복 전송횟수이다. 따라서, 데이터 비트가 "0"인 경우  $\delta d_{[j/N_s]}^{(k)}$ 가 0이 되고 "1"인 경우는  $\delta$ 만큼 시간 지연을 가진 동일 펄스 파형이 전송된다. IR 시스템에서는 하나의 데이터 비트를  $N_s$ 개 반복해 보냄으로써, 실제 전송률  $R_s$ 는 아래와 같다.

$$R_s = \frac{1}{N_s T_f} \quad (\text{bps}) \quad (5)$$

### III. IR 시스템의 성능

#### 3.1 가우시안 채널 환경에서 다원접속 IR 시스템의 성능

$N_u$ 명의 사용자가 다원 접속한 상황에서, 첫 번째 사용자를 기준으로 수신신호를 다시 정리하면 식(6)와 같다.

$$r(t) = A_1 s^{(1)}(t - \tau_1) + n_{tot}(t) \quad (6)$$

$$n_{tot}(t) \equiv \sum_{k=1}^{N_u} A_k s^{(k)}(t - \tau_k) + n(t) \quad (7)$$

여기서,  $n_{tot}(t)$ 는 다른 사용자의 간섭과 잡음의 합이다.  $N_u$ 명의 사용자 각각이 랜덤한 시간도약 패턴을 이용하고 데이터비트의 발생이 랜덤하다면, 식(7)에서 다른 사용자에 의한 간섭은  $N_u$ 가 큰 경우 가우시안 분포를 갖는 랜덤변수로 근사되며,  $n_{tot}(t)$  역시 가우시안 분포를 갖게 된다. 따라서, 위와 같은 조건에서 IR 시스템의 비트 오류  $P_b$ 는 아래와 같이 구해진다[5].

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{S_{out}(N_u)}}^{\infty} e^{-x^2/2} dx = Q(\sqrt{S_{out}(N_u)}) \quad (8)$$

$$S_{out}(N_u) = \frac{m^2}{\sigma_{tot}^2(N_u)} \quad (9)$$

$$m = \int_{t=T}^{\infty} A_1 w_{bit}(t) v_{bit}(t) dt = A_1 N_s m_p \quad (10)$$

$$m_p = \int_{-\infty}^{\infty} w(t)[w(t) - w(t-\delta)] dt \quad (11)$$

$$\sigma_{tot}^2(N_u) = E\left\{\left[\int_{t=T}^{\infty} n_{tot}(t) v_{bit}(t) dt\right]^2\right\} \quad (12)$$

여기서,  $E(\cdot)$ 은 기대값 연산이다.

#### 3.2 부분대역 간섭 환경에서 단일 사용자 IR 시스템의 성능

본 절에서는 완벽한 시간동기를 이룬다는 가정 하에서 동일 주파수 대역을 사용하는 기존의 시스템으로 인한 협대역 간섭 발생시 IR 시스템의 성능을 분석한다. 시간도약 패턴 생성기는 주파수 도약 대역 확산 시스템에서 사용되는 것[8]과 동일하며, m-시퀀스 발생을 위한 생성 다항식이  $n$  단 선형 케환 시프트 레지스터와 10진 변환기인 decimator로 구성된다. 여기서  $n$ 은 최대 다원 접속 사용자 수  $N_u$ 에 의해 결정되며, 식(4)가 만족

될 때  $N_u \leq N_h = 2^n - 1$ 가 되도록 결정된다. 여러 사용자는 서로 다른 레지스터의 초기값을 사용하여 서로 다른 도약 패턴을 갖게 되며 이 경우 놓기가 완전하게 맞았다는 가정하에서는 서로의 신호가 시간 영역에서 전혀 겹치지 않아 다원 접속 간섭이 없게 된다[6].

따라서, 이 경우 다원 접속 상황에서도 기준되는 사용자에게 대하여 다른 사용자의 간섭이 전혀 없으므로 한 명의 사용자만이 접속한 것과 같고, 식(8),(9)는 다음과 같이 다시 표현된다.

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{S_{out}(1)}}^{\infty} e^{-x^2/2} dx = Q(\sqrt{S_{out}(1)}) \quad (19)$$

$$S_{out}(1) = \frac{(A_1 N_s m_p)^2}{\sigma_{rec}^2(1)} \quad (20)$$

여기서, 편의상  $A_1=1$ 이라 할 때,

$$S_{out}(1) = \frac{m^2}{\sigma_{rec}^2} = \frac{N_s \left[ \int_{-\infty}^{\infty} w(t) v(t) dt \right]^2}{\frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} v^2(t) dt} \quad (21)$$

그림 3은 전체 주파수 대역에서 부분 대역 간섭이 존재하는 주파수 대역을 나타낸다. 이때 전체 주파수 대역  $W_{ss}$ 와 간섭 신호가 존재하는 주파수 대역  $W_I$ 의 비  $\rho$ 는  $\rho = W_I/W_{ss}$ 이다. 그림 3에서  $N_I/2$ 는 평균 간섭 전력 밀도이고  $N_I/2\rho$ 는 부분 대역 간섭의 순간 최대 전력 밀도이다[8].

