

## DS-TH UWB 시스템의 전력 스펙트럼 분석

김영철\*, 이정석\*\*, 강덕근\*

### 요약

본 논문은 직접확산-시간도약 초광대역 (DS-TH UWB) 시스템에 관하여 전력 스펙트럼 특성을 연구하였다. DS-TH UWB 시스템은 정보 신호를 의사잡음 부호와 연산하여 불규칙한 패턴의 펄스열로 구성하고 이를 펄스열의 칩으로 묶어 복수개의 그룹으로 만들었으며 각 그룹을 특정 값으로 매핑하게 한다. 이 특정 값과 매핑 장치 내의 Lookup Table로부터 타이밍 정보를 비교하여 (+)/(-) 펄스를 프레임 내에 위치시키게 된다. 결과적으로 기존의 시스템에서 발생하는 에너지 스파크 현상을 매우 효과적으로 억압할 수 있었으며, 본 논문에서 제안하는 DS-TH UWB 시스템은 고속의 시간도약 부호를 이용하지 않고서도 평활한 전력 스펙트럼 특성을 형성할 수 있었다.

## Analysis on the Power Spectrum of Direct Sequence-Time Hopping UltraWideBand System

Young-Chul Kim\*, Jeong-suk Lee\*\*, Duk-Keun Kang\*

### Abstract

In This paper, we have analyzed the power spectrum of DS-TH Ultrawideband (Direct Sequence-Time Hopping UWB) system which used pseudo-noise (PN) code. The DS-TH UWB system proposed in this paper multiplies the information signal with PN code to construct pulse train with random pattern and then the chips in pulse train are bundled into several groups to map to the particular values. The (+)/(-) pulse is located in the time slot of frame by comparing a particular value with timing information that was stored in the lookup table. Thus, the energy spark (Comb Line) which is generated certainly in conventional system can be suppressed efficiently by PN code. And we knew that the proposed DS-TH UWB system even could have very smoothing power spectrum characteristic without applying high speed Time-Hopping code.

Key words : DS-TH UWB, Power spectrum, PN code

### 1. 서론

단일 펄스 초광대역 (UltraWideBand : UWB) 시스템의 전력 스펙트럼은 마치 기저 대역 잡음과 같이 존재하며 매우 넓은 주파수 대역을 이용함으로써 협대역 무선 시스템에 영향을 끼칠 수 있어 방사 전력이 제한되고 있다. 제한된 방사 전력은 정보 신호의 송달 거리가 한정되는데, 이는 적용되는 변조 방식의 전력 스펙트럼 특성과 밀접하게 관련된다.

단일 펄스 초광대역 시스템에 적용할 수 있는 변조 방식은 크게 펄스위치변조 (Pulse Position Modulation : PPM), 펄스진폭변조 (Pulse Amplitude Modulation : PAM), 2진 위상 천이 키잉 (Binary Phase Shift Keying : BPSK) 또는 안티포달 (Antipodal), 온-오프

키잉 (On-Off Keying : OOK) 등이 있다. 지금까지 연구된 결과에 의하면 2진 위상천이 키잉 또는 안티포달이 다른 변조 방식보다 전력 스펙트럼 특성 및 오율 성능이 뛰어난 것으로 알려졌다. 2진 위상 천이 키잉 또는 안티포달을 이용한 초광대역 시스템은 정보 신호를 규칙적인 간격으로 펄스열 (프레임)을 구성하게 되면, 전력 스펙트럼 상에 규칙적인 간격에 의하여 에너지 스파크 (comb line 또는 line spectrum) 현상이 발생하게 되어 기존의 무선 시스템에 영향을 끼치게 된다. 따라서 이러한 원인을 제거하는데, 시간도약 부호를 이용하고 시간도약이 고속일수록 에너지 스파크 현상이 크게 억압되어 평활한 전력 스펙트럼 특성을 유지할 수는 있지만, 이는 시스템 구성의 제한 요인이 된다[1]-[3].

