

OFDM을 위한 효율적인 심볼 타이밍 검출 알고리즘

송경민, 임성빈
송실대학교 정보통신전자공학부

An Efficient Symbol Timing Detection Algorithm for OFDM Systems

Kyeongmin Song and Sungbin Im

School of Electronic Engineering, Soongsil University

E-mail : sbi@nuri.net

요약

고속 무선통신에 적합한 OFDM 신호를 복조하기 위해서는 빠르고 정확한 심볼의 시작점을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 고속 무선 LAN에서 사용되는 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 시스템에서 혼련신호를 효율적으로 사용해서 심볼 동기를 검출하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 직교성이 뛰어난 PN 코드를 혼련신호로 사용하여 OFDM 심볼의 대략적 프레임 동기는 혼련 신호의 실수 부분을 최소오차 방식을 적용하고 정밀한 심볼동기는 주기가 짧은 PN 코드를 결합시켜 하나의 심볼을 만든 후 상관관계를 적용하여 검출하였다. 그 결과 제안된 알고리즘이 계산량을 현저하게 줄이면서 심볼 동기는 정확하게 검출함을 확인하였다.

I. 서론

현재 연구가 활발하게 진행되고 있는 5G Hz대역에서 20 Mbps 이상의 고속의 무선 근거리 통신망에서는 다중경로 전파환경에 강인한 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 방식이 고려되고 있다 [1,2]. OFDM 전송기술은 비트 스트림을 다수의 반송파를 이용하여 병렬로 전송함으로써 심볼의 길이가 상대적으로 길어져 다중경로의 영향을 줄일 수 있고, 주파수 선택적 페이딩과 같은 채널 열화에 효과적으로 대처할 수 있으며 대역 효율이 뛰어난 방식으로 알려져 있다. 그러나 OFDM 방식의 신호를 복조하기 위해서는 정확한 주파수 동기(frequency synchronization)와 시간 동기(time synchronization)가 수행되어야 한다. 주파수 동기는

수신기의 RF 발진 주파수를 송신기의 발진 주파수에 일치시키는 기능이다. 시간 동기는 정확한 신호의 병렬 처리를 위한 심볼 타이밍 복원 (FFT 윈도우 위치의 복원) 기능과 수신 신호 중에 신호 대 잡음비가 최대한 곳을 샘플링하기 위하여 analog-to-digital 변환기의 샘플링 클럭을 제어하는 기능이다. OFDM 시스템은 일반적으로 초기화 과정동안 심볼 타이밍 복원 주파수 동기, 샘플링 클럭 제어순으로 동작한다. 또한, 전형적인 OFDM 방식은 심볼간 간섭 (intersymbol interference)을 방지하기 위해서 전송 데이터의 후반부를 복사하여 보호구간 (guard interval)을 먼저 전송한다 [3].

OFDM 시스템을 무선 근거리 통신망에 적용하려면 전체 프레임이 전송되는 동안 일정한 성능을 유지해야한다. 따라서 빠른 동기화를 이룰 수 있는 알고리즘이 요구된다. 이 논문에서는 시간영역에서 동기 오류의 영향을 줄이면서, 동시에 계산량과 구현의 복잡도를 낮춘 효율적인 심볼 타이밍 검출 알고리즘을 제안하고자 한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 일반적인 OFDM 시스템 모델에 대해 기술하고 III절에서는 기존의 심볼 시간 검출방법에 대하여 소개하고, 계산량을 줄이면서 정밀한 심볼 시간을 검출하는 방법을 제안한다. IV절에서는 제안된 알고리즘의 계산량에 대해서 분석하고 V절에서는 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고, 끝으로 IV절에서 결론을 맺는다.

II. OFDM 시스템

OFDM 시스템은 한 사용자의 신호를 여러 개의 부반송파를 이용하여 동시에 전송하는 방식이다. 그림 1은 각 부채널에 QPSK 변조 방식을 이용하는 OFDM 시스템의 블록도를 도

시하고 있다.

