

# OFDM 기반 시스템에서 효율적인 정수 주파수 오프셋 추정 기법

최 명 수\*, 이 영 윤\*\*, 송 익 호\*\*\*, 정 민 아\*\*\*\*

## An Efficient Integer Frequency Offset Estimation Method for OFDM-Based Systems

Myeong-Soo Choi\*, Youngyoon Lee\*\*, Ickho Song\*\*\*, Min-A Jung\*\*\*\*

### 요 약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기반 지상 파 디지털 비디오 방송 (digital video broadcasting-terrestrial: DVB-T) 시스템에서 파일럿을 이용하여 정수 주파수 오프셋을 (integer frequency offset: IFO) 추정하는 새로운 기법을 제안한다. 기존 기법은 IFO를 추정하는데 사용되는 파일럿의 채널응답이 빠르게 변한다는 가정 하에, 파일럿이 제공하는 조합 정보 중 일부분만 이용하여 IFO를 추정한다. 본 논문에서는 IFO 추정 성능을 향상 시킬 수 있도록 파일럿이 제공하는 부가적인 조합 정보를 이용하여 IFO를 추정하는 효율적인 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안한 기법의 IFO 추정 성능이 기존 기법보다 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

### ABSTRACT

This paper proposes a novel method for pilot-aided integer frequency offset (IFO) estimation in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-based digital video broadcasting-terrestrial (DVB-T) systems. The conventional method proposed for estimating the IFO uses only partial information of combinations that pilots can provide, which stems from a rigorous assumption that the channel responses of pilots used for estimating the IFO change very rapidly. In this paper, we propose an efficient IFO estimation method exploiting additional information of combinations that pilots can provide to improve the performance of the IFO estimation. The simulation results show that the proposed method outperforms the conventional method in terms of the IFO detection probability.

**Keywords:** Digital video broadcasting-terrestrial (DVB-T), Estimation, Integer frequency offset (IFO), Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), Pilot

\* 목포대 ITRC연구센터 (해양텔레매틱스 기술개발센터) (mschoi@mokpo.ac.kr),

\*\* 성균관대학교 정보통신공학부 (news8876@skku.edu)

\*\*\* 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (i.song@ieee.org),

\*\*\*\* 교신저자 목포대학교 정보공학부 (majung@mokpo.ac.kr)

접수일자: 2010년 1월 8일, 수정일자: 2010년 2월 26일, 심사완료일자: 2010년 3월 19일

## I. 서론

직교 주파수 분할 다중 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 방식은 다중 경로 페이딩에 강인하고 스펙트럼을 효율적으로 사용한다는 장점 때문에 디지털 비디오 방송 (digital video broadcasting: DVB), 무선랜 (wireless local area networks: WLANs) 등의 시스템에서 표준 변조 방식으로 널리 사용되고 있다 [1], [2].

그러나 OFDM 시스템의 성능은 송수신단 사이의 상대적인 속도에 의해 생기는 도플러 이동 및 송수신단 발진기 동작 불일치로 인해 발생하는 주파수 오프셋에 (frequency offset: FO) 매우 민감하다 [3]. FO는 OFDM 심볼의 부반송파 간격으로 정규화 된 후 크기에 따라 정수 FO와 (integer FO: IFO) 소수 FO로 (fractional FO: FFO) 나눌 수 있다. 데이터 심볼 복조 전에 FO가 정확하게 추정되고 보상되지 않으면 IFO는 고속 푸리에 변환을 (fast Fourier transform: FFT) 통해 복조된 OFDM 심볼의 부반송파 색인의 순환 이동을 초래한다. 그리고 FFO는 부반송파 간 직교성을 잃게 함으로써 FFT 후 부반송파 간 간섭을 일으킨다 [3]. 따라서 OFDM 기반 시스템에서 FO 추정은 매우 중요하다.

이를 해결하기 위해 최근 OFDM 기반 지상파 DVB (DVB-terrestrial: DVB-T) 시스템에서 FO를 추정하는 많은 연구가 이루어져 왔다 [2], [4], [5]. [4]에서는 수신한 두 개의 OFDM 심볼과 분산 파일럿 (scattered pilots: SPs) 템플릿을 이용하여 IFO를 추정하며, [5]에서는 수신한 하나의 OFDM 심볼과 파일럿 템플릿을 이용하여 IFO를 추정한다. 한편 연속하는 두 개의 OFDM 심볼의 동일한 색인에 위치한 연속 파일럿이 (continual pilots: CPs) 제공하는 조합 정보와 하나의 심볼 내에서 CP와 인접한 SP와의 조합 정보를 이용하여 IFO를 추정하는 기법이 [2]에서 제안되었다.

