

# 차동 결합을 이용한 새로운 OFDM 정수 주파수 오프셋 추정 기법

준회원 안 상 호\*, 정 다 해\*, 종신회원 한 태 희\*, 김 상 호\*, 윤 석 호\*

## A Novel OFDM Integer Frequency Offset Estimation Scheme Using Differential Combining

Sangho Ahn\*, Dahae Chong\* *Associate Members*,  
Tae Hee Han\*, Sang-Hyo Kim\*, Seokho Yoon\* *Lifelong Members*

### 요 약

시간 오차는 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기술에 기반한 무선 랜 (wireless local area network: WLAN) 시스템에서 주파수 오프셋 추정 시, 오류를 일으키는 원인들 중 하나이다. 시간 오차가 주파수 오프셋 추정 시에 미치는 영향을 줄이기 위하여 몇몇 연구가 진행되어 왔지만, 대부분의 주파수 오프셋 추정 기법들은 시간 오차 범위에 대한 사전 정보를 미리 알고 있다는 가정 하에 연구됨으로써, 실제 시스템에 적용되지 못하였다. 본 논문에서는 시간 오차에 대한 정보를 요구하지 않고 두 개의 연속적인 상관 값 표본 사이에 차동 결합 기법을 적용함으로써, 실제 시스템에 적용 가능한 새로운 정수 주파수 오프셋 추정 기법을 제안하였다. 모의실험 결과, 제안한 기법은 시간 오차 범위에 대한 정보를 요구하지 않기 때문에, 시간 오차 분산에 강인하며, 또한 시간 오차의 범위를 정확하게 모르는 경우, 평균적으로 기존의 기법보다 더 나은 성능을 보였다.

**Key Words** : Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), timing offset, frequency offset, estimation, differential combining

### ABSTRACT

The timing offset is one of the main error sources in estimating the frequency offset in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. Although some works have been done to mitigate the influence of the timing offset on the frequency offset estimation, most of the investigations require the knowledge of the timing offset range, which is not generally available in practical systems. In this paper, we propose a new frequency offset estimation scheme using differential combining between two successive correlation samples, which does not require the knowledge of the timing offset range, and thus, is robust to the timing offset variation. The simulation results show that the proposed scheme is not only robust to the timing offset variation, but also generally performs better than the conventional scheme on the average, in the case of the timing offset range being not known exactly.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음 (IITA-2008-C1090-0803-0002)

\* 성균관대학교 정보통신공학부(syoon@skku.edu)

논문번호 : KICS2008-06-266, 접수일자 : 2008년 6월 11일, 최종논문접수일자 : 2008년 7월 28일

## I. 서 론

미래의 무선 및 모바일 시스템은 사용자들에게 빠르고 신뢰성이 높은 멀티미디어 서비스를 제공 할 것으로 기대된다. 지금까지 제안된 무선 및 모바일 기술들 중에서, 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 기술은 무선 및 모바일 응용분야에서 상당한 관심을 끌어들였으며, institute of electrical and electronics engineers (IEEE) 802.11a, high performance local area network type 2 (HiperLAN/2), mobile multimedia access communication (MMAC) 등에서 표준 변조 기법으로 채택되어 왔다. 그 이유는 OFDM 기술이 높은 주파수 효율을 지니고 다중경로 페이딩 및 충격성 잡음에 강하기 때문이다<sup>1,4</sup>.

하지만 OFDM 시스템은 부반송파 사이의 직교성을 파괴하고, 시스템의 전체적인 성능을 저하시킬 수 있는 주파수 오프셋에 매우 민감하다<sup>5</sup>. 그러므로 주파수 오프셋 추정 기술은 OFDM 시스템에서 매우 중요한 기술 중 하나이다<sup>6,7</sup>.

주파수 오프셋 추정 시, 오류를 일으키는 원인들 중 하나가 바로 시간 오차이다<sup>8</sup>. 기존에 연구된 주파수 오프셋 추정 기법들은 이러한 시간 오차가 완벽하게 동기화 되었다는 가정 하에 연구되어왔다<sup>9,10</sup>. 하지만 시간 오차가 완벽하게 동기화 되었다는 가정은 이상적인 것으로 실제 시스템에 적용하기 부적절하며, 실제로 시간 오차가 존재하는 경우, 기존에 연구된 주파수 오프셋 추정 기법들은 시간 오차에 의해 큰 영향을 받는다. 이후에, 이처럼 시간 오차가 주파수 오프셋 추정에 미치는 영향을 줄이기 위해 지금까지 몇몇 기법들이 연구되어 왔다<sup>11,12</sup>. 하지만 대부분의 기법들이 일반적으로 실제 시스템에서 이용가능하지 않은 시간 오차 범위에 대한 정보를 추가적으로 요구 하였다. 그러므로 시간 오차의 범위에 대한 정보를 요구하지 않는 기법을 개발하는 것은 매우 유용하다.