단,  $\rho$  : 대역 점유율 ( $0 < \rho \leq 1$ ).

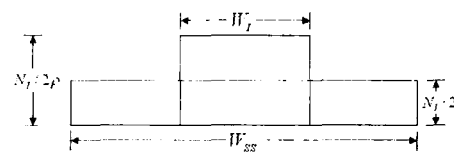


그림 3. 부분대역 간섭 신호의 주파수 분포

부분 대역 간섭은 확률  $\rho$ 로서 IR 시스템 신호 전송에 간섭을 주므로 부분대역 간섭하에서 가우스 잡음을 고려한 시스템의 예러는 가우스 잡음이 존재할 때의 오류율과 부분대역 간섭이 존재할 때의 오류율을 각각 계산하여 더하면 된다.

가우스 잡음만이 존재할 때의  $N_I$ 는  $N_I = N_0$ 이고, 가우스 잡음에 부분대역 간섭이 존재할 때  $N_I = N_0 + N_I$ 가 된다. 따라서 부분대역 간섭이 전체 대역에서 차지하는 부분 점유율이  $\rho$ 이므로 평균 비트 오류율은 다음과 같이 나타내진다.

$$P_c = (1 - \rho) P_b + \rho P_b \quad (22)$$

$$= \frac{1-\rho}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{S_{out}(1)}{2}} \right) + \frac{\rho}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{1}{2 \left( \frac{1}{S_{out}(1)} + \frac{1}{S_{I-out}(1)} \frac{1}{\rho} \right)}} \right)$$

여기서,  $S_{I-out}(1)$ 은 신호전력 대 간섭 전력 비이다. 본 논문에서 IR 시스템 분석에 사용한 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 시스템 분석 파라미터

$\rho$	0.004	20MHz(802.11a 점유대역폭)
	0.016	80MHz(5GHz ISM 대역폭)
	0.1	10 %(대역폭 점유율)
	0.5	50 %
$W$	5 GHz	IR 시스템 사용 대역폭
$\delta$	0.11 nsec	PPM에서 비트"0"과 "1"을 나타내는 펄스의 시간간격
$N_s$	1	펄스 반복 개수
$\tau$	0.2 nsec	펄스의 폭
$S_{out}(1)$	11 dB	$10^{-3}$ 이하 기준
$R_s$	14.3 Mbps	전송속도
$N_h$	127(user=127)	$2^n - 1$ (도약 부호 수(n=7))
$T_c$	0.55 nsec	상관기를 위한 적분구간
$T_f$	69.85 nsec	최소펄스반복시간

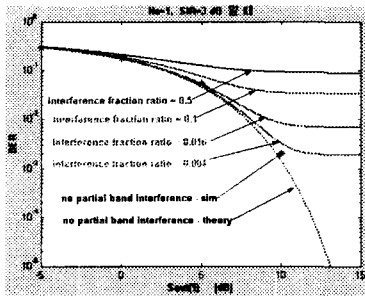


그림 4. 부분대역 간섭 환경에서 IR 시스템의 성능 변화( $N_s=1$ )

그림 4는  $N_s=1$ , SIR=3dB인 경우, 간섭 점유율에 따른 IR 시스템의 성능을 나타낸다. IR 전체 대역폭에서 간섭 점유율이 클수록(0.1 이상) 시스템 성능이 크게 열화 되고 부분대역 간섭 자체가 시스템을 크게 열화 시킴을 알 수 있다.

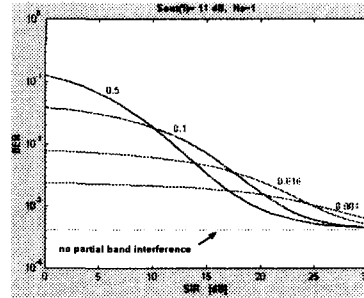


그림 5. 부분대역 간섭 환경에서 SIR의 변화에 따른 IR 시스템의 성능

그림 5는  $10^{-3}$  이하를 기준으로  $S_{out}(1)=11$ dB 이고,  $N_s=1$ 인 경우 SIR의 변화에 따른 시스템 성능을 나타낸다. SIR 30dB 이하에서 간섭 점유율이 클수록(0.1이상) 성능 향상폭이 커지지만 점유율이 적은(0.1이하) 협대역 간섭일 때는  $1 \times 10^{-1}$  이하의 성능개선이 이루어지고 30dB 이상에서는 일정 성능을 유지함을 알 수 있다. 또한, 간섭 전력의 증가면에서는 간섭 점유율이 적을수록 거의 영향이 미치지 않았다.

따라서, IR 시스템에서는 간섭의 전력면 보다는 간섭의 점유 대역폭에 따라서 성능 열화가 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 6은  $S_{out}(1)=11$ dB 이고, ISR=3dB인 경우  $N_s$ 와 간섭 점유율에 따른 IR 시스템의 성능을 나타낸다.

