

논문 2009-46TC-5-14

# 도플러 환경에 강인한 OFDM 반송파 미세 주파수 동기

(Robust fine carrier offset estimation for OFDM in Doppler conditions)

강 은 수\*, 한 동 석\*\*

(Eun Su Kang and Dong Seog Han)

## 요 약

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 전송방식은 부 반송파의 직교성을 이용하여 주파수 대역을 효율적으로 사용하고 다중경로 페이딩 환경에서 강인한 특성을 가지고 있다. 그러나 OFDM 시스템에서 주파수 오프셋이 발생하면 부 반송파간의 직교성이 상실되고 서로 간섭을 일으켜 수신 신호의 오류가 증가하게 된다. 본 논문은 기존의 상관 방법을 개선하여 소수배의 오프셋을 예측하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 임의의 주파수 오프셋을 양과 음의 방향으로 인가한다. 그리고 임의의 주파수 오프셋이 있는 신호간의 상관값을 비교하여 소수배 주파수 오프셋을 추정하게 된다. 제안된 알고리즘은 전산 모의 실험에서 성능평가를 하였다.

## Abstract

An orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) system is effective to bandwidth because of orthogonality of subcarriers and robust to multipath fading. However, if there is a frequency offset, we lose the orthogonality of subcarriers and that results in inter-carrier interference(ICI) which increases errors in the system. In this paper, we propose an algorithm that estimates the fine frequency offset using a correlation method in OFDM systems. This scheme compares two correlation values in different frequency offsets with opposite directions. From the difference between two correlation values we can derive a fine frequency offset estimation algorithm. Its performance is verified by computer simulations.

**Keywords :** Synchronization, Frequency Offset Estimation, OFDM

## I. 서 론

고속의 데이터 전송을 위해서 전송대역을 효율적으로 사용하는 OFDM은 널리 사용되고 시스템중 하나이다. OFDM은 무선 도시권 통신망(WMAN, IEEE802.16d/e), 무선 근거리 통신망(WLAN, IEEE802.11a/g/n), 디지털 오디오 방송(Digital Audio Broadcasting : DAB)<sup>[1]</sup>, 디지털 비디오 방송(Digital video Broadcasting : DVB)<sup>[2]</sup>, 고선명 텔레비전 지상파 방송 등의 고속 데이터 전송

시스템의 표준 전송방식이며 4G에서도 표준이 유력시 되고 있다.

OFDM은 단일 주파수 전송방법과는 달리 전체 대역을 다수의 부반송파로 나눠 서로 직교하도록 하여 데이터를 전송하는 변조 기법이다<sup>[3]</sup>. 또한 전치부호(cyclic prefix)를 보호구간으로 두어 심볼간 간섭(ISI, inter symbol interference)을 제거하도록 하였다. OFDM은 단일 반송파 변조 방식에 비해 등화기가 간단하며 페이딩 환경에서 강인한 장점을 가지고 있지만 동기에 민감한 단점이 있다. 동기는 시간 동기와 주파수 동기로 나눌 수 있으며 주파수 동기가 맞지 않을시 부 반송파의 직교성이 파괴되어 오류가 증가 하게 된다.

부반송파의 주파수 간격이 조밀한 OFDM 시스템은 작은 주파수 오프셋에도 영향을 민감하게 받게 된다. 이를 보상하기 위해서는 대략적으로 부반송파 간격의 정

\* 학생회원, \*\* 평생회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

※ 이 논문은 교통체계 효율화 사업 “u-Transportation 기반 기술 개발” 연구단 과제 2세부과제 “u-TSN 통신프로토콜 및 모듈 개발”과 Brain Korea 21의 지원으로 수행되었음

접수일자: 2009년1월23일, 수정완료일: 2009년5월18일

수배에 해당하는 주파수 옵셋을 먼저 찾은 다음 소수 자리의 미세 주파수 옵셋을 찾게 된다. 기존의 대략적 주파수 동기 방법으로 부반송파가 0인 보호대역을 이용하는 Presetyo 알고리즘, OFDM 심볼내에 이미 알고있는 파일럿의 FFT 출력값을 이용한 Classen 알고리즘과 Nogami 알고리즘 등이 있다<sup>[4~6]</sup>. 미세 주파수 동기 알고리즘으로는 보호구간과 유효 데이터 구간의 위상변화량을 사용하는 Beek 알고리즘과 Daffara 알고리즘 등이 있으며 상관관계를 이용한 Moose 알고리즘 등이 있다 [7~9].