본 논문에서는 OFDM 기술에 기반한 무선랜 (wireless local area network: WLAN) 시스템을 위하여 두 개의 연속적인 상관 표본들 사이에 차동 결합을 적용한 새로운 주파수 오프셋 추정 기법을 제안한다. 시간 오차는 주파수 오프셋 추정에 사용되는 상관 표본들 사이의 위상 변화를 야기 시킴으로써 올바른 주파수 오프셋 추정에서 큰 상관 값을 얻기 위해 필요한 상관 표본들의 축적을 방해한다. 제안한 기법에서는 두 개의 연속적인 상관 표본들 사이에 차동 결합

기법을 적용하여 시간오차에 의해 야기되는 위상 변화를 제거하고, 그 결과 시간 오차에 관계없이 주파수 오프셋 추정을 위해 필요한 큰 상관 값을 얻을 수 있다. 모의실험 결과는 시간 오차의 범위에 대해 정확하게 알려지지 않은 경우, 제안한 기법이 시간오차 분산에 강인할 뿐만 아니라 기존의 기법 보다 평균적으로 더 나은 성능을 수행함을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서는 OFDM 시스템의 신호 모형을 소개한다. III장에서는 시간 오차가 주파수 오프셋 추정에 미치는 영향에 대해 설명하며, IV장에서는 본 논문에서 제안한 새로운 주파수 오프셋 추정 기법을 소개한다. V장에서는 기존의 기법과 제안한 기법의 성능을 비교 분석하며 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 내린다.

## II. 신호 모형

OFDM 시스템에서, 송신되는 심볼은 역 고속 푸리에 변환에 (inverse fast Fourier transform: IFFT) 의해 생성되며 다음과 같이 표현된다.

$$z(m) = \sum_{k=0}^{N-1} Z_k e^{j2\pi \frac{k}{T_s} \frac{T_s}{N} m} \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 이산 시간 인덱스이며,  $Z_k$ 는  $k$ 번째 부반송파의 위상 편이 변조 (phase shift keying: PSK) 또는 직교 진폭 변조 (quadrature amplitude modulation: QAM) 심볼이다. 그리고  $T_s$ 는 심볼의 주기이며,  $N$ 은 역 고속 푸리에 변환의 크기이다.

평균 0을 가지는 덧셈꼴 백색 정규 잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN) 환경에서, 수신 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y(m) = z(m - \tau) e^{j2\pi \Delta f (m - \tau) / N} + w(m). \quad (2)$$

여기서  $\Delta f$ 는 부반송파 간격  $1/T_s$ 로 정규화 된 주파수 오프셋이며,  $\tau$ 는 표본간격  $T_s/N$ 으로 정규화 된 시간 오차이고  $w(m)$ 은 AWGN이다. 주파수 오프셋은 일반적으로 정수 부분과 소수 부분으로 구성되어 있는데, 본 논문에서는 계산상의 편의를 위해  $\Delta f$ 를 정수 주파수 오프셋이라 가정한다.

수신기는 먼저 수신된 OFDM 심볼을 고속 푸리에 변환을 사용하여 복조한 뒤, 아래와 같이  $l$ 번째 부반송파에 대응하는 고속 푸리에 변환 출력 값,  $Y_l$ 을 산출한다.

$$Y_l = Z_l e^{-\frac{j2\pi(l - \Delta f)\tau}{N}} + W_l \quad (3)$$

여기서  $W_l$ 은  $l$ 번째 부반송파에 대응하는  $w(m)$ 의 고속 푸리에 변환 출력 값이다. (3)으로부터, 수신된 OFDM 심볼의 고속 푸리에 변환 출력 값은 주파수 오프셋에 의해 순환적으로 이동하며, 그것의 위상은 시간 오차에 의해 회전함을 알 수 있다.

