

논문 2007-44TC-7-10

# 채널 임펄스 응답을 이용한 OFDM 시스템 시간 동기

## ( Timing Synchronization with Channel Impulse Response in OFDM Systems )

강 은 수\*, 한 동 석\*\*

( Eun Su Kang and Dong Seog Han )

## 요 약

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)은 페이딩 환경에서 높은 전송율을 가지는 효율적인 전송 기법이다. 그러나 OFDM 프레임의 시작 시점을 정확히 찾지 못하면 주파수 영역에서 위상회전으로 인해 수신 데이터의 비트오율이 높아진다. 그러므로 코히어런트 OFDM 시스템에선 정수배의 샘플 옵셋뿐만 아니라 소수배의 샘플 옵셋까지 동기를 획득해야 한다. 본 논문에서는 코히어런트 OFDM 시스템에서 수신된 훈련 심볼의 상관관계를 이용하여 0.5 샘플 이전과 이후의 충격응답을 각각 구하고 이들의 차를 이용하여 소수배 샘플 동기를 획득하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 심볼 타이밍 동기 기법의 성능을 다중경로 채널과 잡음에 대한 모의실험을 통하여 검증한다.

## Abstract

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) is an effective modulation technique for high speed transmission over fading channels. However, it has a high bit error rate in the receiver if there is an error on frame synchronization because of phase rotation. A coherent OFDM system has to acquire exact timing synchronization of fraction and integer sampling positions. When a sampling offset exist the performance of a receiver will be degraded severely. In this paper, we propose an algorithm that acquires the fractional sampling offset in OFDM systems. This scheme compares the channel impulse responses with the early and late sampled signals having 0.5 sample offset from the estimated sampling positions by correlation with the received and training samples. Its performance is verified by computer simulations in multipath channels.

**Keywords :** OFDM, symbol timing synchronization, timing recovery

## I. 서 론

최신의 통신 시스템인 DMB(digital multimedia broadcasting)와 와이브로에서 차세대 이동통신과 홈 네트워크 시스템에 이르기까지 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 변조가 다양하게 적용되고 있다. OFDM 시스템은 높은 전송률을 제공하고, 직교관계를 갖는 다수의 부 반송파를 이용하여 심볼 간

의 간섭 문제를 해결하였으며 보호구간(guard interval)을 두어 다중경로 지연에 민감하지 않다. 그러나 OFDM 시스템은 동기 알고리즘에 취약한 단점을 지니고 있다. 즉, 송신기와 수신기의 반송파 주파수의 불일치로 인한 반송파 주파수 옵셋은 반송파간 간섭(inter-carrier interference, ICI)을 유발시킨다. 그리고 OFDM 심볼의 동기를 정확히 획득하지 못하면 심볼 간의 간섭(inter-symbol interference, ISI)을 일으키며 이로 인해 시스템의 성능은 저하된다<sup>[1~2]</sup>.

OFDM 전송시스템에서 동기는 반송파 주파수 동기와 심볼 타이밍 동기로 구분 된다. 심볼 타이밍 동기의 목적은 OFDM 프레임의 정확한 위치를 찾는 것이다. 이러한 과정은 수신기에서 약속되어진 훈련 심볼들을

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

※ 이 논문은 Brain Korea 21의 지원에 의하여 연구되었음

접수일자: 2007년4월27일, 수정완료일: 2007년7월2일

이용하여 심볼 동기를 획득한다. 훈련 심볼의 수를 줄이기 위해 OFDM 심볼의 보호구간이 심볼 동기에 사용될 수 있다<sup>[3]</sup>. 그러나 페이딩 채널을 통과한 심볼의 경우 보호구간은 심볼 간의 간섭으로 한 심볼 동안 반복적인 성질을 가지지 않게 되어 정확한 심볼 동기는 보장되지 않는다. 심볼 타이밍 에러가 존재하게 되면 심볼 간의 간섭이 발생되며 부 반송파의 직교성이 파괴되어 OFDM 시스템의 성능이 열화된다. 그리고 심볼 타이밍 에러는 코히어런트한 OFDM 시스템에서 채널 추정 성능을 열화시킨다<sup>[4]</sup>. 그러므로 코히어런트 OFDM 시스템에서 동기 조건을 만족시키기 위하여 정수배의 샘플 옵셋과 소수배의 샘플 옵셋까지도 보상할 수 있는 정확한 심볼 타이밍 동기 방법이 필요하다.