\* 제일저자(First Author) : 김영철  
접수일 : 2004년 7 월 25 일, 완료일 : 2004년 8 월 23 일  
\* 한국정보통신기능대학 방송통신설비과 전임강사  
yckim@icpc.ac.kr  
\*\* 삼성전기 중앙연구소 RF LAB 책임연구원  
\* 한국정보통신기능대학 학장

\* 본 연구는 2004년도 한국정보통신기능대학의 학술 연구비 지원으로 수행되었음

본 논문에서 제안하는 직접확산-시간도약 초광대역(Direct Sequence-Time Hooping UWB : DS-TH UWB) 시스템은 매핑 장치에서 의사잡음 부호를 복수 개의 칩 단위로 묶어 특정 값으로 변환한 후, 이 특정 값의 정보에 대응하여 매핑 장치 내의 Lookup Table로부터 출력하는 타이밍 정보에 따라 (+)/(-) 펄스를 프레임 내에 위치시킨다. 결과적으로 기존의 시스템 보다 전력 스펙트럼의 억압도가 높고 평활한(smoothing) 특성을 갖는다.

본 논문에서는 제안하는 의사잡음 부호에 관하여 DS-TH UWB 시스템의 타당성을 확인하기 위해 확률 과정(stochastic process)을 이용하여 전력 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density : PSD)를 수치 계산하고, 그 결과를 모의실험과 비교한다.

### 2. DS-TH UWB 시스템의 신호 모델

본 논문에서 제안하는 DS-TH UWB 시스템의 송신부를 그림 1에 나타낸다. DS-TH UWB 시스템은 주기  $T$ 인 정보 신호와 부호 길이가  $N_f$ 인 제1의사잡음 부호를 연산하여 간격이  $T_f$ 인 제1부호화 신호를 발생시킨다. 제1부호화 신호는 제1의사잡음 부호에 의해서 불규칙한 패턴의 펄스열을 구성하게 된다. 여기서  $T_f$ 은 프레임 타임(Frame time),  $N_f$ 는 프레임 수이다.

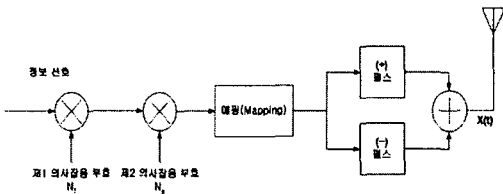


그림 1. DS-TH UWB 시스템의 송신부

제1부호화 신호는 다시 제2의사잡음 부호와 연산되어 제2부호화 신호를 발생시킨다. 제2부호화 신호는 제1부호화 신호를 복수 개의 펄스열로 변환시킨 것이다.

제2부호화 신호는 매핑 장치에 복수 개의 칩 단위로 입력되어 특정 값으로 변환된 후, 이 특정 값과 관련된 타이밍 정보를 저장하고 있는 Lookup Table의 신호와 비교 연산하고 (+)/(-) 펄스를 제1의사잡음 부호에 따라 구성된 프레임 내의 타임 슬롯(time slot)에 위치시킨다. 여기서 타임 슬롯의 수는 한 프레임이  $n$ 개의 칩으로 구성되면,  $2^n - 1 = N$ 개이다. 그림 2에 나타낸 것처럼 한 프레임이  $n$ 개의 칩이므로 타임 슬롯의 수는  $N$ 개이고, 타임 슬롯  $N$ 개 중에서  $0 \sim N/2 - 1$ 번째에 (+) 펄스,  $N/2 \sim N$ 번째에 (-) 펄스를 위치시킨다.

펄스 발생기에서 출력되는 펄스 신호는 안테나로 전송된다.

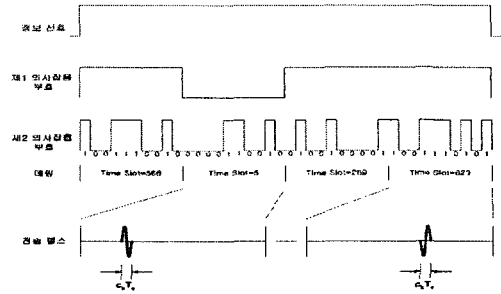


그림 2. DS-TH UWB 신호의 구성

위에서 언급한 것과 같은 초광대역 시스템의 전력 효율성은 시스템 설계에 있어 중요한 사항이므로 제안하는 DS-UWB 시스템의 전력 스펙트럼 특성을 구하기 위한 송신 신호  $x(t)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k w(t - kT_f - c_k T_c) \tag{1}$$