### III. 시간 오차가 주파수 오프셋 추정에 미치는 영향

본 논문에서는 [8]-[12]에서와 같이, 혼련 심볼을 이용한 주파수 오프셋 추정 시스템을 고려한다.  $\Delta f$ 의 추정 값인  $\hat{\Delta f}$ 은 일반적으로 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\hat{\Delta f} = \arg \max_d \left\{ \left| \sum_{k=0}^{N-1} Z_k^* Y_{(k+d)_N} \right| \right\}. \quad (4)$$

여기서  $Z_k$ 는 알고 있는 혼련 심볼, \*는 켈레 복소수를 나타내며,  $d$ 는 순환 이동의 횟수이고,  $(\cdot)_N$ 은  $N$ 으로 나눈 나머지이다.  $\Delta f$ 가 올바르게 추정 되었을 때, 즉  $\Delta f = \hat{\Delta f}$ 일 때, AWGN이 고려되지 않는다면, (4)에서  $N|Z_k|^2$ 으로 정규화 된 상관 값은  $\left| e^{-\frac{j\pi\tau(N-1)}{N}} \frac{\sin(\pi\tau)}{\sin(\pi\tau/N)} \right|$ 이 되고, 시간 오차  $\tau$ 의 함수로서, 그림 1과 같이 그려진다. 그림 1로부터, 주파수 오프셋 추정에 사용되는 상관 값은 시간 오차의 분산에 매우 민감함을 알 수 있다. 즉, 상관 값은 주파수 오프셋이 올바르게 추정되었을 지라도, 시간 오차에 의해 크게 감소되며, 이는 주파수 오프셋 추정 성능의 상당한 저하를 야기 시킨다 ( $\Delta f = \hat{\Delta f}$ 일 때, 큰 상관 값은 올바른 주파수 오프셋 추정에 필수적임을 주목하자).

시간 오차가 존재할 때 기존 기법에서의 주파수

오프셋 추정은 동기 위상 범위를 (coherence phase bandwidth: CPB) 이용하여 수행된다<sup>[11]</sup>. CPB는 상관 값이 단조 증가하는 범위를 말하며 시간 오차 범위에 매우 의존한다. CPB와 허용 가능한 최대 시간 오차는 각각  $BW_c$ ,  $\tau_{allow}$ 로 나타내며 다음과 같은 관계를 지닌다.

$$BW_c \approx \frac{N}{2\tau_{allow}}. \quad (5)$$

그리고 위의 관계를 이용하여 우리는 아래와 같이  $\Delta f$ 의 추정 값  $\hat{\Delta f}$ 를 얻는다.

$$\hat{\Delta f} = \arg \max_d \left\{ \sum_{n=0}^{K-1} \left| \sum_{k=0}^{BW_c-1} Z_{k+nBW_c}^* \cdot Y_{(k+nBW_c+d)_N} \right| \right\}. \quad (6)$$

여기서  $K$ 는 CPB에 의해 나누어진 상관 구간의 개수이며, 허용 가능한 최대 시간 오차  $\tau_{allow}$ 는  $N/BW_c$ 와 같다. (6)에서 보여진 것처럼, 기존 기법은 CPB마다 절대값을 취해 위상을 일정하게 만든 뒤 더함으로써 상관 값의 감소를 줄인다. 그림 2는 (6)에서의  $N|Z_k|^2$ 으로 정규화 된 상관 값을 보여준다. 여기서 점선과 파선은 각각 허용 가능한 최대 시간 오차가  $\tau_{allow} = 8$ 과  $\tau_{allow} = 16$ 인 경우를 나타낸다. 그림에서 보여진 것처럼, 상관 값은 시간 오차가 허용 가능한 최대 시간 오차보다 더 클 때, 급격하게 감소하며,  $\Delta f$ 를 추정하는데 있어서 상당한 성능의 저하를 야기 시킨다. 즉, 기존의 기법은 올바른 작동을 위해 요구되는 허용 가능한 최대 시간 오차 또는 CPB 설정을 위해 시간 오차의 범위에 대한 사전 정보를 요구 한다.