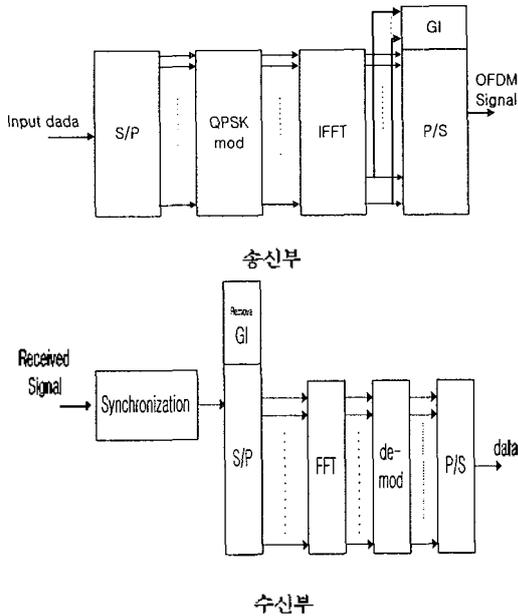


그림 1. OFDM 시스템의 송수신부.

전송되는 데이터는 직렬/병렬 변환기를 거친 후 QPSK와 같은 선형변조에 의해 N 개의 복소 부반송파로 할당된다. OFDM 신호는 변조된 부반송파를 IFFT를 거치면서 생성되며 이때 이산화된 기저대역 신호는 식 (1)과 같다.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi n \frac{k}{N}} \quad (1)$$

$(n=0, 1, \dots, N-1)$

IFFT를 통과한 OFDM 신호는 지연확산과 심볼간의 간섭을 방지하기 위해 보호구간(cyclic prefix)을 N_G 개 삽입한다. 따라서 전송되는 OFDM 심볼은 식 (2)와 같다.

$$x_{n,l} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{k,l} e^{j2\pi n \frac{k}{N}} \quad (2)$$

$(n = -N_G, -N_G+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, N-1)$

여기서 n 은 샘플 시간을 의미하며 $X_{k,l}$ 은 l 번째 OFDM 심볼의 k 번째 부반송파를 의미한다. AWGN 채널을 통과하여 수신된 OFDM 심볼의 n 번째 샘플 값은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$r_{n,l} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{k,l} H_{k,l} e^{j2\pi n \frac{(k+\epsilon)}{N}} + w_{n,l} \quad (3)$$

여기서 $H_{k,l}$ 은 k 번째 부반송파의 주파수대에서의 전송채널의 주파수 전달 특성이며 ϵ 은 채널의 상대적인 주파수 오프셋을 나타낸다. 그리고 $w_{n,l}$ 은 AWGN이다. 수신 OFDM 심볼은 보호구간이 제거된 후 FFT 단에 입력된다. FFT에서 출력된 k 번째 부반송파에 대한 수신 복소값은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$R_{n,l} = X_{k,l} H_{k,l} e^{j2\pi n \frac{k}{N}} + I_{k,l} + W_{k,l} \quad (4)$$

여기서 $I_{k,l}$ 은 주파수 오프셋으로 인하여 발생한 부반송파간 간섭을 나타내며 $W_{k,l}$ 은 부반송파에 대한 잡음 성분을 의미한다.

III. 제안된 알고리즘

OFDM 시스템의 훈련신호의 설계방식은 크게 주파수 영역과 시간영역의 접근방식으로 나눌 수 있다. 주파수 영역 방식은 FFT 연산시 시간지연이 발생하므로 고속의 무선 전송 방식에는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 시간영역에서의 접근방식을 고려한다. 기존의 시간영역의 동기방식으로는 최우 방식 (maximum likelihood) [4], 최소오차 방식 (minimum error) [5], 상관관계를 이용한 방식 [6]이 있다. 최우 방식은 동일 신호사이의 상관성을 이용하며, 최소오차 방식은 주파수 오프셋에 의한 위상변화를 포함하여 동일한 두 신호 사이의 오차를 이용한다. 최우 방식은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{d}_{ML} = \arg \max_d \{ |\Gamma(d)| - \rho \Phi(d) \} \quad (5)$$

여기서 $\Gamma(d)$, $\Phi(d)$, ρ 는 다음과 같다.

$$\Gamma(d) = \sum_{m=d}^{d+N-1} r_{m+N}^* r_m \quad (6)$$

$$\Phi(d) = \frac{1}{2} \sum_{k=d}^{d+N-1} |r_k|^2 + |r_{k+N}|^2 \quad (7)$$

$$\rho = \frac{SNR}{SNR+1} \quad (8)$$

r 은 수신신호를 나타내며 *는 공액복소수를 표시하고 N 은 OFDM 심볼 길이를 의미한다.