본 논문은 상관관계를 이용한 정수배 알고리즘을 바탕으로 강제로 주파수 천이시 상관값을 이용한 새로운 소수배 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 소수배 주파수 옵셋이 없을 때 주파수간 간섭(ICI, inter carrier interference)이 없어 상관 값이 크다는 사실을 이용하였다.

본 논문의 구성은 서론에 이어 II장에서는 일반적인 OFDM 시스템의 개요와 주파수 옵셋에 대해서 알아보고 III장에서는 상관방법을 이용한 대략적 주파수 추정 알고리즘에 대해서 알아본다. IV장에서는 소수배 추정 알고리즘을 제안하며 V장에서는 제안된 알고리즘을 DVB-T 수신기 모뎀에서 검증하였다. 마지막으로 VI장에서는 결론을 맺는다.

## II. OFDM 시스템과 주파수 옵셋

일반적으로 송신기와 수신기의 변복조 주파수는 오실레이터의 발진 주파수 불일치로 인해 약간의 오차를 가지게 된다. 이러한 현상은 일반적인 통신시스템에서 주파수 동기 옵셋 오류를 일으키게 되며 특히 OFDM에서는 부반송파간의 직교성을 깨트려 수신된 신호의 오류를 유발시키게 된다. 그러므로 송신기와 수신기의 차이를 보상하게 해주는 주파수 동기는 OFDM에서 오류 없는 통신을 위해서 매우 중요하다.

그림 1은 일반적인 OFDM의 시스템을 나타낸다.  $N$  개 부반송파를 갖는  $i$  번째 OFDM 심볼의 기저대역 신호는 시각  $iT_N \leq t < (i+1)T_N$  에서 다음과 같다.

$$x_i(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k(k) e^{j2\pi(k\Delta f)t} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 부 반송파의 위치를  $X_k(k)$ 는  $k$  번째 부반송파를 통해 전송되는 데이터의 성상을 나타낸다. 또한  $T_N$ 은

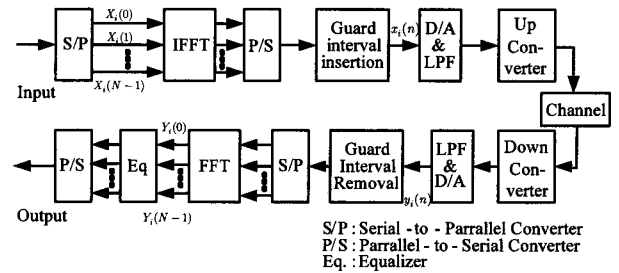


그림 1. OFDM 시스템 구성도

Fig. 1. The structure of OFDM system.

OFDM 한 심볼의 길이를,  $\Delta f = 1/T_N$ 는 인접한 부반송파간 주파수 간격을 나타낸다. 기저대역의 신호를 무선 채널로 전송하기 위해 주파수  $f_c$ 와 위상  $\theta_i$ 인 반송파를 사용하면 전송 신호는 다음과 같다.

$$x_{c,i}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k(k) e^{j(2\pi(f_c + k\Delta f) + \theta_i)t} \quad (2)$$

수신기에서 식(2)의 신호는 주파수  $\hat{f}_c$ 와 위상  $\theta_r$ 을 가지는 국부 발진기를 통해 복조된 신호는

$$y_i(t) = e^{j(2\pi\epsilon t + \theta_e)} \sum_{k=0}^{N-1} X_k(k) e^{j2\pi(k\Delta f)t} + w(t) \quad (3)$$

이다. 여기서  $\epsilon = f_c - \hat{f}_c$ 과  $\theta_e = \theta_i - \theta_r$ 는 각각 주파수 옵셋과 위상 오류를 나타내며  $w(t)$ 는 가산성 백색 잡음이다. 식(3)을 송신단과 같이 표본화 간격  $nT_N/M$ [sec]로 샘플링 하면

$$y_i(n) = x_i(n) e^{j(2\pi\hat{\epsilon}n/N + \theta_e)} + w(n) \quad (4)$$

이다. 여기서  $\hat{\epsilon}$ 는  $\epsilon T_N$ 을 의미한다.

