

논문 2010-47TC-8-12

# 주파수 도약 확산 스펙트럼 시스템의 블라인드 도약 시간 및 주기 추정 알고리즘

(Blind Estimation of Hop Timing and Duration of FHSS Systems)

이 희 수\*, 박 효 배\*, 강 동 훈\*, 박 철 순\*\*, 오 왕 록\*\*

(Huisoo Lee, Hyobae Park, Donghoon Kang, Cheolsun Park, and Wangrok Oh)

## 요 약

본 논문에서는 디지털 주파수 판별기 (digital frequency discriminator)와 웨이블릿 변환 (wavelet transform)을 이용한 주파수 도약 확산 스펙트럼 시스템 (frequency hopping spread spectrum systems) 신호의 도약 시간 (hop timing)과 도약 주기 (hop duration)를 블라인드 (blind)로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 기존에 제안된 시간 상관함수 (temporal correlation function) 기반 도약 시간 추정 알고리즘에 비하여 구현 복잡도가 낮을 뿐만 아니라 추정 성능이 우수하다.

## Abstract

In this paper, a blind hop timing and duration estimation scheme for FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) systems based on digital frequency discriminator and wavelet transform is proposed. The proposed scheme not only requires the lower hardware complexity but also shows superior estimation performance compared to the previously proposed temporal correlation function based hop timing estimation scheme.

**Keywords :** FHSS systems, hop timing, hop duration

## I. 서 론

확산 스펙트럼 (spread spectrum) 통신 방식은 군용 및 상용 목적으로 많은 주목을 받고 있는 통신 방식으로 크게 주파수 도약 확산 스펙트럼 (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) 방식과 직접 시퀀스 확산 스펙트럼 (Direct Sequence Spread Spectrum) 방식으로 나눌 수 있다. FHSS 통신 시스템 관련 연구들은 주로 재밍 (jamming)에 대한 효율적 대응에 대한 내용이 연구의 주를 이루었으나 최근에는 FHSS 신호를 방탐하기 위한 블라인드 (blind) 시스템 파라미터 추

정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1-3]</sup>. FHSS 시스템 신호의 방탐을 위해서는 블라인드 시스템 파라미터 추정이 필요하나 기존의 추정 알고리즘들은 준 블라인드 (semi-blind) 추정 알고리즘이거나 하드웨어 구현 복잡도가 높은 상관함수 (correlation function) 및 우도 함수 (likelihood function) 등을 이용한 추정 알고리즘으로 실시간 추정이 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 구현 복잡도가 낮은 디지털 주파수 판별기 (digital frequency discriminator)와 웨이블릿 변환 (wavelet transform)을 이용한 FHSS/MFSK (M-ary Frequency Shift Keying) 시스템의 도약 시간과 도약 주기를 블라인드로 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 기존에 제안된 시간 상관함수 (Temporal Correlation Function, TCF) 기반 도약 시간 추정 알고리즘에 비하여 하드웨어 구현 복잡도가 낮을 뿐만 아니라 FHSS 시스템의 도약 시간과 도약 주기를

\* 학생회원, \*\* 정회원-교신저자, 충남대학교  
(Department of Electronics and Computer  
Engineering, Chungnam National University)

\*\*\* 정회원, 국방과학연구소  
(ADD)

접수일자: 2010년4월7일, 수정완료일: 2010년8월13일

실시간으로 추정할 수 있으며 기존의 알고리즘보다 보다 높은 추정 정밀도를 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 본 논문에서 고려한 FHSS/MFSK 시스템 모델을 제시하고 도약 시간 및 도약 주기 추정을 위한 알고리즘을 제안하였으며 III장에서 결론을 맺는다.

## II. 본 론

### 1. 시스템 모델

본 논문에서 고려한 FHSS/MFSK 통신 시스템의 구조는 그림 1과 같다. FHSS/MFSK 통신 시스템은 할당되어 있는 주파수 대역에서 의사 잡음 코드 (pseudo random noise code)에 의해 선정된 패턴으로 주파수를 도약하며 데이터를 송수신하여 전파간섭 저항성 (interference immunity)을 가진다.