최소오차 방식은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{d}_{ME} = \arg \min_d C(d) \quad (9)$$

여기서 $C(d)$ 와 ϕ 는 각각 다음과 같다.

$$C(d) = \sum_{m=0}^{N-1} |r_{d+m+N} - r_{d+m} e^{j\phi}|^2 \quad (10)$$

$$\phi = \arg \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} r_{d+N+m} r_{d+m}^* \right\} \quad (11)$$

수신신호만을 이용하는 최우 방식과 최소오차 방식에서는 동일한 두 신호를 연속적으로 수신할 경우 정확한 심볼 타이밍을 찾는 것이 어렵다. OFDM 시스템에서 심볼 타이밍을 정확하게 잡지 못할 경우 FFT이후 복조한 신호는 심각한 왜곡을 일으키게 된다. 따라서 현재 고속 무선 근거리 통신망에서는 수신신호와 수신 단에서 미리 알고있는 훈련신호와의 상관관계(correlation)를 이용한다. 이 상관관계를 이용하는 방식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$M(d) = \frac{|P(d)|^2}{(R(d))^2} \quad (12)$$

여기서 $R(d)$ 와 $P(d)$ 는 각각 다음과 같다.

$$R(d) = \sum_{m=0}^{N-1} |z_{d+m}|^2 \quad (13)$$

$$P(d) = \sum_{m=0}^{N-1} z_{d+m}^* r_{d+m+N} \quad (14)$$

여기서 z 는 수신단이 갖고있는 훈련신호를 의미한다. 훈련신호로는 직교성이 있는 PN (pseudo-noise) 코드를 사용하여 정밀한 심볼 타이밍을 검출할 수 있으나 계산량이 증가한다.

최소오차 방식은 블록간의 합으로서 프레임의 시작점을 추정하는 방법으로 상관성을 이용하는 방법보다 계산량 면에서는 이점이 있지만 정밀성에 있어서는 우수하지 못하다. 따라서, 본 연구에서는 두 방법을 적절하게 결합하여 상관성을 이용하는 방법의 정밀성을 유지하면서, 계산량을 감소시키는 알고리즘을 개발하고자 한다.

그림 2는 본 연구에서 고려하는 수신기의 구조이다. 그림에서 ME는 최소오차 방식을 수행하는 블록으로 수신된 신호의 실수부만을 이용하며, Correlation블록은 ME 이후의 수신 신호의 심볼에 대하여 훈련신호와와의 상관값을 계산한다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 기본적인 개념은 다음과 같다. ME 블록에서는 수신 단에 입력된 실수부의 신호는 참조신호(x)와 댈셈을 수행한 후 블록단위로 덧셈을 하여 문턱값(threshold) 보다 작아지는 지점들을 검출한다. 일반적으로 검출된 지점들은 프레임의 시작점을 포함하고 있다. 최소오차 방식에 의해서 검출된 지점을 상관기로 넘기면 상관기에서는 검출 지점부터 입력신호와 참조신호(x)를 상관을 시킨다. 이렇게 해서 얻어진 부분이 FFT의 시작점이 된다.

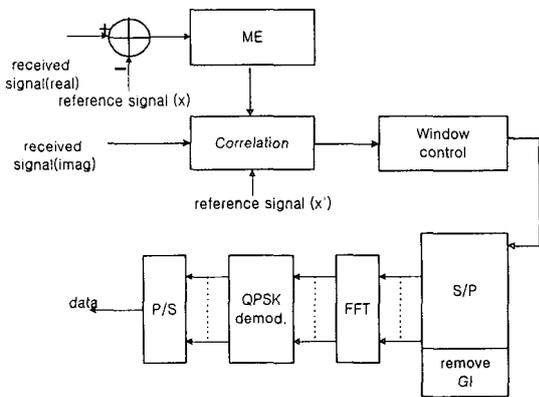


그림 2 제안된 수신기의 구조

그림 3은 최소오차 방식을 적용하여 문턱값을 적용했을 때 문턱값 이하인 부분의 구간을 (a)로 표현한 예이다.