그림 2는 주파수 옵셋  $\hat{\epsilon}$ 에 의한 ICI(inter-carrier

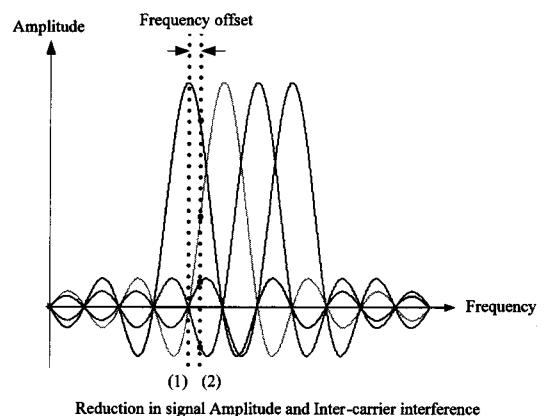


그림 2. 주파수 옵셋과 ICI

Fig. 2. Frequency offset and ICI.

interference)를 보여준다. 식(4)에서 주파수 오프셋  $\hat{\epsilon}$ 은 부반송파의 위치를 그림 2의 점선 (1)에서 (2)로 이동하게 한다. 이로 인해 OFDM 부반송파간의 직교성이 깨어지게 되며 원래 부반송파 위치의 성상은 다른 부반송파의 성상에 영향을 받게 되어 전체 시스템의 오류는 증가하게 된다.

### III. 주파수 오프셋 추정 알고리즘

반송파 주파수 오프셋은 OFDM 신호의 부반송파 간격으로 정규화하여 정수부와 소수부 주파수 오프셋으로 나누어진다. 정수배 주파수 예측은 주로 파일럿 신호를 이용한다. 파일럿 신호는 데이터의 전력보다 큰 값을 가지므로 파일럿만의 전력 합을 구하게 되면 데이터의 전력합보다 큰 값을 가지게 된다. 이러한 특성은 정수배 주파수 오프셋 추정에 이용할 수 있다. OFDM 시스템에서 연속 파일럿은 매 심볼마다 같은 위치에 존재한다. 그러므로 반송파 오프셋이 존재하는 경우 정해진 연속 파일럿의 위치를 이동시켜 신호 전력 합을 구할 수 있다. 이때, 이 값이 가장 크게 나타나는 곳을 찾아서 정해진 위치와의 차이를 구하게 되면 정수배 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

정수배 주파수 동기 추정을 위해 먼저 다음과 같은 상관값을 구한다.

$$C_m = \left| \sum_{k=p_m} Y_{i+1}(k) \cdot Y_i(k)^* \right| \quad (5)$$

여기서  $Y_i(k)$ 는 식(4)의 수신된 신호를 FFT(fast Fourier transform)한 값이며,  $i$ 는 심볼 번호,  $k$ 는 부반송파 번호를 나타낸다. 그리고  $p_m$ 은 연속 파일럿이 위치에 대한 부반송파 번호의 집합으로 다음과 같다.

$$p_m = [p_1 + m, p_2 + m, \dots, p_l + m] \quad (6)$$

여기서  $l$ 은 심볼이 포함하고 있는 연속 파일럿의 개수이며,  $m$ 은 주파수 오프셋을 추정하는 범위를 나타낸다.  $m$ 의 값에 따른 상관 값의 최대값을 찾으면

$$\Delta \hat{f}_{\text{integer}} = M = \arg \max_{\epsilon \in m} C_m \quad (7)$$

이며, 정수부 주파수 오프셋  $M$ 을 추정할 수 있다.