일반적으로 FHSS 시스템의 신호를 수신하기 위해서는 시스템의 주파수 도약율 (hopping rate), 도약 주파수대역 (hopping bandwidth), 도약 시간 (hop timing) 및 도약 패턴 (hopping pattern) 등과 같은 시스템 파라미터들에 대한 사전 정보가 반드시 필요하다. 따라서 FHSS 시스템의 신호를 방탐하기 위해서는 해당 시스템의 주요 파라미터에 대한 추정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 FHSS 시스템의 여러 파라미터들 중 도약 시간과 도약 주기를 블라인드로 추정하는 알고리즘을 제안한다.

### 2. 추정 알고리즘

제안하는 추정 알고리즘은 디지털 주파수 판별기와 웨이블릿 변환기로 이루어져 있으며 그 구조는 그림 2와 같다. 그림 2에서 FHSS/MFSK 시스템의 수신 신호,  $y_k$ 는 식 (1)과 같으며

$$y_k = A_k e^{j2\pi f_k T_s} + n_k, \text{ where } k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

여기에서  $A_k$ 는  $k$  번째 수신 신호의 크기,  $f_j$ 는 도약 주파수의 집합,  $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 에서 의사 잡음 코드에 의해 선택된  $j$  번째 도약 주파수이다. 그리고  $T_s$ 는 수신 신호의 표본화 (sampling) 주기이고  $n_k$ 는  $k$  번째 평균이 0이고 차원 당 분산이  $N_0/2$ 인 복소 (complex) 가산성 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 샘플 (sample)이다.

그림 2에서와 같이 수신 신호,  $y_k$ 는 전체 도약 주파수대역을 통과대역으로 갖는 컷 번째 저역 통과 여파기 (Low-Pass Filter, LPF)를 거쳐 디지털 주파수 판별기로 입력된다. 하드웨어 구현 복잡도가 낮은 디지털 주파수 판별기는 수신 신호의 주파수를 검출할 수 있으며 [4] 그 구조는 그림 3과 같다.

그림 3에서  $x_k^{re}$  과  $x_k^{im}$ 는 입력신호,  $x_k$ 의 실수부와 허수부를 나타내며  $r$ 은 지연 (delay) 계수이다. 제안하는 알고리즘은  $r$  값에 따라 주파수 검출에 사용되는 입력 신호 샘플들의 간격이 변하게 된다.  $r$ 을 다르게 설정하

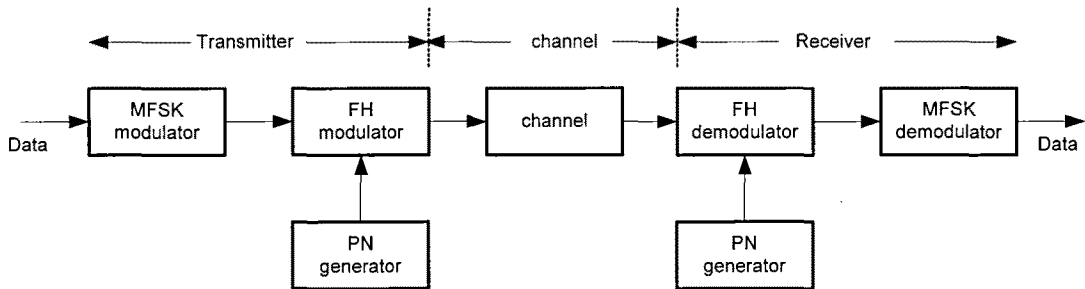


그림 1. 시스템 모델: FHSS/MFSK 시스템  
Fig. 1. System model: FHSS/MFSK system.

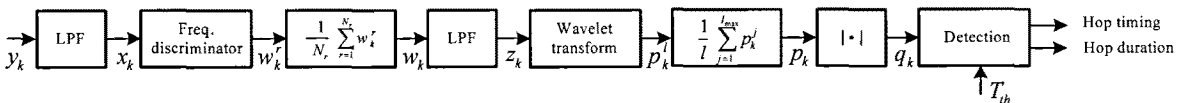


그림 2. 추정기의 블록다이어그램  
Fig. 2. Block diagram of the estimator.

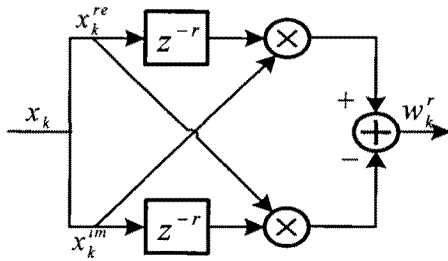


그림 3. 디지털 주파수 판별기  
Fig. 3. Digital frequency discriminator.