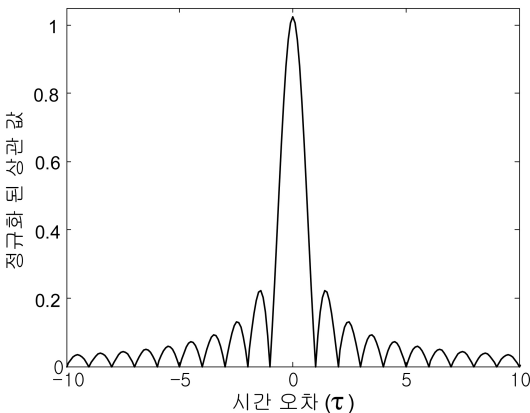


그림 1. 시간 오차 ( $\tau$ )에 따른 상관 값 변화 ( $N=1024$ )

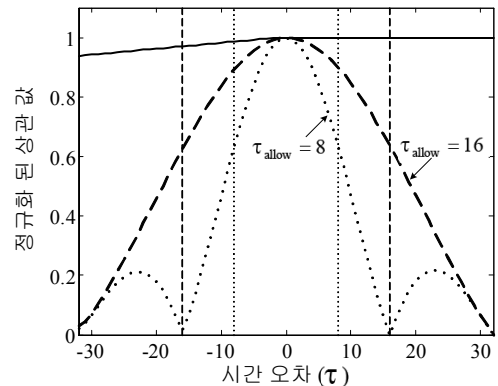


그림 2. 제한한 기법과 (실선) 기존 기법의 (점선과 파선) 상관 값 변화 ( $N=1024$ , 보호구간 (cyclic prefix: CP) 표본 개수: 100)

### IV. 제안한 기법

주파수 옵셋 추정 시, 시간 오차가 미치는 영향을 줄이기 위하여, 본 논문에서는 두 개의 연속적인 상관 값 표본인  $Z_k^* Y_{(k+d)_N}$  과  $Z_{k+1}^* Y_{(k+1+d)_N}$  사이에 차동 결합을 적용한다. 그러면, 차동 결합된 구성요소  $\left\{ \left( Z_k^* Y_{(k+d)_N} \right) \left( Z_{k+1}^* Y_{(k+1+d)_N} \right)^* \right\}_{k=1}^{N-1}$  은 그 위상이 일정해지며, 이에 따라 시간 오차에 관계없이, 그 구성요소들의 합에 의해 큰 상관 값을 얻을 수 있다. 여기서  $\left\{ \left( Z_k^* Y_{(k+d)_N} \right) \left( Z_{k+1}^* Y_{(k+1+d)_N} \right)^* \right\}_{k=1}^{N-1}$  의 각각의 구성 요소는 실수와 허수 부분으로 나누어지는 것에 유의하자. 다음으로 나누어진 부분들을 결합시키기 위해  $\sum_{k=0}^{N-1} \left( Z_k^* Y_{(k+d)_N} \right) \left( Z_{k+1}^* Y_{(k+1+d)_N} \right)^*$  의 포락선을 구하며, 마지막으로 아래의 주파수 옵셋 추정 기법을 산출한다.

$$\hat{\Delta f} = \arg \max_d \left\{ \left| \sum_{k=0}^{N-1} \left( Z_k^* Y_{(k+d)_N} \right) \cdot \left( Z_{k+1}^* Y_{(k+1+d)_N} \right)^* \right| \right\} \quad (7)$$

여기서  $d = \Delta f$  일 때, 즉 동기가 맞았을 경우의 상관 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ Z_k^* Y_k \right\} \left\{ Z_{k+1}^* Y_{k+1} \right\}^* \right| \quad (8) \\ &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ Z_k^* Z_k e^{-j2\pi \frac{k}{N} \tau} \right\} \left\{ Z_{k+1}^* Z_{k+1} e^{-j2\pi \frac{(k+1)}{N} \tau} \right\}^* \right| \\ &= \left| Z_k^2 |Z_{k+1}|^2 \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{\tau}{N}} \right| \\ &= M |Z_k|^2 |Z_{k+1}|^2 \end{aligned}$$

III장의 그림 2와 (8)로부터 알 수 있듯이, 우리는 제안한 기법의  $M |Z_k|^2 |Z_{k+1}|^2$  으로 정규화 된 상관 값이 시간 오차 값에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 제안한 기법의 상관 값이 시간 오차가 음의 값을 가질 때, 약간 감소되는 것을 관찰 할 수 있는데, 이는 그림 3에서 보여지는 것과 같이 보호 구간을 (cyclic prefix: CP) 포함한 이웃한 훈련 심볼의 간섭으로 인해 발생한다. 하지만, 그림 2로부터 제안한 기법의 상관 값이 여전히 기존 기법의 상관 값보다 훨씬 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

