

QPSK변조를 이용한 OFDM 시스템의 심볼 타이밍 동기

강은수 임채현 한동석

{kesno1, chlim, dshan}@ee.knu.ac.kr

Symbol timing synchronization for OFDM by using QPSK modulation

Kang, Eun Su Lim, Chae-Hyun Han, Dong Seog

Kyungpook National University

요약

OFDM(orthogonal frequency division modulation)은 주파수 선택적인 페이딩 환경에서 높은 전송율과 빠른 속도를 가지는 효율적인 전송 기법이다. 그러나 OFDM 심볼이 시작되는 지점을 정확히 찾지 못하면 시간 영역에서 위상회전으로 인해 수신 데이터의 BER(bit error rate)이 높아질 수 있다. QPSK(quadrature phase shift keying)변조를 이용한 OFDM 시스템에선 정수배의 샘플 옵셋만 아니라 소수배의 샘플 옵셋까지 보상하여 동기를 획득해야 한다. QPSK 심볼 복조 시 소수배의 샘플 옵셋이 존재할 경우 시스템의 수신 성능은 떨어지기 때문이다. 본 논문에서는 QPSK변조를 이용한 OFDM 시스템에서 소수배의 샘플 옵셋이 존재할 경우 동기를 획득하는 방법에 대해 제안한다. 본 논문에서 제안된 심볼 타이밍 동기 방법은 수신된 트레이닝 심볼의 상관관계를 이용하여 0.5 샘플 이전과 이후의 충격응답을 각각 구하여 이들을 차를 이용하여 동기를 획득한다. 제안한 심볼 타이밍 동기 기법의 성능은 멀티패스의 모델화 채널을 적용한 모의실험을 통하여 검증하였다.

1. 서론

최근 OFDM(orthogonal frequency division modulation) 시스템이 DMB(digital multimedia broadcasting), 와이브로에서 차세대 이동통신과 홈 네트워크 시스템에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. OFDM의 시스템은 높은 전송율을 제공할 수 있고, 직교관계를 갖는 다수의 부 반송파를 이용하여 심볼 간의 간섭 문제를 해결하였으며 보호구간(guard interval)을 두어 지연 분포(delay spread)에 민감하지 않도록 하였다. 그러나 OFDM 시스템은 동기 알고리즘에 취약한 단점을 지니고 있다. 즉 송신기와 수신기의 반송파 주파수 오실레이터의 불일치로 인한 반송파 주파수 옵셋은 반송파간의 간섭(inter-carrier interference, ICI)을 유발시키며 OFDM 심볼의 동기를 정확히 획득하지 못해 샘플링 옵셋이 존재하면 심볼들 간의 간섭(inter-symbol interference, ISI)을 일으키며 이로 인해 시스템의 성능은 저하된다 [1],[2].

OFDM의 전송시스템에서 동기는 반송파 주파수 동기와 심볼 타이밍 동기로 구분 된다. 심볼 타이밍 동기의 목적은 FFT(fast fourier transform) 윈도우의 정확한 위치를 찾는 것이다. 이러한 과정은 수신기에서 약속되어진 트레이닝 심볼들을 이용하여 심볼 동기를 획득한다. 트레이닝 심볼의 수를 줄이기 위해 OFDM 심볼의 보호구간이 심볼 동기에 사용할 수 있다[3]. 그러나 다중경로의 페이딩 채널을 통과한 심볼의 경우 보호구간은 심볼 간의 간섭으로 한 심볼내 반복적인 성질을 가지지 않게 되어 정확한 심볼 동기는 보장되지 않는다. 심볼 타이밍 에러가 보호구간내의 심볼 간의 간섭을 일으키지 않는 범위 내에 있지 않다면 심볼 간의 간섭을 일으킬 것이며 부 반송파의 직교성을 파괴하고 OFDM 시스템의 성능을 저하시킨다[1]. 더욱이 코히어런트한 OFDM 시스템에서 보간법을 통한 채널 추정은 심볼 타이밍 에러

에 의해 성능이 저하된다[4]. 그러므로 코히어런트 OFDM 시스템 내에서 동기 조건을 만족시키기 위하여 좀 더 정확한 심볼 타이밍 방법이 필요로 한다.