여 얻어진 다수개의 주파수 추정치,  $w_k^r$ 의  $r$ 에 대한 평균값을 취함으로써 잡음 성능이 개선된 주파수 추정치를 얻을 수 있으며 이는 식 (2)와 같다.

$$w_k = \frac{1}{N_r} \sum_{r=1}^{N_r} w_k^r, \text{ where } r = 1, 2, \dots, N_r \quad (2)$$

여기에서  $N_r$ 은  $r$ 을 달리한  $w_k^r$ 의 개수로  $N_r$ 을 이용하여 하드웨어 구현 복잡도와 주파수 추정치의 잡음 성능 간 적절 점을 설정할 수 있다.

주파수 추정치,  $w_k$ 는 도약 주파수대역 (hopping bandwidth)을 통과대역으로 갖는 두 번째 저역 통과 여파기를 통과하여 웨이블릿 변환기로 입력된다. 여기에서 웨이블릿 변환은 푸리에 변환 (fourier transform)과 유사하게 기저함수 (basis function)들의 집합으로 신호를 분해하여 표현하는 기법으로 척도 함수 (scaling function)를 통하여 시간/주파수 분해능을 적절히 조절할 수 있는 특징이 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 웨이블릿 변환의 특징으로 두 번째 저역 통과 여파 결과 신호의 불연속점을 효과적으로 검출할 수 있다.

제안하는 알고리즘에서는 웨이블릿 변환 중 하드웨어 구현 복잡도가 낮은 Haar 웨이블릿 변환을 사용하였으며 이때 모 함수 (mother function)와 척도 함수는 각각 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$\psi(k, l) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k < (10+2l)/2 \\ -1, & (10+2l)/2 \leq k < (10+2l) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

where  $l = 0, 1, 2, \dots, l_{\max}$

$$\varphi(k, l) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k < (10+2l) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

where  $l = 0, 1, 2, \dots, l_{\max}$

여기에서  $l$ 은 시간/주파수 분해능을 조절하는 파라미터

이고  $k$ 는 샘플 인덱스 (sample-index)이며 이를 통한 웨이블릿 변환의 출력신호,  $p_k^l$ 은 식 (5)와 같다.

$$p_k^l = \sum_{\lambda=0}^{\infty} z_{\lambda} \psi(k-\lambda, l) \text{ where } l = 0, 1, \dots, l_{\max} \quad (5)$$

식 (5)에서  $l_{\max} = 0$ 으로 설정하면 하드웨어 구현 복잡도를 효율적으로 낮출 수 있으며  $l_{\max} > 0$ 인 경우 하드웨어 구현 복잡도는 증가하지만 다양한 분해능을 가진  $p_k^l$ 로부터 추정기의 추정 성능을 향상시킬 수 있다. 추정 성능을 향상시키기 위한  $\tilde{p}_k$ 는  $p_k^l$ 에서  $l$ 에 대한 합을 취하여 구하며 이는 식 (6)과 같다.

$$\tilde{p}_k = \sum_{j=0}^{l_{\max}} p_k^{l=j} \quad (6)$$

웨이블릿 변환 출력 신호,  $\tilde{p}_k$ 는 절대 값 블록을 통과하여 식 (7)과 같이  $q_k$ 로 변환되며

$$q_k = |\tilde{p}_k| \quad (7)$$

이와 같이 얻어진  $q_k$ 는 그림 4와 같다. 이때 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)는 12 dB이고  $l_{\max} = 0$ 이다. 그림 4에서 각 도약 시간에서의 첨두치를 확인할 수 있는데 관측 시간 내에 첨두치 중 최대값을 갖는 샘플 인덱스 (sample index) 값으로부터 도약 시간을 추정하며 임계값,  $T_{th}$ 를 초과하는 첨두치의 샘플 인덱스 간의 간격을 통하여 도약 주기를 추정한다.

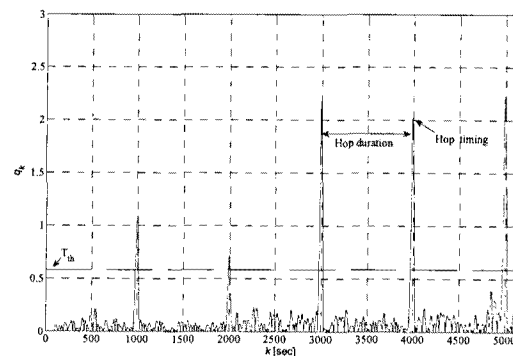


그림 4. 웨이블릿 변환 출력의 절대 값,  $q_k$  (SNR = 12 dB)

Fig. 4.  $q_k$ , The absolute value of the wavelet transform.