심볼 타이밍 동기는 훈련심볼과 사이클릭 프리픽스(cyclic prefix)의 주기성을 이용한 자기상관 방법을 주로 사용한다<sup>[3]</sup>. 이 방법은 자기상관 값이 임의의 임계치보다 커지는 시점을 OFDM 심볼의 동기 시점으로 획득한다. 자기상관 방법은 무선채널의 다중경로에 둔감하다는 장점이 있으나 잡음의 영향으로 최적의 임계치의 설정에 어려움이 있다.

훈련 신호와 수신된 신호의 상호 상관관계를 이용하여 심볼 동기를 획득하는 방법 또한 잡음과 다중 경로에 대한 임계치의 선정이 쉽지 않다<sup>[5]</sup>. 상호상관 방법의 정확도를 높이기 위하여 상관관계를 실수부와 허수부로 나누어 심볼 타이밍 동기를 획득하는 방법이 제안되었다<sup>[6]</sup>. 이 방법은 페이딩 채널에서 적절한 성능을 나타내지만 낮은 신호 대 잡음비에서는 동기 성능이 급격히 떨어진다.

본 논문에서는 상관방식을 이용하여 채널의 충격 응답<sup>[7]</sup>을 구한 뒤 이를 이용하여 0.5샘플 이전과 이후의 충격응답의 차를 통해 심볼 동기를 얻는 방법을 제안한다. 동기 타이밍의 성능을 검토하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 여러 가지 채널에서 제안 알고리즘의 동기 검출 성능을 분석한다.

## II. OFDM 시스템

$N$ 개의 부반송파를 갖는 OFDM 시스템의  $i$ 번째 OFDM 심볼을  $\{X_{i,n} | n = 0, \dots, N-1\}$ 로 표현하자. 송신기에서  $N$ 개의 데이터들이 부반송파에 실리게 되고 IFFT(inverse fast Fourier transform) 과정을 거치게 된다. 여기서 다중경로에 의해 발생하는 심볼 간의 간섭을 피하기 위해 보호구간을 삽입한다. 그 결과

시각  $t$ 에 송신되는 신호  $s(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} X_{i,n} \psi_{i,n}(t) \quad (1)$$

여기서  $\psi_{i,n}(t)$ 는 부반송파의 펄스로서

$$\psi_{i,n}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi(n/T_u)(t - \Delta - iT_s)}, & iT_s \leq t < (i+1)T_s \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

로 표현된다.  $T_s$ 는  $T_u + \Delta$ 로 보호구간을 포함하는 OFDM 한 심볼의 길이이며  $T_u$ 와  $\Delta$ 는 각각 IFFT된 신호의 길이와 보호구간의 길이이다.

송신된 신호가 시각  $t$ 에 따라 변하는 페이딩 채널  $h(\tau, t)$ 를 통과할 때,  $h(\tau, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$h(\tau, t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) \delta(\tau - \tau_l) \quad (3)$$

여기서  $h_l(t)$ 는 복소경로이득이며,  $\tau_l$ 은 경로지연시간,  $L$ 은 모든 경로의 개수이다. 수신기에서 동기를 정확하게 획득했다면 수신된  $k$ 번째 신호  $r(kT)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$r(kT) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(kT) s(kT - \tau_l) + n(kT) \quad (4)$$

여기서  $T = T_u/N$ 는 수신기에서의 샘플링 간격이며  $n(kT)$ 는 백색 가우스 잡음(AWGN)이다. 수신된 OFDM 심볼은 보호구간을 제거한 후  $N$ 샘플만 남게 되고 FFT를 통해 주파수 영역의 신호로 전환된다. 주파수 영역에서  $i$ 번째 OFDM 심볼의  $n$ 번째 부반송파는 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{i,n} = X_{i,n} H_{i,n} + N_{i,n} \quad (5)$$

여기서  $N_{i,n}$ 은 주파수 영역에서 백색 복소 가우스 잡음이다.  $H_{i,n}$ 은 부반송파 주파수  $f_n = n/T_u$ 에서 채널의 주파수 응답으로

$$H_{i,n} = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(iT_s) e^{-j2\pi\tau_l n/T_u} \quad (6)$$

와 같다.