본 논문에서는 상관에 기초하는 상관방식을 이용하여 채널의 충격 응답을 구한 뒤 이를 이용하여 0.5샘플 이전 이후의 충격응답의 차를 통해 심볼 동기를 얻는 방법을 제안하였다. 동기 타이밍의 성능을 검토하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 동기 검출 성능을 분석하여 보았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 일반적인 OFDM 시스템에 대해 살펴보고 3장에서는 본 논문에서 제안한 심볼 타이밍 검출 방식에 대해 기술한다. 4장에서는 동기 성능의 평가를 위하여 도입한 멀티패스의 모델화 채널들을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과에 대해 분석하고 5장에서는 결론을 맺는다.

2. OFDM 시스템

가. 신호와 채널 모델들

N 개의 부반송파를 갖는 OFDM 시스템을 살펴보자. OFDM 심볼은 $\{X_i, n=0, \dots, N-1\}$ 로 나타낼 수 있으며, i 는 OFDM 심볼의 수를 나타내며 N 은 부 반송파의 개수이다.

송신기에서 N 개의 심볼들이 N 개의 부반송파로 변조되어 IFFT(inverse fourier transform)을 하게되며 다중경로에 의해 유발되는 심볼 간의 간섭을 피하게 하기 위해 보호대역(guard band)을 설정한다. 그 결과 송신기에서 나오는 신호는 다음과 같이 표현 될 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 즉

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

로 표현된다. 여기서 T_s 는 $T_u + \Delta$ 로 보호대역을 포함하는 하나의 OFDM 심벌의 길이이며 Δ 는 보호대역의 길이이다.

송신된 신호가 다중경로 페이딩 채널인 $h(\tau, t)$ 을 지난다고 가정해 보자. $h(\tau, t)$ 는 다음과 같은 특성을 지닌다.

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

여기서 $h_l(t)$ 는 복소경로이득이며, τ_l 은 경로지연시간이며, L 은 모든 경로들의 개수이다. $\tau_0 = 0$ 은 경로 지연시간이 없는 단일 경로를 의미한다.

만약 수신기에서 동기를 이상적으로 정확하게 획득했다면 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 $T = T_u/N$ 는 샘플링 동안의 시간이며 $n(iT)$ 는 시간 영역에서 샘플된 백색 가우시안 잡음이다. 수신된 OFDM 심벌은 보호구간을 제거 후 N 샘플이 남게 되고 FFT를 통해 주파수 영역의 신호로 전환된다. OFDM 심벌이 i 번째이며 n 번째 부반송파를 FFT한 것은

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

이다. 여기서 $N_{i,n}$ 는 주파수 영역에서 백색 복소 가우시안 잡음이다.

부반송파 주파수 $f_n = n/T_u$ 에서 채널의 주파수 응답은 다음과 같다.

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

여기서 채널은 한 OFDM 심벌 내에서 변하지 않으며 보호구간은 채널의 가장 큰 지연확산 보다 크다고 가정한다.

나. 동기 예러

앞 절에서 이상적으로 정확한 동기 획득을 가정 하였지만 모든 경우에는 이런 동기 획득이 불가능하다. 일반적으로 수신기와 송신기의 오실레이터의 불일치로 인한 반송파 주파수 오프셋 Δf 가 존재 하거나 도플러 주파수가 존재하게 된다. 이러한 현상은 샘플링 시에도 동일하게 일어나는데 수신기의 샘플링 시간 T' 는 송신기의 샘플링 시간 T 와 보통 다르게 된다. OFDM 심벌의 시작점을 잘못 추정하면 심벌 타이밍 예러 생기게 된다. θ_0 를 OFDM 심벌의 보호구간을 제외한 첫 번째 샘플의 위치를 나타내며 $\hat{\theta}$ 를 추측되는 심벌 타이밍이라 할 때 심벌 타이밍 예러는 $e_\theta = \theta_0 - \hat{\theta}$ 로 나타낼 수 있다. 본 논문은 반송파 주파수 동기가 이미 획득되었다고 가정한다.