그러나 기존의 연구들은 파일럿이 제공하는 조합 정보 중 일부만 이용한다. 본 논문에서는 OFDM 기반 DVB-T 시스템에서 FFO가 완벽하게 추정되고 보상되었다고 가정 하에, IFO 추정 성능을 향상시킬 수 있도록 주파수 영역에서 CP와 SP가 제공

하는 부가적인 조합 정보를 이용하여 IFO를 추정하는 새로운 기법을 제안한다. 그리고 모의실험 결과를 통해 제안한 기법이 기존 기법에 비해 우수한 IFO 추정 성능을 보임을 확인할 수 있다.

본 논문은 총 6장으로 구성된다. II장에서는 OFDM 시스템과 DVB-T 시스템의 모형에 대해 알아본다. III장에서는 OFDM 기반 DVB-T 시스템에서 IFO를 추정하는 기존 기법에 대해 알아본다. IV장에서는 파일럿이 제공하는 부가적인 조합 정보를 이용하여 IFO를 추정하는 새로운 기법을 제안한다. V장에서는 덧셈플 백색 정규잡음과 (additive white Gaussian noise: AWGN) 다중 경로 환경에서의 모의실험 결과를 통해 기존 기법과 제안한 기법의 IFO 추정 성능을 비교한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모형

DVB-T 시스템은 부반송파의 개수에 의해 2K 모드와 8K 모드로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 총 2048 개의 부반송파 중 1705 개의 부반송파를 데이터 및 파일럿을 전송하는데 사용하는 2K 모드 DVB-T 시스템을 고려한다. 2K 모드 DVB-T 시스템에서 하나의 OFDM 심볼은 데이터 외에 45 개의 CP와 142 개 또는 143 개의 SP를 전송하는데, 이는 채널을 추정하거나 시간 및 주파수 오프셋을 추정하는데 사용된다. 파일럿의 값은  $+4/3$  또는  $-4/3$ 이며, 파일럿의 위치 및 값은 송수신단에서 알고 있다. 그림 1은 2K 모드 DVB-T 시스템에서 파일럿의 위치를 보여준다. 여기서 가로와 세로는 각각 OFDM 시스템의 부반송파 색인과 심볼 색인을 나타내며,  $K_{\min}$  과  $K_{\max}$  는 데이터 및 파일럿을 전송하는데 사용되는 부반송파의 가장 작은 그리고 가장 큰 색인을 각각 의미한다 [6].

SP는 하나의 OFDM 심볼 상에서 매 12 개의 부반송파마다 삽입되며, 하나의 OFDM 심볼 내에서 SP의 위치는 4 개의 OFDM 심볼을 주기로 반복된다. 동일한 부반송파 색인에 삽입된 파일럿의 값은 동일하며, CP와 SP의 위치는 서로 겹칠 수 있다. OFDM 심볼은 역 FFT를 (inverse FFT: IFFT) 통

해 생성되며,  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $n$ 번째 샘플은 다음과 같다.

$$x_l(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} P_l(k) e^{j2\pi kn/N}, \quad (1)$$

for  $l = 0, 1, \dots$ , and  $n = 0, 1, \dots, N-1$ .

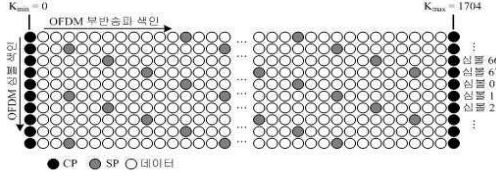


그림 1. 2K 모드 DVB-T 시스템에서 파일럿의 위치  
Fig. 1. Pilot arrangement in a DVB-T system with 2K mode