본 논문에서 채널은 한 OFDM 심볼 내에서 변하지 않으며 보호구간은 채널의 가장 큰 지연확산보다 크다

고 가정한다. 일반적으로 송·수신기의 변·복조 주파수의 불일치 및 도플러 현상으로 반송파 주파수 오프셋  $\Delta f$ 가 존재 하거나 도플러 주파수가 존재하게 된다. 이러한 현상은 송·수신기간의 타이밍 오차가 있을 때에도 동일하게 발생한다.  $\theta_0$ 를 OFDM 심볼의 보호구간을 제외한 첫 번째 샘플의 위치를 나타내며  $\hat{\theta}_0$ 를 이것의 추정 위치라고 할 때, 심볼 타이밍 에러는  $e_\theta = \theta_0 - \hat{\theta}_0$ 로 나타낼 수 있다.

### III. 제안 심볼 타이밍 동기

심볼 타이밍 동기는 정수부 동기 획득과 소수부 동기 획득으로 나눌 수 있다. DQPSK와 같이 차분 변조를 사용한 시스템에서는 정수부의 동기만 획득해도 성능에 큰 이상이 없지만 QPSK나 QAM 등의 코히어런트한 신호는 소수부까지 심볼 타이밍 동기를 획득하여야만 성능이 보장된다.

그림 1에 제안 알고리즘을 블록도로 나타내었다. 수신된 신호에서 임의의  $k$ 번째 샘플에서  $k+N-1$ 번째 샘플을  $y_k$ 라 하자. 즉,

$$y_k = \{r(kT), r((k+1)T), \dots, r((k+N-1)T)\} \quad (7)$$

이다. 주파수 영역의 파일럿 신호를

$$X = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N-1}\} \quad (8)$$

라 하면  $y_k$ 의 주파수 영역신호  $Y_k$ 를  $X$ 의 켈레복소 함수와 상호상관을 취한 시간영역의 신호  $p(jT)$ 는

$$p(jT) = IFFT\{Y_k \cdot X^*\}, \quad j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

이다. 만약 정확한 동기를 획득하였다면  $p(jT)$ 가  $j=0$ 에 최대 충격파가 있게 된다. 마찬가지로 한 샘플

의 오차가 있으면  $p(jT)$ 가  $j=\pm 1$ 에 최대 충격파가 있게 된다. 최대 충격파가 나타나는 지점  $k_{max}$ 는 다음과 같이

$$k_{max} = \max_k (IFFT\{Y_k \cdot X^*\}) \quad (10)$$

이다. 식(10)을 이용하여 주파수 영역에 위상을 조정하여 시간영역에서  $y_k$ 가  $k$ 를 기준으로 0.5샘플 이전과 이후의 신호를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_e(jT) = IFFT\{Y_k e^{j2\pi k(0.5)/N} \cdot X^*\} \quad (11)$$

$$h_l(jT) = IFFT\{Y_k e^{j2\pi k(-0.5)/N} \cdot X^*\}$$

동기가 정확히 획득되었다면 식(10)의  $k_{max}$  시점에서 이 두 값은 일치하게 되지만 동기를 획득하지 못하면 이들의 값이 달라진다. 이것을 이용하면 다음과 같이 동기 오차

$$e_\theta = \frac{|h_l(k_{max}T)| - |h_e(k_{max}T)|}{2\max(|h_l(k_{max}T)|, |h_e(k_{max}T)|)} \quad (12)$$

이다.

### IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본장에서는 제안 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 DAB 규격<sup>[8]</sup>을 따라 OFDM 시스템을 구성하여 모의실험을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 조건은 표1과 같다. 한 OFDM 심볼의 전체 부반송파 개수는 2048, OFDM 심볼 보호구간은 유효 심볼길이의 1/4, 데이터 변조방식은 QPSK로 하였다. 프레임은 DAB의 규격과 같이 첫 심볼은 알고 있는 훈련 심볼로 나머지는 전송 데이터 심볼로 구성하였으며 몇 가지 패턴의 채널에 대하여 제안 알고리즘과 기존의 알고리즘<sup>[6]</sup>을 비교 하였다. 레일리 페이딩 환경에서도 비교적 동작을 잘하는

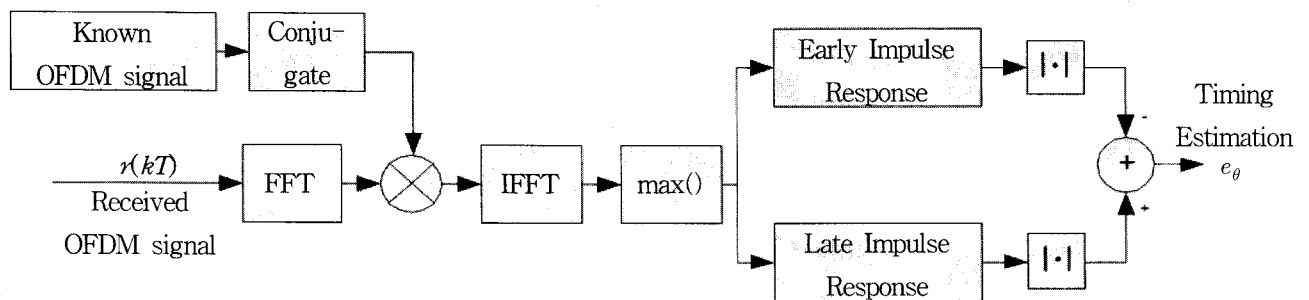


그림 1. 제안하는 심볼 타이밍 알고리즘의 블록도  
Fig. 1. The block diagram of the proposed symbol timing algorithm.

우수한 알고리즘으로 알려져 있는 기존의 알고리즘을 비교대상으로 하였다. 실험 시 수신단에서의 반송파 주파수 오프셋은 없다고 설정하였다.

그림 2에서 그림 4까지는 AWGN 채널에서  $E_b/N_0$ 가 각각 5 dB, 10 dB, 20 dB 일 때 두 알고리즘의 심볼 타이밍 오차 예측 특성을 나타내었다. 기존 알고리즘은  $E_b/N_0$ 가 10 dB 이하에서 정확히 동기오차를 찾지 못함을 알 수 있다. 반면, 제안 알고리즘은  $E_b/N_0$ 에 영향을 받지 않으며 타이밍 오프셋이 -0.5에서 0.5사이일 때, 선형적인 특성을 지니며 정확히 오차를 찾고 있음을 알 수 있다. 이는 제안 알고리즘은 열악한 환경에서도 잘 동작하므로 수신기 성능향상에 큰 도움을 줄 수 있다.

원신호와 다중경로 신호의 크기가 같은 단일 주파수 네트워크(SFN) 채널에서의 실험 결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 다중경로 신호의 지연시간은 각각 보호구간의 10%(약50샘플)와 90%(약450샘플)이며 주경로 신호와 크기가 같으며  $E_b/N_0$ 가 20 dB인 경우이다. SFN

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. The condition of simulation.

Symbol Interval	2552 T(1.246ms)
No. of Subcarrier	1536
IFFT/FFT Period	2048
GI Duration	504 T(246μs)
Subcarrier Mode	QPSK
1 Frame	76 심볼
Traning Symbol	프레임의 OFDM 첫 번째 심볼
Elementary Period	T(1/2048000s)

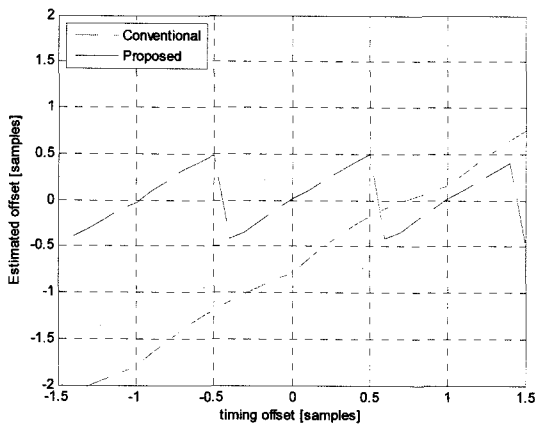


그림 2. AWGN채널( $E_b/N_0=5$  dB)에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

Fig. 2. The symbol timing characteristic curve in AWGN channel( $E_b/N_0=5$  dB).