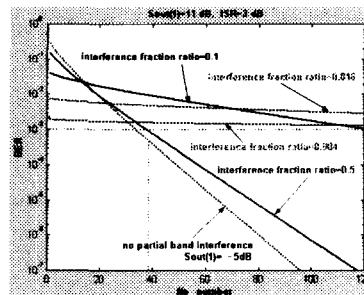


그림 6.  $N_s$ 와 간섭 점유율에 따른 IR 시스템의 성능

다원접속 간섭이 배제된 경우 AWGN환경에서  $N_s$ 를 증가시킴으로써 매우 큰 폭의 성능 개선이 이루어짐을 알 수 있다. 반면, 부분대역 간섭 환경에서는  $N_s$ 를 증가시킴으로써 간섭 점유율이 0.1 이상의 협대역 간섭에 대해서 큰 폭의 성능 개선을 얻을 수 있었으나 간섭 점유율이 0.1 이하의 협대역 간섭일 때는  $N_s$ 를 증가시켜도 시스템 성능에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

간섭 점유율이 0.1 이하인 경우는 5GHz 대역에서 ISM 대역의 80MHz 대역폭이나 802.11a의

사용대역폭 20MHz와 같은 IR 시스템에 비해 매우 협소한 대역을 사용하는 경우로써 향후 5-10GHz 대역에서 공유되는 IR 시스템에서 간섭으로 영향을 미칠 경우를 상정하여 분석하였다. 따라서, 정확한 간섭 점유율의 추정을 통해 IR 시스템 사용 대역폭에서 간섭 점유율이 0.1 이상일 경우는 적절한  $N_s$ 의 증가와 간섭으로 인한 에러를 보상하기 위한 코딩 기법이 적용되어야 하고, 간섭 점유율이 0.1 이하인 경우  $N_s$ 의 증가보다는 협대역 간섭에 대한 강력한 코딩기법을 적용함으로써 타 시스템과의 주파수 공유와 더불어 최적의 전송효율을 갖는 시스템 설계가 가능함을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 IR 시스템과 동일 주파수 대역을 사용하는 다른 시스템에 의한 협대역 간섭 발생시 IR 시스템의 성능을 분석하였다.

수신기에서 완벽한 시간동기화를 가정한 경우, 동일 주파수 대역을 사용하는 다른 시스템에 의한 간섭으로 IR 시스템의 성능이 현저하게 떨어짐을 알 수 있었다. 특히, 간섭의 IR 시스템 사용대역폭 점유율에 따라 그 영향이 크게 변화함을 알 수 있었다. 본 논문의 분석 결과, IR 시스템에서는 간섭의 전력면 보다는 간섭의 점유 대역폭에 따라서 성능 열화가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 부분대역 간섭 환경에서는  $N_s$ 를 증가시킴으로써 간섭 점유율이 큰(0.1 이상) 협대역 간섭일수록 큰 폭의 성능 개선을 얻을 수 있었으나 간섭 점유율이 적은(0.1 이하) 협대역 간섭일 때는  $N_s$ 를 증가시켜도 시스템 성능에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

따라서, 이러한 분석을 바탕으로 IR 시스템의 사용 대역폭과 동일한 주파수 대역을 사용하는 기존의 시스템으로부터의 간섭의 영향에 대해 정확한 간섭 점유율을 추정하여 대역폭 점유율에 따른 최적의  $N_s$ 를 설정하고 적절한 코딩 기법을 적용함으로써 타 시스템과의 주파수 공유와 더불어 최상의 전송효율을 얻을 수 있을 것이다.

그러나, 본 논문에서는 수신단의 동기화 완벽하다고 가정했기 때문에 이러한 가정이 맞지 않은 경우에는 다원접속 간섭이 발생하게 된다. 따라서 이에 대한 분석이 필요하다. 향후 실제적인 실내무선 채널 환경에서 동일 대역을 공유하는 타 시스템의 간섭과 다원접속간섭을 고려한 IR 시스템의 구체적인 분석이 필요하리라 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] 류충상, "UWB의 동향과 발전 전망", 전파 제 104호 2002년 1-2월호.
- [2] Time Domain Corp., "Time-Modulated Ultra Wide-Band Radio Measurement & Spectrum Management Issues," *Presentation Material at National Radio Science Meeting, Boulder, USA*, Jan. 1999.
- [3] J. Mardoff, "FCC Nulls Wider Commercial Use of Radical Radio Technology," *The New York Times (Tech. Section)*, Dec. 21, 1998.
- [4] <http://www.fcc.gov/>
- [5] R. A. Scholtz, "Multiple Access with Time Hopping Impulse Modulation," *Proc. IEEE MILCOM '93*, pp. 447-450, Oct. 1993.
- [6] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse Radio " How It Works," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 2, pp. 36-38, Feb. 1998.
- [7] R. A. Scholtz and M. Z. Win, "Impulse radio," in *Wireless Communications* (S. G. Glisic and P. A. Leppanen Eds.), Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [8] M. K. Simon, et al., *Spread spectrum communication Handbook*, McGraw-Hill, 1994. 4