### 3. 전산 실험

제안하는 추정 알고리즘의 추정 성능을 확인하기 위한 FHSS/MFSK 시스템의 주요 파라미터들은 표 1과

표 1. 전산 시뮬레이터의 주요 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

Parameter	Specification
Modulation	BFSK
Bit rate	1 Mbps
Hopping rate	1 Mhops/sec
Hopping bandwidth	2 MHz
Channel bandwidth	64 MHz
# of hopping slot	32

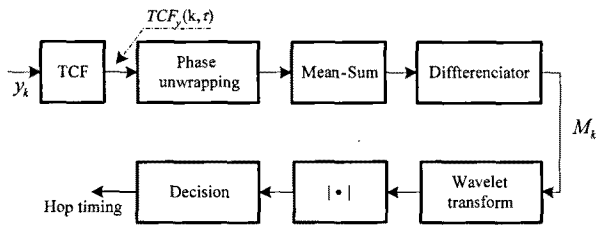


그림 5. TCF를 이용한 추정 알고리즘의 블록다이아그램

Fig. 5. Block diagram of a TCF based estimation algorithm.

같다. 본 논문에서는 블라인드 도약 시간 추정 알고리즘 기법 중 하나인 시간 상관함수 (Temporal Correlation Function, TCF)를 이용한 추정 알고리즘<sup>[6]</sup>과 본 논문에서 제안하는 추정 기법 간의 추정 성능을 비교하였다.

TCF를 이용한 도약 시간 추정 알고리즘은 블라인드 도약 시간 추정 알고리즘 중 비교적 하드웨어 구현 복잡도가 낮은 것으로 알려져 있으며 그 구조는 그림 5와 같다.

그림 5에서 FHSS/MFSK 수신 신호,  $y_k$ 에 대한 TCF 블록의 출력,  $TCF_y(k, \tau)$ 는 식 (8)과 같이 정의되고

$$TCF_y(k, \tau) = y\left(k + \frac{\tau}{2}\right) y^*\left(k - \frac{\tau}{2}\right) \quad (8)$$

여기에서  $k$ 는 TCF의 중심 샘플 인덱스 (center sample-index),  $\tau$ 는 지연 시간 (lag-time)을 각각 나타내며  $y^*$ 는  $y$ 의 켈레복소수이다. 식 (8)과 같은  $TCF_y(k, \tau)$ 의 위상을  $v_k^r$ 라 하면 위상 연속화 블록 (phase unwrapping block)의 출력,  $\tilde{v}_k^r$ 는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\tilde{v}_k^r = \begin{cases} v_k^r, & \text{if } |v_k^r - v_{k-1}^r| \leq \pi \\ v_k^r + 2\pi, & \text{if } v_k^r - v_{k-1}^r < -\pi \\ v_k^r - 2\pi, & \text{if } v_k^r - v_{k-1}^r > \pi \end{cases} \quad (9)$$

이러한  $\tilde{v}_k^r$ 는  $\tau$ 에 대한 평균값을 취하며 이는 식 (10)과 같다.

$$M_k = \frac{1}{\gamma} \sum_{i=0}^{\gamma} v_k^{\tau=i} \quad (10)$$

여기에서  $\gamma$ 는  $\tau$ 의 범위를 한정하는 파라미터로  $\gamma$ 를 크게 설정하면 추정 성능이 향상되나 하드웨어 구현 복잡도가 지수함수 적으로 증가하고 실시간 추정이 어려워진다. 식 (10)의  $M_k$ 는 미분기를 통과하고 웨이블릿 변환을 통하여 불연속점으로 도약 시간을 검출한다. 여기에서 웨이블릿 변환은 제안하는 알고리즘과 동일한 식 (3) 및 (4)의 Haar 웨이블릿을 사용한다.

제안하는 알고리즘은 기존의 추정 알고리즘의 TCF, 위상 연속화 블록 그리고 미분기를 그림 3의 디지털 주파수 판별기로 단일화시켜 하드웨어 구현 복잡도를 효율적으로 낮출 수 있다.