3. 제안하는 심벌 타이밍 동기

주파수 동기를 완벽하게 획득했을 때 심벌 타이밍 동기를 획득하지 못하면 ISI가 발생하게 된다. 이로 인해 수신기에서는 BER에 손해를 보게 된다. 심벌 타이밍 동기를 획득할 때 정수부의 오프셋이 존재할 시 동기를 획득하는 것과 소수점의 오프셋이 존재할 시 동기를 획득하는 방법으로 나눌 수 있다. DQPSK와 같이 차분 변조를 사용하여 전송한 때는 소수점의 오프셋을 무시할 수 있지만 QPSK나 QAM등의 코히어런트한 신호는 소수점까지 심벌 타이밍 동기를 획득하여야 한다.

제안하는 방법은 그림 1의 블록도와 같다. 수신된 OFDM 신호를 FFT를 취하여 주파수 영역의 신호로 변환시킨다. 주파수 영역의 트레이닝 신호를 공액복소함수로 취해 이를 변환된 신호와 곱한 뒤 IFFT를 취하여 채널의 충격응답 응답 $h(k)$ 를 구한다.

$$h_k = IFFT\{Y_k \cdot X_k^*\} \quad (7)$$

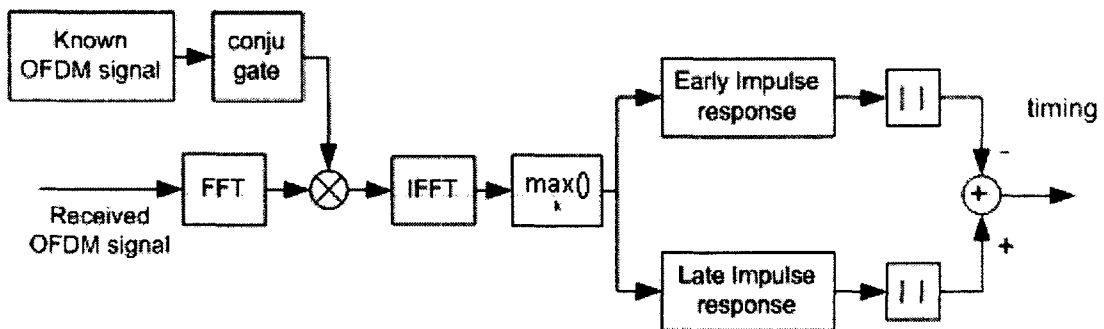


그림 1. 제안하는 동기 방법의 블록도

표1. 시뮬레이션 조건

symbol interval	2552T(1.246ms)
No. of subcarriers	1536
IFFT/FFT period	2048
GI duration	504T(246μs)
subcarrier mode	QPSK
1 frame	76 symbols
training symbol	프레임의 OFDM 심볼중 첫번째
elementary period	T(1/2048000s)

여기서 Y_k 와 X_k^* 는 각각 주파수 영역의 수신된 신호, 트레이닝신호의 공액 복소함수이다.

채널의 충격 응답은 수신된 신호의 IFFT를 취하는 위치에 의해서 달라지는데 수신된 신호가 트레이닝 신호와 동일한 구간에서 IFFT를 취할 때 가장 큰 값을 가지며 이 지점을 찾아서 k_{max} 라 한다.

$$k_{max} = \max_k (IFFT\{Y_k \cdot X_k^*\}) \quad (8)$$

k_{max} 를 기준으로 0.5 샘플의 이전과 이후의 충격응답을 각각 h_c , h_l 이라 한다.

$$\begin{aligned} h_c &= IFFT\{Y_{k_{max}} \cdot e^{j2\pi k(0.5)/N} \cdot X_{k_{max}}^*\} \\ h_l &= IFFT\{Y_{k_{max}} \cdot e^{j2\pi k(-0.5)/N} \cdot X_{k_{max}}^*\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 N 은 FFTpoint의 개수를 의미한다.