정수부 오프셋을 추정 한 후에는 소수부 오프셋의 추정을 필요로 한다. 비록 정수부에 의한 주파수 오프셋의 추정

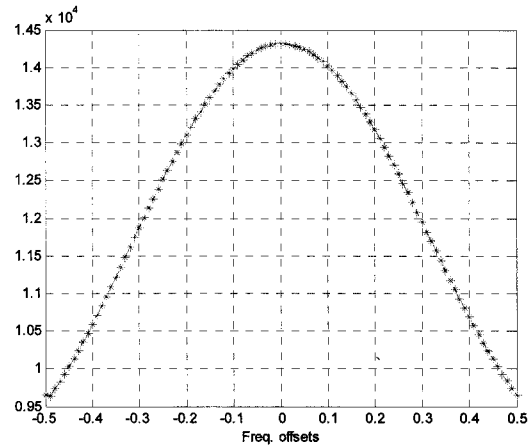


그림 3. 주파수 오프셋에 따른 파일럿 톤의 상관값 크기 (200심볼 누적)

Fig. 3. The magnitude of the pilot tones' correlation value according to frequency offset(accumulate 200 symbols).

을 완료했다라도 소수부 주파수 오프셋이 있다면 여전히 ICI가 존재한다.

기존의 소수부의 주파수 오프셋 추정을 위한 대표적 알고리즘으로는 Beek 알고리즘과 Moose 알고리즘이 있다. Moose 알고리즘은 한 심볼 동안의 시간차이로 인해 발생하는 주파수 영역의 위상 차이를 계산하여 다음과 같이 추정하였다.

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi T} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \text{Im} [ Y_{l+1}(k) \cdot Y_l(k)^* ]}{\sum_{k=0}^{N-1} \text{Re} [ Y_{l+1}(k) \cdot Y_l(k)^* ]} \right\} \quad (8)$$

여기서 Re와 Im은 복소수의 실수부와 허수부를 가리키며, \*은 복소공액이다.

Beek는 시간 영역에서 보호 구간과 유효 데이터 구간의 후반부간의 위상 변화량을 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 주파수 오프셋의 추정 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{2\pi T} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^L \text{Im} [ y_i(N-i) \cdot y_i(N-i)^* ]}{\sum_{i=1}^L \text{Re} [ y_i(N-i) \cdot y_i(N-i)^* ]} \right\} \quad (9)$$

IV. 제안하는 주파수 추정 알고리즘

본장에서는 연속 파일럿을 이용하여 소수배 주파수 동기를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 기존의 주파수 동기는 대략적 동기 주파수 영역에서 가장 가까운 지점을 찾아 정수배로 보상하게 된다. 이후 반송파 간격의 절반 이하의 미세 주파수를 추정하여 보상한다.

이상적인 채널에서 식(7)과 같이 상관값을 누적시켜 소수배 주파수 오프셋에 따라 살펴보면 그림3과 같이 주파수 오프셋 부호와 무관하게 동일한 값을 가짐을 알 수 있다. 소수배의 주파수 오프셋에 따라서 각 반송파 위치의 성상이 양의 방향과 음의 방향으로 회전하는 각도가 같기 때문이다. 이러한 결과를 상관값을 이용한 정수배의 주파수 동기 알고리즘에 적용시켜 소수배의 주파수 동기 알고리즘을 도출 할 수 있다.

제안하는 알고리즘의 블록도를 그림 4에 나타낸다. 시간영역의 신호 식(4)에서 한 심볼을 택해 양의 방향과 음의 방향으로 각각 0.1의 임의의 오프셋을 인가하면 그 결과는 다음과 같다.

$$y_{i,pre}(n) = x_i(n)e^{j(2\pi(\hat{\epsilon}+0.1)n/N+\theta_e)} + w(n) \quad (10)$$

$$y_{i,post}(n) = x_i(n)e^{j(2\pi(\hat{\epsilon}-0.1)n/N+\theta_e)} + w(n) \quad (11)$$