그림 3. 최소오차 방식을 적용했을 때 문턱값 이하가 되는 범위.

검출된 구간은 훈련신호의 구간보다 작다. 따라서 두 번째 제안은 상관관계를 적용할 때 훈련신호내의 PN 코드의 길이가 짧은 것을 사용하면 계산량을 줄일 수 있다. 그림 4는 본 논문에서 제안하는 두 번째 방식의 송신단에서의 훈련신호의 구성이다. 허수부는 길이가 64보다 짧은 PN 코드로 구성하고 전단은 0으로 채운다. 실수부는 허수부의 PN 코드를 블록으로 나누어서 구성한다.

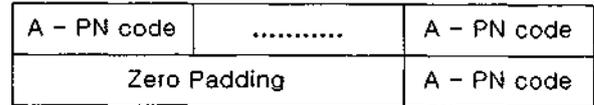


그림 4. 두 번째 제안된 방식의 훈련신호의 구성.

IV. 계산량 분석

그림 5는 시간 영역의 프레임구조를 송수신단에서 표현한 것이다. 하나의 프레임은 M개의 OFDM 심볼들로 구성되며 각각의 OFDM 심볼은 길이가 N이다. 또한, 각 심볼들은 G개의 보호구간이 있으며 채널의 지연확산 구간의 길이는 D라고 정의한다. 그림에서 e는 최소오차 방식으로 검출된 시작점과 실제 심볼의 시작점 사이의 오차를 나타낸다.

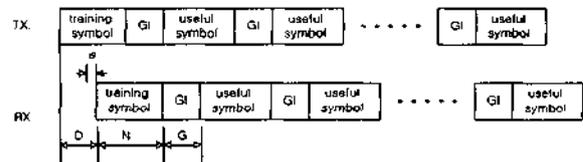


그림 5. 송수신단에서 시간영역으로 본 프레임.

표 1. 각 알고리즘에 대한 계산량 분석.

알고리즘	계산량
최소오차	$2N[(N+G)M+D]$
상관성	$7N[(N+G)M+D]$
최소오차+상관성	$2N(D-e)+7eN$
첫 번째 제안된 방식	$N(D-e)+7eN$
두 번째 제안된 방식	$N(D-e)+7eN/8$

위에서 설명된 계수를 사용하여 한 프레임을 기준으로 했을 때, 최소오차 방식과 상관값을 이용했을 때의 계산량을 표 1에 비교하였다. 표 1에서 나타난 바와 같이, 동일한 프레임 길이에 대하여 상관성을 이용하는 방식이 최소오차 방식보다도 계산량이 3.5배로 증가한다. 제안된 방식에 대한 계산량은 약 $N(D-e)+7eN/8$ 개의 곱셈기를 요구한다. 이 경우에 있어서는

허수부 PN코드의 길이가 실수부의 길이의 1/8이라고 가정하였다.

V. 모의 실험

모의 실험에서 사용된 채널은 동일한 전력을 갖는 two-path 다중경로 Rayleigh fading 채널로서 50Hz의 도플러 주파수를 갖는다. 그림 6은 이 채널에 대한 각 방식의 BER (bit error rate) 성능곡선을 SNR에 대하여 도시한 것이다. 그림 6에서 "theory"라고 표시된 곡선은 시간동기가 이루어졌을 경우의 다중경로에서의 이상적인 BER 성능을 나타내며, "ME"는 최소오차 방식에 의한 성능 곡선을, "Correlation"은 상관성만을 이용하는 경우의 성능을 나타낸다. 또한 "prop. 1"은 제안된 첫 번째 방식의 성능을 보여 주며, "prop.2-16"과 "prop.2-8"은 제안된 두 번째 방식에서 참조 신호의 길이가 16 bit인 경우와 8 bit인 경우를 각각 나타내고 있다. 그림에 나타난 결과에 의하면, 최소오차 방식이 가장 낮은 성능을 보여 주며, 상관성만을 이용하는 방식과 제안된 첫 번째 방식은 이상적인 경우와 동일한 성능을 나타내고 있다. 제안된 두 번째 방식에서는 zero padding에 따른 영향으로 이상적인 경우에 비하여 우수한 성능을 보여 주고 있으며 참조 신호의 길이가 짧은 경우 (8 bit) 잡음에 대한 영향을 더 받는 것으로 관측된다.