h_l 의 절대값에 h_c 의 절대값을 빼면 동기를 추정할 수 있다.

$$\text{추정 동기} = |h_l| - |h_c| \quad (9)$$

4. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션 조건은 표1과 같다. 샘플수 2048개의 IFFT/FFT 주기, OFDM 심볼 보호구간은 유효 심볼길이의 1/4, 데이터 변조방식은 QPSK, 데이터는 DAB의 규격에서와 같이 첫 심볼은 알고있는 트레이닝 심볼로 나머지는 시그널 심볼로 구성된 프레임으로 구성하여 몇 가지 패턴의 채널에 대하여 제안한 방법의 동기 알고리즘을 구현하여 심볼 타이밍을 검출 해 보았다. 실험시 수신단에서의 반송파 주파수 오프셋은 없으며 비트의 에너지와 노이즈 에너지의 비 (E_b/N_0)는 5db로 가정한다.

그림 2는 AWGN채널을 구성하여 실험한 후 심볼 타이밍의 특성 곡선을 나타낸 것이다. 그림 2의 특성 곡선은 -0.5에서 0.5사이 0을 지나고 있음을 볼 수 있으며 이는 제안한 방법이 동기를 정확히 획득함을 볼 수 있다.

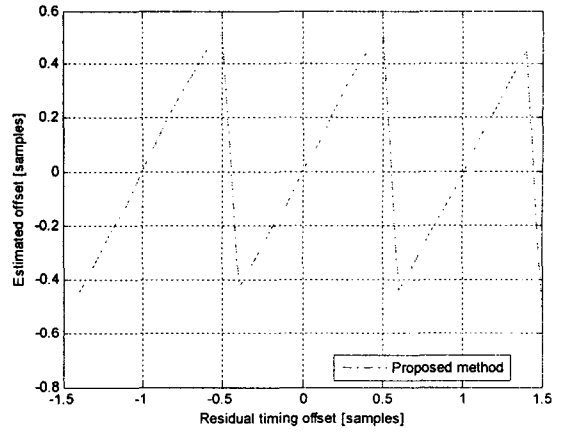


그림 2. AWGN채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

원신호와 고스트의 신호가 같은 SFN 채널에서의 실험 결과는 그림 3, 4에 나타내고 있으며 각각 보호구간(GI)의 10%(약50샘플), 90%(약450샘플) 지연된 고스트를 가지는 채널을 통과한 신호의 심볼 타이밍 특성 곡선을 보여준다. SFN채널에서의 동기는 고스트와 원 신호의 크기가 동일하기 때문에 원신호와 고스트 신호를 분별하지 못하여 동기 획득에 어려움이 있다. 제안한 방법은 SFN채널에서 잔존 타이밍 오프셋이 -0.5에서 0.5일시 0을 지남을 볼 수 있고 이는 정확한 동기를 획득하고 있음을 볼 수 있다.