여기서  $k$ 와  $N$ 은 부반송파의 색인과 IFFT의 크기를 각각 의미한다.  $P_l(k)$ 는  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $k$ 번째 부반송파를 통해 전송되는 파일럿 또는 데이터를 의미하며, 직교 진폭 변조 (quadrature amplitude modulation: QAM) 방식으로 생성된다. IFFT를 통해 생성된 OFDM 심볼  $x_l(n)$ 에 보호구간을 삽입하고 채널을 통과한 후, 수신된  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $n$ 번째 샘플,  $y_l(n)$ 은 다음과 같다.

$$y_l(n) = e^{j2\pi\Delta(n+LN_T)/N} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \cdot [h_l(n) \otimes x_l^g(n)] + n_l(n) \\ & = s_l(n) + n_l(n), \end{aligned}$$

여기서  $N_T$ 와  $\Delta$ 는 각각 보호구간을 포함하는 OFDM 심볼의 샘플 수 및 부반송파 간격으로 정규화된 FO를 의미하며,  $h_l(n)$ 과  $\otimes$ 은 채널의 임펄스 응답과 컨볼루션 연산을 각각 나타낸다.  $n_l(n)$ 은 평균이 0, 분산이  $\sigma_n^2 = E\{|n_l(n)|^2\}$ 인 복소 AWGN 샘플을 나타낸다. 신호대 잡음비는 (signal to noise ratio: SNR)  $\rho = \sigma_s^2/\sigma_n^2$ 으로 정의되며,

$\sigma_s^2 = E\{|s_l(n)|^2\}$ 이다. 한편  $x_l^g(n)$ 은 보호구간이 삽입된  $l$ 번째 OFDM 심볼을 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$x_l^g(n) = x_l(n + N - N_g)_N, \quad (3)$$

for  $0 \leq n \leq N + N_g - 1$ ,

여기서  $(n)_N$ 은  $n$ 을  $N$ 으로 나누었을 때의 나머지,  $N_g$ 는 OFDM 심볼의 보호구간 샘플 수를 각각 의미한다.

수신단에서 IFO 추정 전에 FFO가 완벽하게 추정되고 보상되었다고 가정하자. 이때 FFT를 거친  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $k$ 번째 샘플  $Y_l(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_l(k) = e^{j2\pi l \Delta_i N_T / N} H_l(k - \Delta_i) \quad (4)$$

$$\cdot P_l(k - \Delta_i) + N_l(k),$$

여기서  $\Delta_i$  및  $H_l(k)$ ,  $N_l(k)$ 는 각각 IFO 및 채널응답, 평균이 0인 복소 AWGN 샘플을 의미한다. 식 (4)로부터 IFO는 FFT 이후, 수신된 OFDM 심볼 색인의 순환적 이동을 조래함을 알 수 있다.

### III. 기존 기법

기존 기법은 파일럿의 위치 및 값과 관련된 두 가지 템플릿을 사용하여 IFO를 추정한다 [2]. 두 가지 템플릿은 각각 동일한 OFDM 심볼 내에 있는 CP와 가장 가까이 있는 SP와의 조합, 그리고 연속하는 두 개의 OFDM 심볼 내의 동일한 색인에 위치하는 두 개의 CP 간의 조합을 이용하여 표현된다. 두 가지 템플릿은 식 (5)와 식 (6)처럼 표현된다.

$$X_l(k) = \frac{P_l(k')}{P_l(k)}, \text{ for } k \in C_{cp}. \quad (5)$$

$$\hat{X}_l(k) = \frac{P_{l+1}(k)}{P_l(k)}, \text{ for } k \in C_{cp}. \quad (6)$$

여기서  $C_{cp}$ 는 CP의 부반송과 색인의 집합을,  $k'$ 은  $P_l(k)$ 에 가장 인접한 SP의 부반송과 색인을 각각 의미한다.