두 알고리즘의 추정 성능 비교를 위하여 각 알고리즘의 하드웨어 구현 복잡도를 다음과 같이 제한하였다. 먼저 TCF 기반 추정 알고리즘은 식 (10)의  $\gamma=128$ 로 설정하여 일반적인 시스템의 동작 신호대잡음비 영역에서 도약 시간 추정이 가능하게 설정하였고 제안하는 알고리즘의 경우  $N_r=1, l_{max}=0$ 으로 설정하여 하드웨어 구현 복잡도가 가장 낮은 경우를 가정하였다. 이와 같이 설정한 두 추정 기법의 추정 성능은 그림 6과 같고 이때 허용 오차가 각각 1%와 2%인 경우의 도약 시간 검출 확률을 확인하였다.

그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이 검출 확률 0.7을 고려할 경우 제안하는 알고리즘은 TCF 기반 기법에

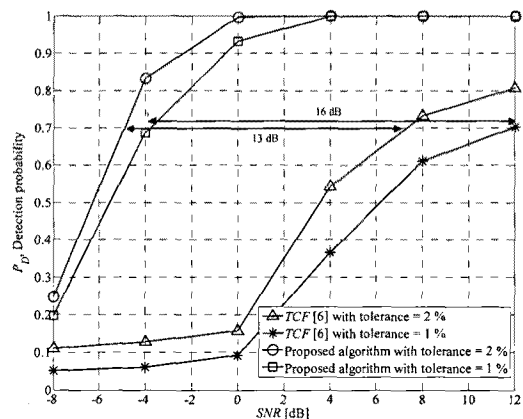


그림 6. 신호대잡음비에 따른 도약 시간 검출 확률  
Fig. 6. Detection probability of hop timing versus SNR.

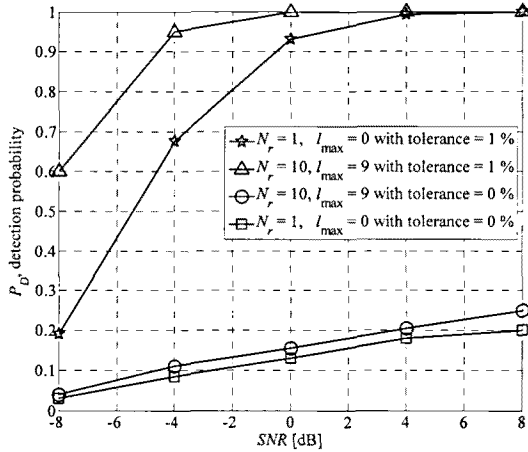


그림 7. 제안하는 알고리즘의 도약 시간 검출 확률  
Fig. 7. Hop timing detection probability of proposed algorithm.

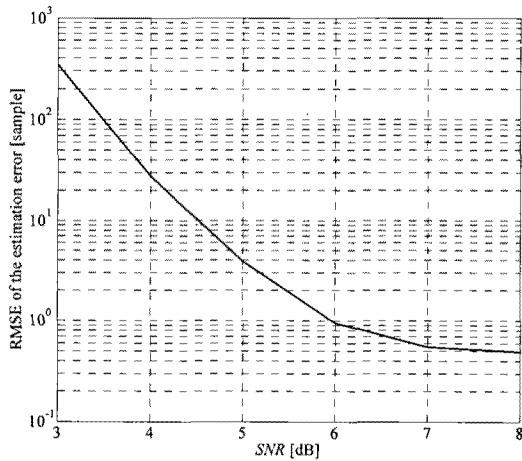


그림 8. 추정된 도약 시간의 RMSE  
Fig. 8. RMSE of the estimated hop duration.

비하여 허용 오차가 1 % 및 2 %인 경우 각각 16 dB 및 13 dB의 신호대잡음비 이득이 있다. 제안하는 알고리즘의 구현 복잡도를 달리하였을 경우의 성능을 확인하기 위하여  $N_r$ 과  $l_{max}$ 를 변화시키면서 제안하는 알고리즘의 성능을 확인하였으며 그 결과는 그림 7과 같다.

그림 7은 식 (2)와 식 (6)의  $N_r = 1, l_{max} = 0$ 으로 설정한 경우와  $N_r = 10$  및  $l_{max} = 9$ 로 설정하였을 때의 검출 확률로 오차는 각각 0 % 와 1 %인 경우이다.  $N_r = 10$  및  $l_{max} = 9$ 으로 설정하였을 경우 하드웨어 구현 복잡도가 가장 낮은 경우에 비하여 구현 복잡도는 증가하지만 추정기의 도약 시간 검출 확률을 향상시킬 수 있음을 확인 할 수 있다.