여기서  $\{a_k\}$ 와  $\{c_k\}$ 은 IID (Independent Identically Distributed) 랜덤 변수이며, 또한 정상(stationary)이고 배타적 독립 관계를 갖는다고 가정한다.  $\{a_k\}$ 는 의사잡음 부호에 의한 펄스의 진폭으로  $\{a_k\} \in (-1, 1)$ 이고,  $\{c_k\}$ 는  $k$ 번째 펄스에 대한 주기적인 시간도약 부호로서 최대 값이  $N_h$ 이라면  $0 \leq c_k < N_h$ 에서 정수 값을 갖는다.  $T_c$ 는 프레임 내의 타임 슬롯의 간격,  $T_f$ 는 의사잡음 부호의 간격으로 기존의 시스템에서 언급한 프레임 간격이라고 가정하면  $N_h T_c \leq T_f$ 이 성립한다. 그러므로 DS-UWB 신호의 전력 스펙트럼 밀도를 구하기 위하여 평균값이 0인 프로세서  $X(t)$ 를 다음과 같이 가정한다[1],[2],[4],[5].

$$X(t) = x(t) - \bar{x}(t) \tag{2}$$

여기서  $\bar{x}(t)$ 는  $x(t)$ 의 평균값이다.

$X(t)$ 의 상관 함수  $R_x(t, \tau)$ 는

$$R_x(t, \tau) = E\{X(t)X^*(t + \tau)\} \tag{3}$$

으로 정의되고,  $\tau$ 는 delay 이다.  $w(t)$ 는

$$w(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W(f) e^{j2\pi f t} df \tag{4}$$

이다. 여기서  $W(f)$ 는  $w(t)$ 을 푸리에 변환이다. 식(4)을 이용하여 식(3)을 전개하면,

$$R_X(t, \tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{k'=-\infty}^{\infty} \int_y \int_z K_{\beta}(k, k', -y, -z) W(y) W^*(z) \times e^{-j2\pi y k T_c} e^{j2\pi z k' T_c} e^{j2\pi(y-z)t} e^{-j2\pi z \tau} dy dz \quad (5)$$

이고  $K_{\beta}(k, k', -y, -z)$ 는

$$K_{\beta}(k, k', -y, -z) = [E\{a_k a_{k'}^*\} E\{e^{-j2\pi y c_i T_c} e^{j2\pi z c_i T_c}\} - E\{a_k\} E\{a_{k'}^*\} E\{e^{-j2\pi y c_i T_c}\} E\{e^{-j2\pi z c_i T_c}\}] \quad (6)$$

이다.

### 3. DS-TH UWB 시스템의 전력 스펙트럼 밀도

2장에서 송신신호  $x(t)$ 의 전력 스펙트럼 밀도를 구하기 위하여 상관 함수  $R_X(t, \tau)$ 을 유도하였다.  $R_X(t, \tau)$ 는 시간  $t$ 에 대한 주기 함수이므로 광의의 cyclostationary라 할 수 있다. 그러므로 DS-TH UWB 신호  $x(t)$ 의 전력 스펙트럼 밀도  $X_s(f)$ 는 연속 스펙트럼  $X_s^c(f)$ 와 불연속 스펙트럼  $X_s^d(f)$ 로 구성된다. 따라서 연속 스펙트럼  $X_s^c(f)$ 는 다음과 같이 정의된다[1], [2],[4],[5].

$$X_s^c(f) = \mathcal{F}_T \{ \langle R_X(t, \tau) \rangle \} \quad (7)$$

여기서  $\langle \cdot \rangle_t$ 는 시간 평균이며,  $\mathcal{F}_T \{ \cdot \}$ 는  $\tau$ 에 대한 푸리에 변환 연산자이다.  $\{a_k\}$ 와  $\{c_k\}$ 이 정상 확률 시퀀스라면,  $x(t)$ 의 전력 스펙트럼 밀도  $X_s(f)$ 에 대한 연속 스펙트럼  $X_s^c(f)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$X_s^c(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{k'=-\infty}^{\infty} \int_y K_{\beta}(k, k', -y, f) W(y) W^*(-f) \times e^{-j2\pi f(k-k')T_c} e^{-j2\pi(y+f)kT_c} \langle e^{j2\pi(y+f)\tau} \rangle dy \quad (8)$$

식(8)에서  $l = k - k'$ 이라 하고 포아송 (Poisson) 합 공식을 이용하여  $y$ 에 대해 적분하면 다음과 같다.

$$X_s^c(f) = \frac{1}{N_f T_f} |W(f)|^2 \times \begin{cases} \sum_{k=0}^{N_f-1} K_{\beta}(k, k', f, f), & l=0(k=k') \\ \sum_{k=0}^{N_f-1} \sum_{k'=0}^{N_f-1} K_{\beta}(k, k', f, f) e^{j2\pi(k-k')T_c}, & l \neq 0(k \neq k') \end{cases} \quad (9)$$