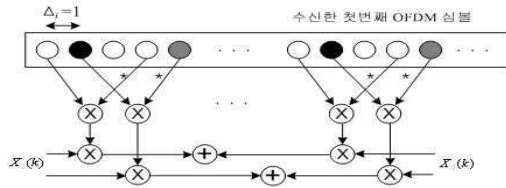


그림 2. 첫 번째 템플릿을 이용하여 IFO를 추정하는 구조

Fig. 2. The structure of the conventional method exploiting the first template

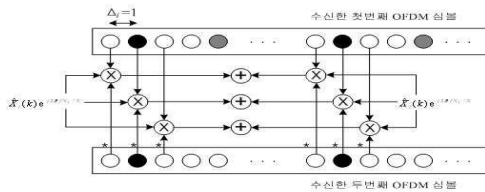


그림 3. 두 번째 템플릿을 이용하여 IFO를 추정하는 구조

Fig. 3. The structure of the conventional method exploiting the second template

그림 2와 그림 3은 연속하는 두 개의 OFDM 심볼에서 두 개의 템플릿을 이용하여 IFO를 추정하는 기존 기법의 구조를 각각 나타낸다. 두 개의 템플릿에 사용된 파일럿 간 채널응답이 동일하며 SNR이 크다고 가정하면, 식 (7)을 통해 IFO를 추정할 수 있다.

$$\hat{\Delta}_i = \arg \max_{f \in \{f_1, \dots, f_n\}} \left\{ \text{Re} \left( \sum_{k \in C_{cp}} \sum_{l=0}^{D-1} Z_l(k+f) X_l(k) \right) + \sum_{k \in C_{cp}} \sum_{l=0}^{D-1} \hat{Z}_l(k+f) \hat{X}_l(k) e^{j2\pi f N_T / N} \right\}, \quad (7)$$

여기서  $f$ 는 부반송과 간격으로 정규화 된 실제

IFO 값인  $\Delta_i$ 를 구하기 위하여  $Z_0(k+f)X_0(k)$ 를 통해 미리 선택된  $\alpha$ 개의 시험 값을 의미한다.  $D$ 는 IFO를 추정하기 위해 사용된 연속하는 OFDM 심볼의 수를 의미한다.  $Z_l(k+f)$ 와  $\hat{Z}_l(k+f)$ 는 각각  $Y_l(k+f)Y_l^*(k'+f)$ 와  $Y_l(k+f)Y_{l+1}^*(k+f)$ 를 나타낸다.

#### IV. 제안한 기법

기존 기법은 하나의 OFDM 심볼에 위치하는 CP와 가장 가까이 위치한 SP와의 조합 및 연속하는 두 OFDM 심볼의 동일한 색인에 위치한 두 개의 CP 간의 조합을 이용하여 IFO를 추정한다. 즉 기존 기법에서는 템플릿에 사용되는 파일럿의 채널 응답이 빠르게 변한다는 가정 하에, 파일럿이 제공하는 조합 정보 중 일부만을 이용하여 IFO를 추정한다. 따라서 이 장에서는 IFO 추정 성능을 향상시킬 수 있도록 파일럿이 제공하는 추가적인 조합 정보를 이용한 IFO 추정 기법을 제안한다. 총  $D$ 개의 OFDM 심볼 중에서 연속하는 두 개의 OFDM 심볼에 있는 파일럿 간의 관계는 식 (8)을 통해 표현할 수 있다.

$$d_{l,m}(n,i) = \frac{P_m(i)}{P_l(n)}. \quad (8)$$

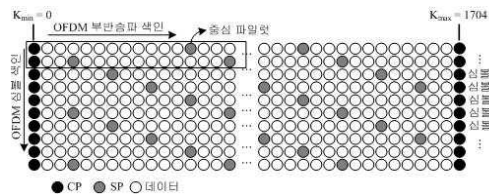


그림 4. 제안한 기법에서 사용된 그룹의 예  
Fig. 4. An example of a group in the proposed method

여기서  $n \in p_l$ ,  $i \in p_m$ ,  $|n-i| \leq 12$ 이며,  $l, m \in \{0, 1, \dots, D-1\}$ ,  $|m-l| \leq 1$ 이다.  $p_l$ 과  $p_m$ 은 각각  $l$ 번째와  $m$ 번째 OFDM 심볼에 있는 파일럿의 부반송과 색인들의 집합을 의미한다. OFDM 심볼에서 12개의 부반송마다 SP가 삽입

되므로, 각각의 모든 파일럿을 중심으로 하여 연속하는 두 개의 OFDM 심볼에서 좌우로 각각 12개의 부반송파를 포함하는 그룹을 생각할 수 있다. 이때 그룹의 중심이 되는 파일럿을 중심 파일럿이라 한다. 이러한 점과 식 (8)을 이용하여 IFO 추정 상관함수를 얻을 수 있다.