식 (7)에서 정수배의 주파수 오프셋 M을 추정하며 상관값이 최대가 되는  $C_M$ 을 구할 수 있다. 식(10)과 식(11)을 주파수 오프셋 M의 위치에서 식(5)과 같이 상관을 취하면

$$C_{M\_pre} = \left| \sum_{k=p_M} Y_{i+1,pre}(k) \cdot Y_{i,pre}(k)^* \right| \quad (12)$$

$$C_{M\_post} = \left| \sum_{k=p_M} Y_{i+1,post}(k) \cdot Y_{i,post}(k)^* \right| \quad (13)$$

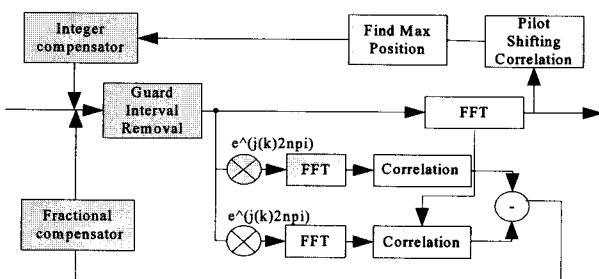


그림 4. 제안하는 주파수 동기 블록도  
Fig. 4. The proposed frequency synchronization blocks.

이다. 여기서  $Y_{i,pre}(k), Y_{i,post}(k)$ 는 각각 식(10)과 (11)을 FFT한 결과이다. 식(12)와 식(13)을 이용하여 주파수 오프셋  $\Delta \hat{f}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta \hat{f} = 0.12 \sin^{-1} \frac{(C_{M\_post} - C_{M\_pre})}{|C_{M\_post} - C_{M\_pre}|} \quad (14)$$

V. 실험결과

본 논문에서 제안한 소수배 동기 구조의 성능 평가를 위하여 대역이 8MHz인 DVB-T 시스템의 수신기 모델을 구현하여 전산모의실험을 수행하였다. 본 실험은 CNR(carrier to noise ratio)을 5dB로 고정하였으며 정규화된 주파수 오프셋의 범위를 약 -0.2에서 0.2로 두었다. 채널의 환경은 DTV의 수신테스트에 일반적으로 사용되는 TU-6 채널과 브라질 D채널을 사용하였다. 이동 환경을 모델링한 TU-6 채널에서 도플러 주파수가 500Hz인 고속 이동상황에서 주파수 추정 성능의 실험 결과는 그림 5와 같다. 그림 5에서 제안된 알고리즘은 주파수 오프셋이 0일 때 -0.01 추정하여 0.04와 0.03을 추정한 Moose와 Beek의 알고리즘에 비해 더욱 우수한 성능을 보여준다. 이러한 결과는 제안된 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 도플러 주파수에 강하여 이동채널에 적합한 것을 보여 주고 있다. Rayleigh 다중 채널로서 아주 열악한 채널중의 하나인 브라질 D 채널의 실험 결과는 그림 6과 같다. 그림6에서 제안된 알고리즘은 Moose와 Beek의 알고리즘과 동일하게 0를 선형적으로

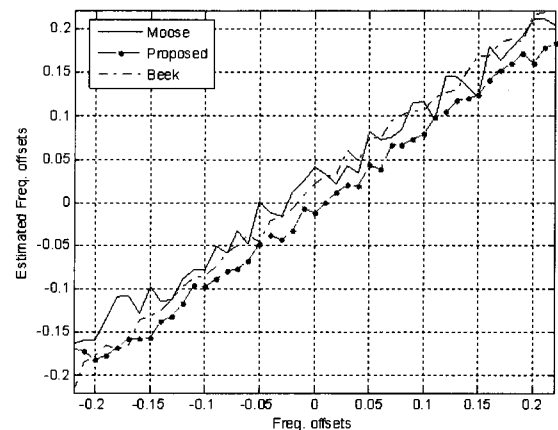


그림 5. 소수배 주파수 오프셋에 따른 S 커브(TU-6 채널)  
Fig. 5. S curve according to fractional frequency offset (TU-6 channel).