또한  $x(t)$ 의 불연속 스펙트럼  $X_s^d(f)$ 은 다음과 같

다.

$$X_s^d(f) = \mathcal{F}_f \{ \langle x(t) x^*(t+\tau) \rangle \} = \frac{1}{(N_f T_f)^2} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left| W\left(\frac{i}{N_f T_f}\right) \right|^2 \sum_{k=0}^{N_f-1} E\{a_k\} \times E\left\{ e^{-j2\pi \frac{i}{N_f T_f} c_i T_c} \right\} e^{-j2\pi \frac{i}{N_f T_f} k T_c} \delta\left(f - \frac{i}{N_f T_f}\right) \quad (10)$$

연속 스펙트럼에 대한 식(9)와 불연속 스펙트럼에 대한 식(10)을 구하기 위해  $\{a_k\}$ 의 확률분포  $\Pr\{a_k\}$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$\Pr\{a_k\} = \begin{cases} p, & a_k = -1 \\ 1-p, & a_k = +1 \end{cases} \quad (11)$$

여기서  $p$ 는 천이 확률 (transition probability)이다. 또한  $\{c_k\}$ 의 확률분포는

$$\Pr\{c_k = m\} = \begin{cases} p_m, & 0 \leq m < N_h \\ 0, & \text{기타} \end{cases} \quad (12)$$

인 IID 랜덤 변수라고 가정한다.

식(11)과 식(12)를 이용하여  $\{a_k\}$ 와  $\{c_k\}$ 의 평균 및 상관 함수를 구하면 다음과 같다.

$$E\{a_k\} = \bar{a}_k = 2p - 1 \quad (13)$$

$$E\{a_k a_{k'}^*\} = \begin{cases} 1, & k = k' \\ (2p-1)^2, & k \neq k' \end{cases} \quad (14)$$

$$E\{e^{j2\pi c_i T_c}\} = \sum_{m=0}^{N_h-1} p_m e^{j2\pi f m T_c} \quad (15)$$

$$E\{e^{j2\pi c_i T_c} e^{-j2\pi c_i T_c}\} = \left| \sum_{m=0}^{N_h-1} p_m e^{j2\pi f m T_c} \right|^2 \quad (16)$$

식(13)~식(16)을 식(6)에 대입하면 다음과 같다.

$$K_{\beta}(k, k', f, f) = \begin{cases} 1 - (2p-1)^2 \left| \sum_{m=0}^{N_h-1} p_m e^{j2\pi f m T_c} \right|^2, & k = k' \\ 0, & k \neq k' \end{cases} \quad (17)$$

식(17)을 식(9)에 대입하면  $k \neq k'$ 에 대한 항은 제거되고  $k = k'$ 에 대한 항만 존재하므로 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_s^c(f) &= \frac{1}{N_f T_f} |W(f)|^2 \\
 &\times \begin{cases} \sum_{m=0}^{N_f-1} [1 - (2p-1)^2] \left| \sum_{l=0}^{N_f-1} p_m e^{j2\pi l m T_f} \right|^2, & l=0(k=k') \\ 0, & l \neq 0(k \neq k') \end{cases} \\
 &= \frac{1}{T_f} |W(f)|^2 [1 - (2p-1)^2] \left| \sum_{m=0}^{N_f-1} p_m e^{j2\pi m T_f} \right|^2 \quad (18)
 \end{aligned}$$

또한 식(10)에 식(13)을 대입하면 불연속 스펙트럼은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_s^d(f) &= \frac{(2p-1)^2}{T_f^2} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left| W\left(\frac{i}{N_f T_f}\right) \right|^2 \\
 &\times \left| \sum_{m=0}^{N_f-1} p_m e^{j2\pi m \frac{i}{N_f T_f} T_f} \right|^2 \delta\left(f - \frac{i}{N_f T_f}\right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

만약  $\{a_k\} \in \{-1, 1\}$ 인 경우, 식(13)의 천이 확률은 0.5가 되므로 식(19)의 연속 스펙트럼은 다음과 같다.

$$X_s^c(f) = \frac{1}{T_f} |W(f)|^2 \quad (20)$$

위 식에서 시간도약 부호  $\{c_k\}$ 에 대한 연속 스펙트럼의 영향은 무시할 수 있다. 그러므로 고속의 시간도약 부호를 이용하지 않고서도 에너지 스파크 현상을 억압할 수 있음을 알 수 있다. 또한 식(20)에서 불연속 스펙트럼은 0이 된다는 것을 알 수 있다[6],[7].