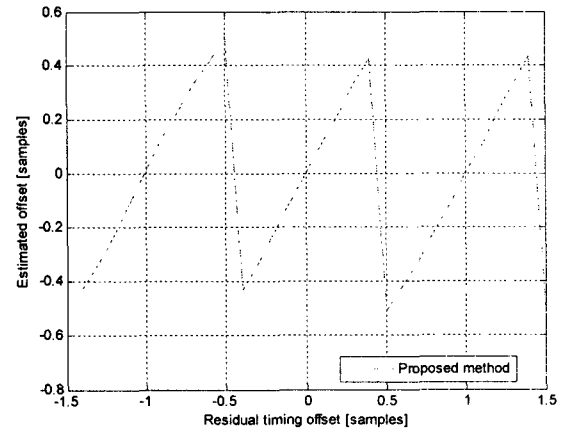


그림 3. 10% 지연된 SFN채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

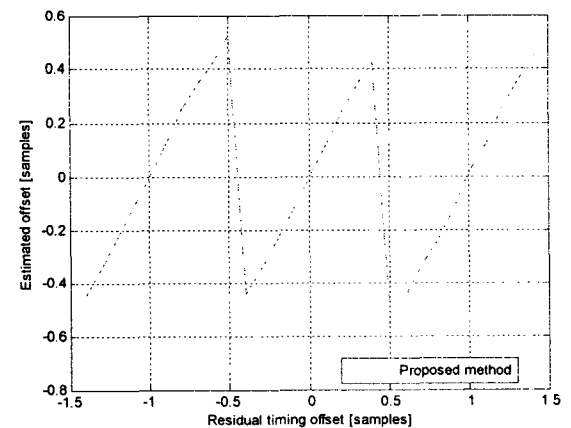


그림 4. 90% 지연된 SFN채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

원신호보다 고스트의 신호 크기가 더 강한 채널(그림 5)을 통과한 신호에 대한 심볼 타이밍 특성 곡선은 그림 6과 같다. 그림 5의 채널의 경우 동기 획득 시 신호크기가 가장 큰 고스트를 동기를 기준으로 동기 획득하는 경향이 있지만 제안한 방법은 원신호의 심볼의 동기를 정확히 획득함을 그림 6을 통해 볼 수 있다.

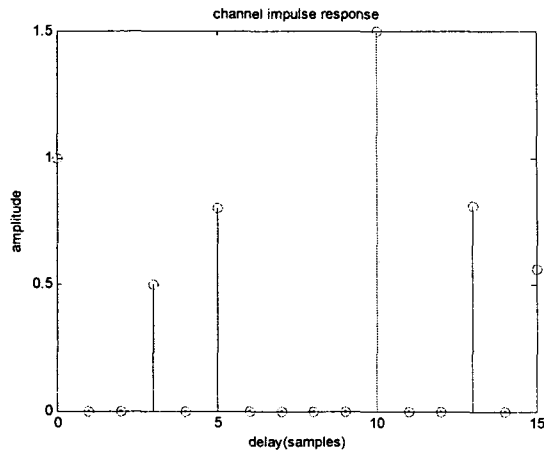


그림 5. 임의의 채널

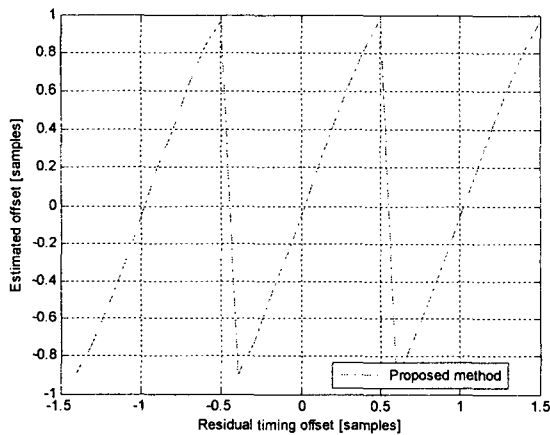


그림 6. 임의의 채널에서의 심볼 타이밍 특성 곡선

컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 통하여 몇 가지 채널 모델들에 대해 제안한 방법을 적용하여 심볼 타이밍 동기의 성능이 0.5샘플간격이내의 오차로 검출해 내는 방식을 나타내 보았다.

5. 결론

본 논문에서는 소수점 이하의 심볼 타이밍 오프셋이 있을시 동기를 획득하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 QPSK를 사용하여 구성된 OFDM의 한 심볼을 트레이닝 심볼로 제공하는 시스템에서 적용할 수 있다. 제안한 알고리즘은 잔존하는 타이밍 오프셋이 -0.5에서 0.5일 때 보호구간의 90%에 고스트가 존재하는 SFN 채널과 고스트의 크기가 원 신호의 크기보다 더 강한 임의의 채널에서도 동기를 정확히 획득하였다.

참고문헌

[1] P.H. Moose, "A technique for orthogonal frequency division

multiplexing frequency offset correction," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, pp.2908-2914, Oct. 1994.

[2] M. Speth, F. Classen, and H. Meyr, "Minimum overhead burst synchronization for OFDM based broadband transmission," in *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," in *Proc. VTC'97*, May 1997, pp. 1807-1811