$$M(f) = \sum_{n \in p_l} \sum_{i \in p_m} d_{l,m}(n,i) Y_l(n+f) \quad (9)$$

$$\bullet Y_m^*(i+f) e^{j2\pi f N_T(m-l)/N}.$$

수신된  $l$ 번째 OFDM 심볼에서 색인  $n$ 을 갖는 파일럿과  $m$ 번째 OFDM 심볼에서 색인  $i$ 를 갖는 파일럿의 채널응답이 동일하고 SNR이 크다고 하면 식 (9)는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(f) \approx \sum_{n \in p_l} \sum_{i \in p_m} d_{l,m}(n,i) |H_l(n+f-\Delta_i)|^2 \quad (10)$$

$$\bullet P_l(n+f-\Delta_i) P_m^*(i+f-\Delta_i)$$

$$\bullet e^{j2\pi N_T(m-l)(f-\Delta_i)/N}.$$

IFO를 정확하게 추정하였다면, 식 (10)은 실수 값을 갖기 때문에, IFO 추정 값은 식 (11)을 통해 얻을 수 있다.

$$\hat{\Delta}_i = \arg \max_{|f| \leq M} \{\text{Re}(M(f))\}, \quad (11)$$

여기서  $M$ 은 IFO 시험값의 최대 허용 범위이다. 그림 4는 첫 번째 OFDM 심볼의 두 번째 파일럿을 중심으로 하여 좌우 12개의 부반송파를 포함하는 그룹의 예를 보여준다.

## V. 모의실험 및 성능 비교

이 장에서는 기존 기법과 제안한 기법의 IFO 추정 확률을 통해 기법 간 성능을 비교한다. 2K 모드 DVB-T 시스템을 고려하며, 데이터는 4-QAM

방식을 통해 생성한다. 모의실험에 사용된 매개변수는  $M = N/2$ ,  $\alpha = N$ ,  $D = 2$ ,  $\Delta_i = 1$ 이며, 보호구간의 길이는 256 샘플로 설정하였다. 채널의 다중 경로 개수는 9개이며, 각 경로의 시간 차이는 10 샘플로 설정하였고, 각 경로의 크기는 서로 독립적인 레일리 분포를 따른다. 그리고 각 경로의 크기는 지수적인 분포를 따르며, 첫 번째 경로와 마지막 경로의 전력은 20dB 차이를 보인다. 각 경로의 위상은  $(-\pi, \pi]$ 에서 균일한 분포를 갖으며, 도플러 주파수는 100Hz로 설정하였다. 그림 5로부터 제안한 기법은 기존 기법에 비해 파일럿이 제공하는 보다 많은 조합 정보를 사용함으로써 AWGN 환경에서 기존 기법에 비해 우수한 IFO 추정 성능을 보임을 확인할 수 있다.

또한, 연속하는 두 OFDM 심볼의 동일한 색인에 위치한 파일럿 및 하나의 OFDM 심볼에서 CP와 인접한 SP와의 조합만을 고려한 기존 기법과 달리, 제안한 기법은 기존 기법에서 사용한 파일럿 조합 뿐만 아니라 비슷한 채널의 영향을 받은 부가적인 파일럿 조합을 사용한다. 따라서 제안한 기법의 IFO 추정 성능이 다중 경로 환경에서 기존 기법에 비해 우수함을 그림 6으로부터 확인할 수 있다.

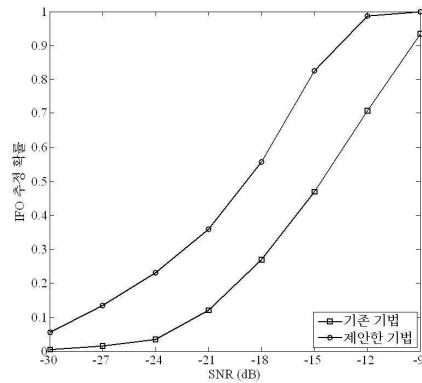


그림 5. AWGN 환경에서 IFO 추정 확률  
Fig. 5. The IFO detection probability in AWGN channel