### 4. 모의실험

본 논문의 펄스신호  $w(t, \tau_n)$ 은 다음과 같다.

$$w(t, \tau_n) = 2\sqrt{e}A \frac{t}{\tau_n} e^{-2\left(\frac{t}{\tau_n}\right)^2} \quad (21)$$

여기서 A는 펄스의 진폭이며, A=1이라고 가정한다.  $\tau_n$ 은 펄스의 폭을 결정하는 파라미터이다. 식(21)의 펄스 파형을 그림 3에 나타내며, 전력 스펙트럼을 그림 4에 나타낸다.

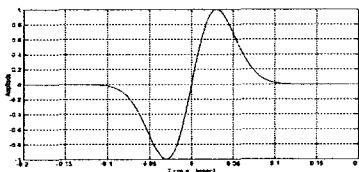


그림 3. UWB 신호의 펄스 파형

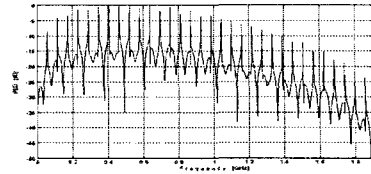
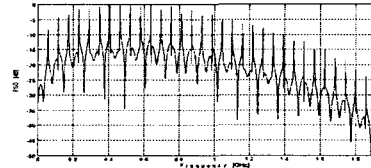
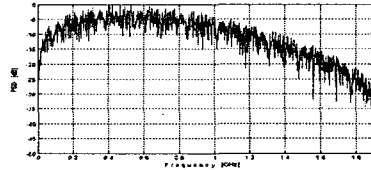


그림 4. 연속 스펙트럼  $X_s^c(f)$

그림 5 (a)는 규칙적인 프레임 간격에 따른 에너지 스파크 현상이 연속 스펙트럼 형태로 나타나며 그림 5 (b)는 에너지 스파크 현상을 억압하기 위하여 시간도약 부호만을 이용한 TH-UWB 신호의 전력 스펙트럼을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 5. 규칙적인 펄스 프레임에 따른 UWB 시스템의 전력 스펙트럼 밀도

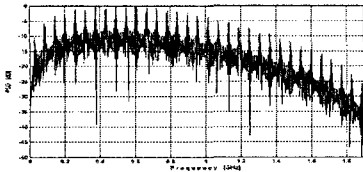
식(21)에 의해 얻어진 그림 4의 전력 스펙트럼 결과를 검증하기 위하여 모의실험에 관한 의사잡음 부호는 최장 부호 계열로 길이  $N_f$ 를 64라고 가정한다. 원시 다항식은 다음과 같다[8],[9].

$$g(x) = 1 + x + x^2 + x^5 + x^6 \quad (22)$$

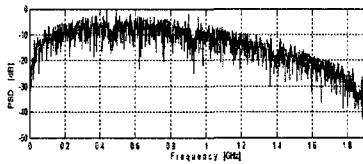
그림 6 (a)는 DS-UWB 신호이고 (b)는 DS-TH UWB 신호의 전력 스펙트럼 밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 그림 6 (a)의 전력 스펙트럼 특성은 그림 4의 특성과 완벽하게 일치하지 않는다. 이는 의사잡음 부호가 완벽하게 랜덤 한 형태가 아닌 어느 정도 주기성을 유지하기 때문이다. 그러나 그림 5 (a)와 달리 에너지 스파크 현상이 크게 억압되어 연속 스펙트럼 형태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

그림 7 (a)는 Walsh 부호를 이용한 DS-UWB 신호의 전력 스펙트럼이며 Walsh 부호는 직교 (Orthogonal) 특성이 우수하지만 랜덤 한 특성이 약하

므로 그림 6 (a)의 특성처럼 에너지 스파크 현상이 크게 억압 되지 못함을 알 수 있다. 그러나, 그림 7 (b)는 DS-TH UWB 신호의 전력 스펙트럼으로서 시간도약 부호를 함께 적용하면 이러한 현상이 억압됨을 알 수 있다.