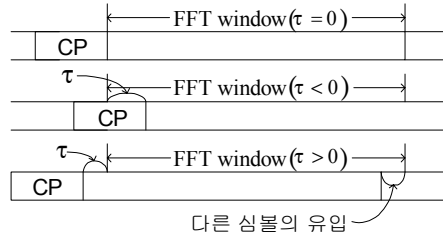


그림 3. 시간 오차가 음수일 때, 이웃하는 훈련 심볼의 방해

### V. 성능 비교 및 분석

이번 장에서, 우리는 주파수 옵셋 추정 정확도의 관점에서 시간 오차가 존재할 때, 기존의 기법 [11] 과 제안한 기법을 비교, 분석 한다. 모의실험은 AWGN 환경에서 수행되었으며, 정규화 된 주파수 옵셋은 10으로 고정하였다. 또한, CP 표본의 개수가 100개이고 1024개의 부반송파를 갖는 OFDM 시스템이 고려되었다. 마지막으로, 모의실험의 결과는 각 신호대잡음비마다 (signal to noise ratio: SNR) 1000번의 시행 횟수를 거쳐 얻어 졌다.

그림 4와 5는 허용 가능한 최대 시간 오차가 각각  $\tau_{allow} = 8$  과 16 일 때, SNR에 따른 제안한 기법과 (실선) 기존의 기법의 (점선) 주파수 옵셋 추정 정확도를 보여준다. 그림으로부터, 시간 오차가 허용 가능한 최대 시간 오차와 같거나 작을 때에는 기존 기법이 제안한 기법보다 더 나은 성능을 보임을 관찰 할 수 있다. 하지만, 기존 기법의 성능은 시간 오차가 허용 가능한 최대 시간 오차보다 클 때, 큰 폭으로 감소하며 결국 제안한 기법의 성능보다 떨어짐을 알 수 있다.

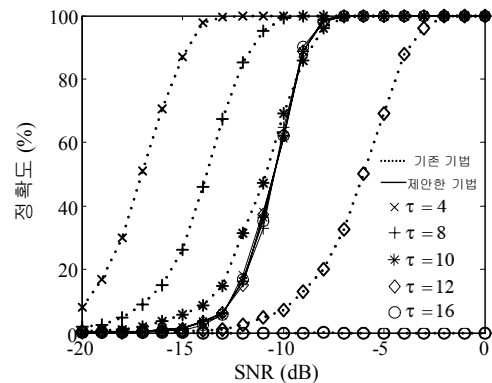


그림 4. AWGN 환경에서  $\tau_{allow}$  가 8일 때의 SNR에 따른 기존 기법과 (점선) 제안한 기법의 (실선) 주파수 옵셋 추정 정확도 ( $\Delta f = 10$ ,  $N = 1024$ ,  $\tau = 4, 8, 10, 12, 16$ , CP 표본 개수: 100)

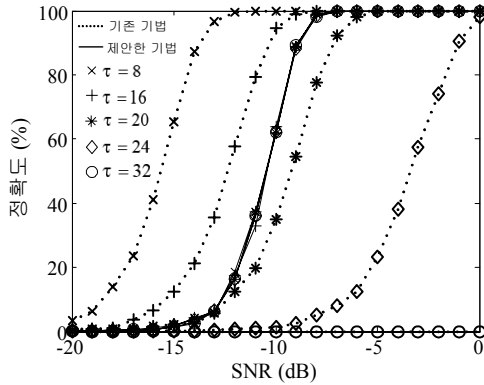


그림 5. AWGN 환경에서  $\tau_{allow}$ 가 16일 때의 SNR에 따른 기존 기법과 (점선) 제안한 기법의 (실선) 주파수 오프셋 추정 정확도 ( $\Delta f = 10$ ,  $N = 1024$ ,  $\tau = 8, 16, 20, 24, 32$ , CP 표본 개수: 100)

이러한 결과로부터, 우리는 허용 가능한 최대 시간 오차의 설정을 위해 요구되는 시간 오차 범위에 대한 정보가 없을 때, 기존의 기법은 올바르게 작동할 수 없음을 알 수 있다. 반면에, 제안한 기법은 기존의 기법보다 시간 오차 분산에 훨씬 강인하며, 시간 오차 범위에 대한 정보가 유효하지 않는 실제 시스템에서 기존의 기법보다 평균적으로 더 나은 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 먼저 OFDM 시스템에서 시간 오차가 주파수 오프셋 추정에 미치는 영향을 조사하였으며, 시간 오차의 영향을 줄이기 위해, 두 개의 연속적인 상관 표본들 사이에 차동 결함을 적용한 새로운 정수 주파수 오프셋 추정 기법을 제안하였다. 모의실험 결과로부터, 시간 오차의 범위에 대한 정보가 존재하지 않을 때, 기존 기법의 성능은 큰 폭으로 감소하여 주파수 오프셋 추정에 유용하지 않음을 알 수 있었다. 반면에, 제안한 기법은 시간 오차의 범위가 정확하게 알려지지 않은 경우 시간 오차 분산에 매우 강인하며 평균적으로 기존의 기법보다 더 나은 성능을 나타내었다.