그림 7은 상관성과 최소오차를 동시에 이용한 방식 (표 1에서 3번째 알고리즘)을 기준으로 하여 제안된 방식들의 곱셈의 계산량을 비교한 것이다. 제안된 첫 번째 방식은 55% 정도의 계산량이 개선되었으며 두 번째 제안된 방식은 65%의 개선을 보여주고 있다.

VI. 결론

본 논문은 고속의 이동 통신에 적합한 OFDM 수신기의 심볼 타이밍 검출 알고리즘을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 직교성이 뛰어난 PN 코드를 훈련신호로 사용하여 OFDM 심볼의 대략적 프레임 동기는 훈련 신호의 실수 부분을 최소오차 방식을 적용하고 정밀한 심볼 동기는 주기가 짧은 PN 코드를 이용하고 이에 상관관계를 적용하여 검출하였다. 제안된 알고리즘은 적은 계산량을 요구하는 동시에 심볼 타이밍을 정확하게 검출함을 모의 실험을 통하여 확인하였다.

참고 문헌

- [1] IEEE P802.11, Draft Standard for Wireless LAN, May 1997.
- [2] M. Mizoguchi, T. Onizawa, T. Kumagi, H. Takanashi, and M. Morikura, "A Fast Burst Synchronization Scheme for OFDM," *Proceedings of the IEEE 1998*

International Conference on Universal Personal Communications, vol. 1, pp. 125-129, October 1998.

- [3] D. K. Kim, S. H. Do, H. J. Choi, and K. B. Kim, "A New Algorithm of Symbol Timing Recovery and Sampling Clock Adjustment for OFDM Systems," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 44, No. 3, August 1998.
- [4] J. J. van de Beek, M. Sandell, and P. O. Borjesson, "ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 45, No. 7, pp. 1800-1805, July 1997.
- [5] M. Speth, F. Clessen, and H. Myer, "Frame Synchronization of OFDM Systems in Frequency Selective Fading Channels," *Proc. of VTC97*, pp. 1807-1811, 1997.
- [6] T. Onzawa, M. Mizoguchi, M. Morikura and T. Tanaka, "A fast Synchronization Scheme of OFDM Signals for High-Rate Wireless LAN," *IEICE trans. on commun.*, vol. E82-B, no. 2, FEB. 1999.

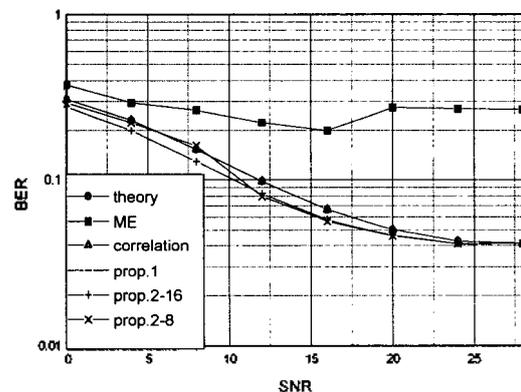


그림 6. 다중경로에서의 BER성능.

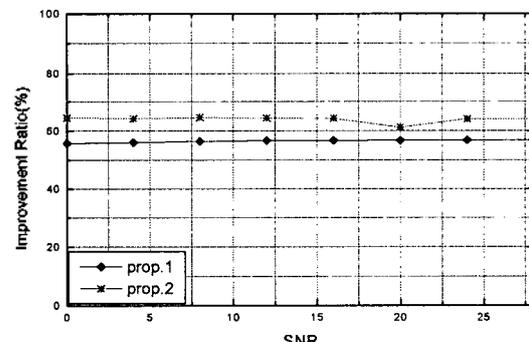


그림 7. 계산량 비교.