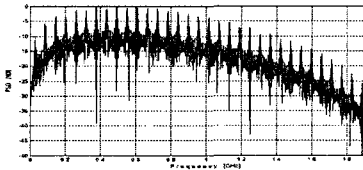


(a)

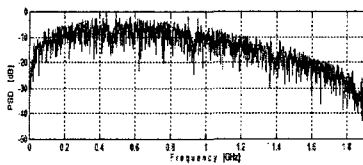


(b)

그림 6. DS-UWB 신호와 DS-TH UWB 신호의 전력 스펙트럼 밀도



(a)



(b)

그림 7. Walsh 부호를 이용한 DS-UWB 신호와 DS-TH UWB 신호의 전력 스펙트럼 밀도

### 5. 결론

기존의 초광대역 시스템은 에너지 스파크 현상을 제거하고 평활한 전력 스펙트럼 특성을 갖기 위하여 시간도약 부호를 이용하며, 고속 시간도약을 하면 매우 평활한 전력 스펙트럼 특성을 형성할 수 있지만 이는 시스템 구성을 제한하는 요인으로 작용할 것이다.

제안된 DS-TH UWB 시스템의 수치 계산과 모의실험을 분석하면 의사잡음 부호에 의하여 에너지 스파크

현상이 발생되지 않음을 알 수 있다. 이는 의사잡음 부호에 의하여 펄스열의 불규칙한 패턴과 신호의 대칭성 때문에 에너지 스파크 현상이 발생하지 않으면서 매우 평활한 전력 스펙트럼이 형성된다.

결론적으로 DS-TH UWB 시스템의 의사잡음 부호로 펄스열을 구성하고 펄스 신호의 대칭성을 부여한다면, 기존의 단일 펄스 초광대역 시스템에서 이용하고 있는 고속의 시간도약 부호를 적용하지 않더라도 평활한 전력 스펙트럼을 형성할 수 있어 초광대역 시스템 구성을 보다 쉽게 할 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] 이 정석, Antipodal 초광대역 통신 시스템에 관한 연구, 한국항공대학교 항공전자공학과 박사학위논문, 2002. 8.
- [2] 이 정석, 김 유창의 3인, "초광대역 통신 시스템의 전력 스펙트럼 밀도 분석", 대한전자공학회, 38권, 10호, pp. 34-40, 2001. 10.
- [3] M. L. Welborn, "System considerations for ultra-wideband wireless networks", IEEE Radio and Wireless Conf., pp. 5-8, 2001
- [4] M. Z. Win, "Spectral Density of Random Time-Hopping Spread-Spectrum UWB Signals with Uniform Timing Jitter", IEEE MILCOM Conf., vol. 2, pp. 1196-1200, 1999.
- [5] M. Z. Win, "On the Power Spectral Density of Digital Pulse Streams Generated by M-ary Cyclostationary Sequences in the Presence of Stationary Timing Jitter", IEEE Trans. Communication, vol. 46, pp. 1135-1145, Sept. 1998.
- [6] J. T. Conroy, J. L. LoCierro, D. R. Ucci, "Communication Techniques Using Monopulse Waveforms", IEEE MILCOM Conf., vol. 2, pp. 1181-1185, 1999.
- [7] J. G. Proakis, Digital Communications, McGraw Hill, 2001.
- [8] R.L. Peterson, R.E. Ziener, D.E. Borth, Introduction to Spread Spectrum Communication, Prentice Hall, 1995.
- [9] S. G. Wilson, Digital Modulation and Coding, Prentice Hall, 1996.



**김영철**

1993년 2월 동신대학교 정보통신공학과 공학사  
1995년 2월 동신대학교 대학원 전자공학과 공학석사  
2002년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 공학박사

2000년 8월 - 2004년 3월 인하공업전문대학 정보통신과 초빙교수

2004년 2월 - 현재 한국정보통신기능대학 방송통신설비과 전임강사

주 관심분야 : 무선인터넷, UWB, 디지털방송기술



**이정석**

1987년 2월 한국항공대학교 항공전자공학과 공학사  
1991년 2월 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 공학석사  
2002년 8월 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과 공학박사

2003년 9월 - 2004년 10월 인하대학교 UWB-ITRC 전임연구원

2004년 11월 - 현재 삼성전기 중앙연구소 RF LAB 책임연구원

관심분야 : UWB, SDR, Cognitive Radio



**강택근**

1985년 8월 서울산업대학교 전자공학과 공학사  
1988년 8월 연세대학교 공학대학원 전자공학전공 공학석사  
2004년 2월 중부대학교 대학원 명예공학박사

2001년 1월 정보통신부 중앙전파관리소장

2003년 2월 정보통신부 전남체신청장

2003년 5월 - 현재 한국정보통신기능대학 초대학장

관심분야 : 전파·방송 정책, 주파수자원관리기술, 전자파 인체 보호