채널에서의 동기는 다중경로 신호와 원 신호의 크기가 동일하므로 원 신호와 지연된 신호의 구분이 어려워 동기 획득이 매우 어렵다. 제안 알고리즘은 SFN 채널에서 잔존 타이밍 오프셋이 -0.5에서 0.5일 때, 선형적인 특성을 가지면서 0을 지난다. 이는 소수배의 심볼 타이밍 동기를 정확히 획득하고 있음을 보여준다.

도플러 천이가 10 Hz인 레일리 채널<sup>[9]</sup>에서 두 알고리즘의 특성은 그림 7과 같다. 제안 알고리즘은 AWGN이나 SFN 환경과 같이 정확히 동기를 획득하고 있음을 알 수 있다.

제안 알고리즘은 0.5 샘플간격이내에서 본 논문에서 실험한 모든 채널에서 정확히 타이밍 오차를 추정하며 소수배의 동기를 획득함을 알 수 있다.

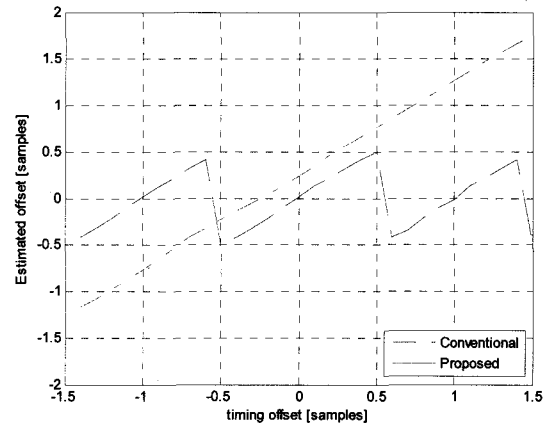


그림 3. AWGN채널( $E_b/N_0=10$  dB)에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

Fig. 3. The symbol timing characteristic curve in AWGN channel( $E_b/N_0=10$  dB).

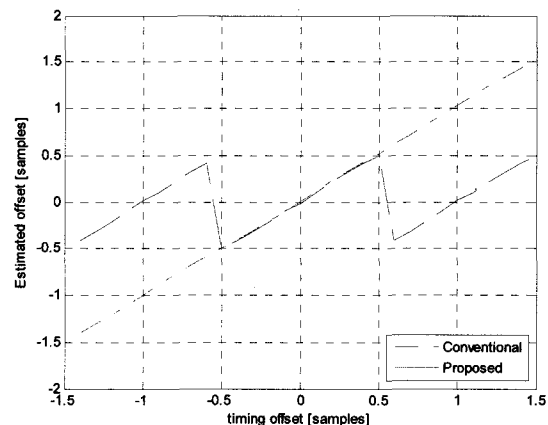


그림 4. AWGN채널( $E_b/N_0=20$  dB)에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

Fig. 4. The symbol timing characteristic curve in AWGN channel( $E_b/N_0=20$  dB).

### V. 결 론

본 논문에서는 소수점 이하의 심볼 타이밍 옵셋을 찾아 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 잔존 타이밍 옵셋이 -0.5에서 0.5 샘플간격일 때 보호구간의 90%까지 지연된 다중경로 신호가 존재하는 SFN 채널과 레일리 채널에서도 동기를 획득하였다. 제안 알고리즘은 코히어런트 OFDM 시스템의 정수배 및 소수배의 심볼 타이밍 동기화에 적용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] M. Speth, F. Classen, and H. Meyr, "Minimum overhead burst synchronization for OFDM based broadband transmission," *Proc. GLOBECOM'98*, Nov. 1998, pp. 3227-3232.
- [3] 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.
- [4] M. Speth, F. Classen, and H. Meyr, "Frame synchronization of OFDM systems in frequency selective fading channels," *Proc. VTC'97*, May 1997, pp. 1807-1811.
- [5] R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multi-media communications*, Artech House, 2000.
- [6] Y. J. Ryu, and D. S. Han, "Timing phase estimator overcoming Rayleigh fading channel for OFDM systems," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol.47, no. 3, pp. 370-377, Aug. 2001.
- [7] B. Yang, K. B. Letaief, S. Cheng, and Z. Cao, "Timing recovery for OFDM Transmission," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 2278-2291, Nov. 2000.
- [8] ETSI EN 300 401, "Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting(DAB) to mobile, portable and fixed receivers", 1994.
- [9] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1995.