도약 주기의 추정 성능을 확인하기 위하여  $T_{th} = 1.5$ 로 설정하여 전산 실험을 수행 하였으며 그 결과는 그림 8과 같다. 여기에서 추정 성능의 척도는 추정한 도약 주기 오차의 제곱근 평균 (Root Mean Square Error, RMSE)으로 삼았다.

그림 8에서 살펴 볼 수 있는 바와 같이 제안하는 알고리즘은 일반적인 시스템의 동작 신호대잡음비 영역에서 추정 도약 시간의 오차제곱근 평균이 1 (샘플) 이하로 수렴하는 것을 확인할 수 있으며 도약 주기 추정 성능은 검출에 사용하는 임계값 최적화를 통하여 개선할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 하드웨어 구현 복잡도가 낮은 주파수 판별기와 웨이블릿 변환을 이용한 FHSS/MFSK 시스템의 도약 시간과 도약 주기를 블라인드로 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 추정 알고리즘 중 비교적 하드웨어 구현 복잡도가 낮은 TCF 기반 도약 시간 추정 알고리즘과의 성능 비교를 통하여 제안하는 알고리즘이 복잡도가 낮을 뿐만 아니라 추정 성능이 우수함을 확인하였다. 또한 디지털 주파수 판별기의  $N_r$ 과 웨이블릿 변환의  $l_{max}$ 의 설정을 통하여 추정 알고리즘의 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. K. Simon, U. Cheng, L. Aydin, A. Polydoros, "Hop timing estimation for noncoherent frequency-hopped M-FSK intercept receivers," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2-4, pp. 1144-1154, Feb.-Apr. 1995.
- [2] C. D. Chung, "Generalised likelihood-ratio detection of multiple-hop frequency-hopping signals," *IEE Proc. Commun.*, vol. 141, no. 2, pp. 527 - 531, Apr. 1994.
- [3] C. C. Ko, W. Zhi, and F. Chi, "ML-based frequency estimation and synchronization of frequency hopping signals," *IEEE Trans. Signal. Process.*, vol. 53, pp. 403-410, Feb. 2005.
- [4] F. G. A. Coupe, "Digital frequency discriminator," *Electron. Lett.*, vol. 12, no. 16, pp. 489-490, 1979
- [5] C. Burrus, R. Gopinath, and H. Guo, "Wavelets and Wavelet transforms : A Primer," Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998

- [6] Y. P. Cheng, "Detection of frequency hopped signals timing information using the temporal correlation function," MSEE Thesis, Naval Postgraduate School, Sept. 2008.

---

 저 자 소 개
 

---



이 희 수(학생회원)  
 2008년 충남대학교 전기정보통신  
 공학부 학사  
 2010년 충남대학교 전자전과정보  
 통신공학과 석사  
 <주관심분야 : 이동통신 시스템,  
 STBC, 재밍 알고리즘>



강 동 훈(학생회원)  
 2009년 충남대학교 전기정보통신  
 공학부 학사  
 2009년~현재 충남대학교 전자  
 전과정보통신공학과  
 석사과정

<주관심분야 : 채널 코딩, STBC, 이동통신 시스  
 템>



박 효 배(학생회원)  
 2009년 충남대학교 전기정보통신  
 공학부 학사  
 2009년~현재 충남대학교 전자  
 전과정보통신공학과  
 석사과정

<주관심분야 : 이동통신 시스템, UWB 시스템,  
 협력 통신>



박 철 순(정회원)  
 1989년 경기대학교 전자계산학과  
 학사  
 1991년 인하대학교 전자계산  
 공학과 석사  
 1991년~현재 국방과학연구소  
 선임연구원

1997년 전자계산 조직응용 기술사  
 2007년 충남대학교 정보통신공학과 박사  
 <주관심분야 : 신호처리, 통신응용>



오 왕 록(정회원)-교신저자  
 1994년 포항공과대학교 전자전기  
 공학과 학사  
 1997년 포항공과대학교 정보통신  
 공학과 석사  
 2003년 포항공과대학교 전자전기  
 공학과 박사

1994년~1995년 스탠더드텔레콤 연구원  
 2003년~2006년 포항공과대학교 정보통신연구소  
 전임연구원

2006년~현재 충남대학교 전기정보통신공학  
 조교수

<주관심분야 : 터보 코드, MIMO 시스템, 유무선  
 디지털 통신>