## 참고 문헌

[1] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. London, England: Artech House, 2000.  
 [2] IEEE Std. 802.11a-1999, "Wireless LAN MAC and PHY Specifications - High Speed Physical

Layer in the 5 GHz Band," *ISO/IEC 8802-11: 1999 (E) / Amd 1: 2000 (E)*, New York, NY: IEEE, 2000.

[3] N. Prasad and A. Prasad, *WLAN Systems and Wireless IP for Next Generation Communications*. Boston, MA: Artech House, 2002.  
 [4] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.28, pp.5-14, May 1990.  
 [5] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.42, pp.2908-2914, Oct. 1994.  
 [6] B. Y. Prasetyo, F. Said and A. H. Aghvami, "Fast burst synchronisation technique for OFDM-WALN systems," *IEE proceedings: Commun.*, Vol.147, pp.292-298, Oct. 2000.  
 [7] J. Li, G. Liu and G. B. Giannakis, "Carrier frequency offset estimation for OFDM-based WLANs," *IEEE Signal Process. Lett.*, Vol.8, pp.80-82, Mar. 2001.  
 [8] H. Nogami and T. Nagashima, "A frequency and timing period acquisition technique for OFDM systems," in *Proc. IEEE PIRMC*, Toronto, Canada, pp.1010-1015, Sep. 1995.  
 [9] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.45, pp.1613-1621, Dec. 1997.  
 [10] Y. H. Kim, I. Song, S. Yoon, and S. R. Park, "An efficient frequency offset estimation for OFDM systems and its performance characteristics," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.50, pp.1307-1312, Sep. 2001.  
 [11] K. Bang, N. Cho, H. Jun, K. Kim, H. Park, and D. Hong, "A coarse frequency offset estimation in an OFDM system using the concept of the coherence phase bandwidth," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.49, pp.1320-1324. Aug. 2001.  
 [12] S. Kim, S. Yoon, H. -K. Choi, and S. Y. Kim, "A low complexity and robust frequency offset estimation algorithm for OFDM-based WLAN systems," *Springer Verlag Lecture Notes in Compu. Sci.*, Vol.3992, pp.961-968, May 2006.

안 상 호 (Sangho Ahn)

준회원



2007년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사  
2007년 3월~현재 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
2007년 2월 성균관대학교 우수논문상 받음  
<관심분야> 통계학적 신호 처리, 추정 및 검파

정 다 해 (Dahae Chong)

준회원



2006년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사  
2008년 2월 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 공학석사  
2008년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 박사과정  
<관심분야> 통계학적 신호 처리, 추정 및 검파, 이동 통신

한 태 희 (Tae Hee Han)

중신회원



1992년 KAIST 전기 및 전자공학 과 학사  
1994년 KAIST 전기 및 전자공학 과 석사  
1999년 KAIST 전기 및 전자공학 과 박사  
1999년 3월~2006년 8월 삼성전

자 통신연구소 책임 연구원

2006년 9월~2008년 2월 한국산업기술평가대학교 전자공학과 교수

2008년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 반도체시스템공학 전공 교수

<관심분야> IT SoC 설계, VLSI 설계 기술 및 방법론, 단말 시스템

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)

중신회원



1998년 2월 서울대학교 전기공학부 공학사  
2000년 2월 서울대학교 전기공학부 공학석사  
2004년 2월 서울대학교 전기공학부 공학박사  
2004년 3월~2006년 7월 삼성전자 선임 연구원

2006년 8월~2007년 8월 박사 후 연구원 (USC)

2007년 9월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수  
<관심분야> 오류정정부호, 다중 안테나 시스템, 시퀀스, 릴레이 통신

윤 석 호 (Seokho Yoon)

중신회원



1997년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 학사 (최우등)  
1999년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 석사  
2002년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 박사  
2002년 4월~2002년 6월 MIT 박사 후 연구원

2002년 7월~2003년 2월 하버드대학교 박사 후 연구원

2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 전임 강사, 조교수

2000년 2월 삼성 휴먼테크 논문대상 동상 받음

<관심분야> 이동통신, 통계학적 신호처리, 적응 신호처리