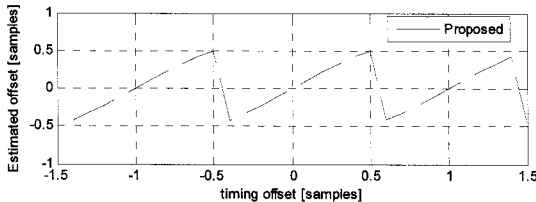
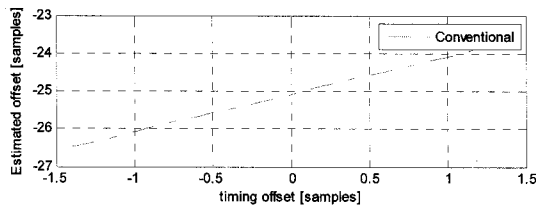


그림 5. 보호구간의 10%(50sample)지연된 SFN 채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

Fig. 5. The symbol timing characteristic curve in SFN channel delayed 10%(50sample) of a guard interval.

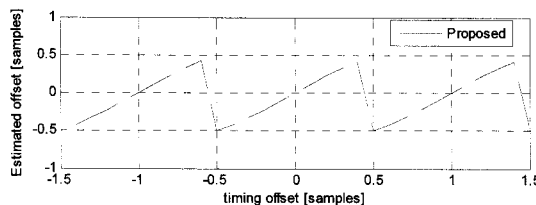
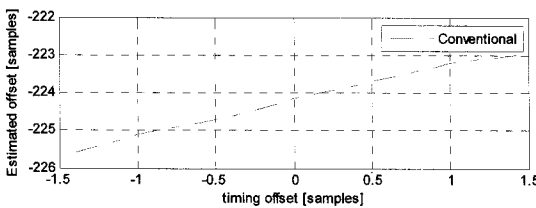


그림 6. 보호구간의 90%(450sample)지연된 SFN 채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

Fig. 6. The symbol timing characteristic curve in SFN channel delayed 90%(450sample) of a guard interval.

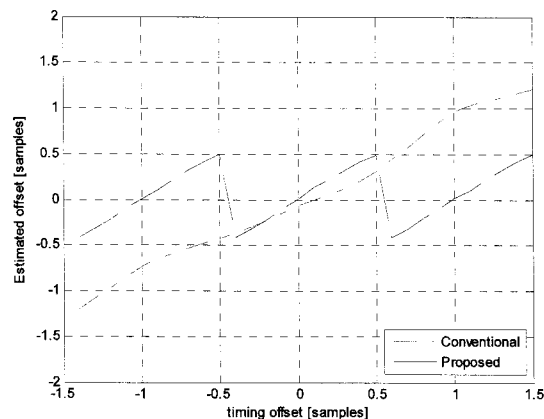


그림 7. 레일리 채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

Fig. 7. symbol timing characteristic curve in Rayleigh channel.

## 저 자 소 개



강 은 수(학생회원)  
 2006년 경북대학교 전자전기  
 공학부 학사 졸업.  
 2006년~현재 경북대학교  
 전자공학과 석사과정  
 <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  
 1987년10월~1996년 8월 삼성전자 기술총괄  
 신호처리 연구소 선임연구원  
 1996년 8월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터  
 학부 부교수  
 2006년 7월~현재 정보통신연구진흥원 디지털  
 TV/방송사업단 단장  
 <주관심분야 : 차세대 방송 시스템 및 이동통신  
 신호처리>