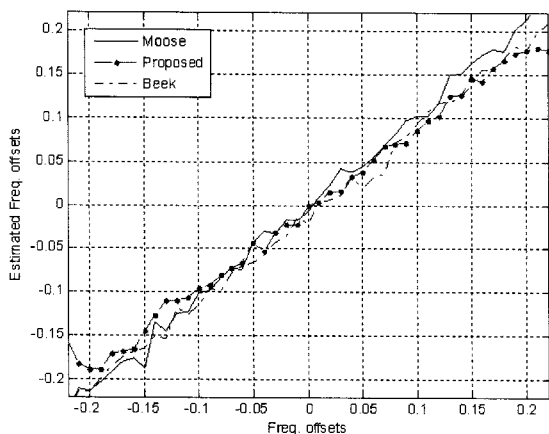


그림 6. 주파수 오프셋에 따른 S 커브(브라질 D채널)  
Fig. 6. S curve according to fractional frequency offset (Brasil D channel).

지나고 있다. 이것은 제안된 알고리즘이 거의 동일한 성능을 가짐을 보여준다.

## VI. 결 론

본 논문에서 이동환경에 적합한 소수배 주파수 동기 알고리즘을 제안하였으며 전산모의 실험을 통해 성능을 검증하였다. 제안된 알고리즘은 강제로 주파수를 천이시킨후 상관값을 이용하여 소수배 주파수 오프셋을 추정하므로 도플러 주파수가 높은 고속의 이동 채널에서도 안정적인 주파수 추정이 가능하였다. 또한 Rayleigh 다중채널에서도 기존의 알고리즘과 동일한 성능을 지고 있음을 알 수 있었다. 본 논문의 알고리즘은 연속된 파일럿을 사용하는 OFDM 시스템에서 적용할 수 있으며 고속 이동 채널에서 주파수 동기 성능이 우수한 장점이 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] ETSI EN 300 401, "Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting(DAB) to mobile, portable and fixed receivers", 1994
- [2] Final draft "ETSI EN 300 744 v1.5.1", June 2004.
- [3] J. Jo, H. Kim and D. S. Han, "Residual frequency offset compensation for IEEE 802.11a," in Proc. VTC2004-Fall, vol. 3, pp. 2201-2204, LA, Sept. 2004.
- [4] B. Y. Prasetyo, F. Said and A. H. Aghvami, "On the guard band-based coarse frequency

offset estimation technique for burst OFDM systems" in Proc. VTC2000-Spring, vol. 1, pp. 220-224, Tokyo, 2000.

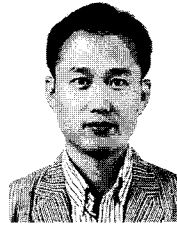
- [5] F. Classen and H. Meyr, "Frequency synchronization algorithms for OFDM systems suitable for communication over frequency selective fading channels," in Proc. VTC-1994, vol.3, pp.1655-659, 1994.
- [6] H. Nogami and T. Nagashima, "A frequency and timing period acquisition technique for OFDM systems," in Proc. PIMRC-1995, vol.3, pp.1010-1015 1995.
- [7] J. J. van de Beek, M. Sandell, and P. O. Börjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 45, pp. 1800-1805, July 1997.
- [8] F. Daffara, O. Adami, "A new frequency detector for orthogonal multicarrier transmission techniques," in Proc. VTC1995, vol.2, pp.804-809, 1995.
- [9] P. H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," IEEE Trans. Commun., vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, Oct. 1994.

## 저 자 소 개



강 은 수(학생회원)  
 2006년 경북대학교 전자전기  
 공학부 학사 졸업.  
 2008년 경북대학교 전자전기  
 컴퓨터학부 현재  
 2008년~현재 경북대학교  
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : OFDM 시스템,  
 차세대 방송 시스템>



한 동 석(평생회원)  
 1987년 경북대학교  
 전자공학과 공학사  
 1989년 KAIST 전기 및  
 전자공학과 공학석사  
 1993년 KAIST 전기 및  
 전자공학과 공학박사  
 1987년 10월~1996년 8월 삼성전자  
 기술총괄 신호처리 연구소 선임연구원  
 1996년 8월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터  
 학부 교수  
 2006년 7월~2008년 7월 정보통신연구진흥원  
 디지털TV/방송사업단 단장  
 <주관심분야 : 차세대 방송 시스템 및 이동통신  
 신호처리>