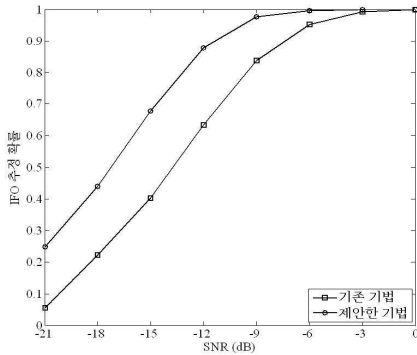


그림 6. 다중 경로 환경에서 IFO 추정 확률  
 Fig. 6. The IFO detection probability in multipath channel

### VI. 결론

OFDM 기반 시스템의 성능은 FO에 매우 민감하다. 따라서 FO를 추정하는 과정은 OFDM 기반 시스템에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 OFDM 기반 DVB-T 시스템에서 파일럿이 제공하는 부가적인 조합 정보를 이용하여 IFO를 추정하는 효율적인 기법을 제안하였다. 그리고 IFO 추정 성능을 향상시킬 수 있는 부가적인 파일럿 조합 정보를 사용함으로써, 제안한 기법이 기존 기법에 비해 IFO 추정 성능이 더 뛰어남을 모의실험으로부터 확인하였다.

### 감사의 글

"이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. D00280)."

### 참고 문헌

[1] S. Chang and E. J. Powers, "Efficient frequency-offset estimation in OFDM-based WLAN systems", *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 21, pp. 1554-1555, Oct. 2003.  
 [2] K. T. Lee and J. S. Seo, "Pilot-aided iterative frequency offset estimation for digital

video broadcasting (DVB) systems", *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 53, no. 1, pp. 11-16, Feb. 2007.  
 [3] M. Morelli, A. N. D'Andrea, and U. Mengali, "Frequency ambiguity resolution in OFDM systems", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 134-136, Apr. 2000.  
 [4] M. Li and W. Zhang, "A novel method of carrier frequency offset estimation for OFDM systems", *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 965-972, Nov. 2003.  
 [5] P. Liu, B. B. Li, Z. Y. Lu, and F. K. Gong, "A new frequency synchronization scheme for OFDM", *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, no. 3, pp. 823-828, Aug. 2004.  
 [6] ETSI EN 300 744, "Digital video broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", ETSI Techn. Report., Jan. 2001.

저자약력

최 명 수 (Myeong-Soo Choi) 정회원



2000년 2월: 목포대학교  
전자공학과 (공학사)  
2002년 2월: 목포대학교  
전자공학과 (공학석사)  
2009년 2월: 목포대학교  
전자공학과 (공학박사)

2009년 3월~2009년 11월: 목포대학교 ITRC연구  
센터 (해양텔레매틱스 기술개발센터) Post-Doc.  
2009년 12월~현재 목포대학교 정보산업연구소  
연구교수

<관심분야> 디지털통신시스템, USN, 해양텔레  
매틱스 기술, 임베디드시스템

이 영 윤 (Youngyoon Lee) 정회원



2007년 2월: 성균관대학교  
정보통신공학부 (공학사)  
2009년 2월: 성균관대학교  
휴대폰학과 (공학석사)  
2009년 3월~현재: 성균관대학교  
휴대폰학과 (박사과정)

2008년 7월 성균관대학교 우수논문상 수상

<관심분야> 통신이론, 이동통신, 통계학적 신호  
처리

송 익 호 (Ickho Song) 정회원



1982년 2월, 1984년 2월: 서울  
대학교 전자공학과 (공학사)  
(준최우등), (공학석사)  
1985년 8월, 1987년 5월: 펜실  
베니아대학교 전기공학과  
(석사/박사)

1987년 3월~1988년 2월: 벨 통신연구소 연구원  
1988년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 조교수, 부교수, 교수

1995년 1월~현재: 한국통신학회 논문지편집  
부위원장

대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평  
생회원, IET 석학회원, IEEE 석학회원

<관심분야> 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호  
검파와 추정, 이동통신

정 민 아 (Min-A Jung) 정회원



1992년 2월: 전남대학교  
전산통계학과 (이학사)  
1994년 2월: 전남대학교  
전산통계학과 (이학 석사)  
2002년 2월: 전남대학교  
전산통계학과 (이학박사)

2005년 3월~현재: 목포대학교 컴퓨터공학전공  
조교수

<관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식  
시스템, 무선통신응용분야 (RFID,  
USN, 텔레매틱스), 임베디드시스템