

다경로 페이딩 채널에서의 OFDM 심볼 동기 알고리즘

박병준, 고은석, 천현수, 강창언, 홍대식

연세대학교 전기.컴퓨터 공학과

전화 : (02) 361-2865 / 팩스 : (02) 312-4887

Improved Timing Synchronization Algorithm for OFDM Systems

Byungjoon Park, Eunsuk Ko, Hyunsoo Cheon, Changeun Kang and Daesik Hong

Dept. of Electrical and Computer Engineering Yonsei University

E-mail : mgballs@prodigy.yonsei.ac.kr

Abstract

In this paper, an improved timing synchronization method for OFDM system is proposed. In multipath fading channels, timing offset estimation algorithm based on simple correlation metric can cause inter-symbol interference (ISI). The proposed algorithm promises accurate timing offset estimation, which can be achieved by simple windowing. The estimation errors in several multipath channels are evaluated in computer simulations

1. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 방식은 다중경로 페이딩 채널에 강하고, 대역폭 효율이 높은 이유로 지상파 방송, 실내용 멀티미디어 통신 분야에서 많은 관심을 받고 있다. OFDM은 송신단과 수신단에서 FFT를 사용하여 신호를 변, 복조하고 있기 때문에 주파수 동기와 시간 동기가 맞지 않으면 OFDM 시스템의 성능에 커다란 저하를 가져오게 된다. 주파수 오차는 복조된 신호의 진폭과 위상을 왜곡시키고, 부채널간의 간섭을 가져온다[1]. 심볼 동기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야에 의하여 지원되었음

오차는 위상왜곡과 부채널간의 간섭을 가져올 뿐만 아니라, 이웃 심볼에 의한 ISI를 발생시킨다. 이런 ISI는 OFDM 시스템의 가장 큰 장점 중 하나인 다중경로 페이딩 채널에 강한 특성을 약화시키는 결과를 가져오게 된다. 따라서 OFDM 전송방식에서 수신 신호를 정확하게 복조하기 위해서는 주파수 오차와 심볼 동기를 정확하게 맞추어 주어야만 한다.

OFDM 시스템에서의 심볼 시간 오차 추정방법은 Beek, Schmidl 등에 의해 연구되어 왔다. 보호구간과 수신신호와 상관값을 사용하여 심볼의 시작점을 찾는 방법이 Beek에 의해 제안되었으며, Schmidl 은 버스트 모드의 수신 신호의 심볼시간 동기 방법으로 반복되는 훈련신호의 상관값에 의해 심볼의 시작점을 찾는 방법을 제안하였다[2][3]. 또 다른 심볼시간 동기방법으로는 알고 있는 신호와 수신 신호간의 상관값을 이용하는 방법이다. 이런 방법들은 모두 상관값이 최대가 되는 곳을 심볼의 시작점으로 판별한다. 그러나 다중경로 페이딩 채널환경에서는, 채널의 임펄스 응답에 의해 수신신호의 파워가 변하여 상관값의 최대점이 변할 수 있기 때문에 심볼의 오차를 정확하게 추정할 수 없게 된다.

본 논문에서는 다중경로 페이딩 환경에서 심볼의 오차를 정확하게 찾는 알고리즘을 제시한다. 상관값과 함께 상관값의 변화를 관찰함으로써, 정확한 심볼 오차를 추정할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 취한다. 2장에서는

OFDM 시스템과 주파수/시간 오차의 영향을 기술한다. 3장에서는 상관값을 이용하는 방법들의 문제점을 기술하고, 이를 보완하기 위한 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안한 알고리즘을 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 제안된 알고리즘을 요약하고 결론을 맺는다.

2. OFDM 시스템

그림 1.은 OFDM 시스템의 간단한 블록도를 보여주고 있다. OFDM 심볼은 전송하고자 하는 신호 $S(k)$ 를 IFFT 함으로써 얻게 된다. 전송신호 $s(n)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

전송된 신호는 다중 경로 페이딩 채널을 거치고 AWGN 이 더해져서 다음과 같이 표현된다.

$$r(n) = \sum_{\tau} h(n-\tau) s(\tau) + w(n) \quad (2)$$

여기서 $w(n)$ 은 AWGN을 나타내며, $h(n)$ 은 채널의 임펄스 응답을 나타낸다.

수신된 신호는 주파수와 심볼 동기를 맞추어서, FFT 단으로 들어가게 된다. 동기부에서 주파수에서는 ϵ 의 오차가 심볼 오차는 n_ϵ 발생하였다고 하자. 그리고 정확한 심볼의 시작점을 0이라고 가정하자. 이런 경우, FFT의 출력은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$\hat{S}(k) = a(S(k)H(k)) \cdot e^{j\pi\epsilon(N-1)/N} \cdot e^{j\pi n_\epsilon/N} + I_{k,f-off} + W_k, \tau_{max} - N_g \leq n_\epsilon \leq 0 \quad (3)$$

$$\hat{S}(k) = a(S(k)H(k)) \cdot e^{j\pi\epsilon(N-1)/N} \cdot e^{j\pi n_\epsilon/N} + I_{k,t-off} + I_{k,f-off} + W_k, n_\epsilon \geq 0 \quad (4)$$

여기서 $H(k)$ 는 주파수 영역에서의 채널응답을, W_k 는 주파수 영역에서의 AWGN 이다. $I_{k,t-off}$, $I_{k,f-off}$ 는 각각 심볼 오차에 의한 부채널간 간섭(ICI)과 주파수 오차에 의한 부채널간 간섭을 의미한다. τ_{max} 는 채널의 최대 지연을 나타내며, N_g 는 보호구간의 길이이다. 위의 두 식에서 살펴보면 알 수 있듯이 주파수 오차와 시간 오차는 원래 신호의 진폭과 위상 오차로 나타나게 된다. 이와 함께 부 채널간 간섭도 일어나게 된다. $n_\epsilon \geq 0$ 인 경우는 ISI 까지 발생하게 되어 시스템 성능에 큰 저하를 가져오게 된다. 주파수 오차의 경우, 성능이 좋은 발진기를 사용하여,

오차를 최소화시킬 수 있다. 하지만 심볼 오차의 경우, 심볼 오차를 추정하는 알고리즘에 의해 심볼의 시작점을 결정하게 되기 때문에, 정확한 심볼 오차 추정 알고리즘이 필요하다.

3. 시간 동기 알고리즘

3.1. 기존의 시간 동기 알고리즘

기존의 시간 동기 알고리즘은 크게 3가지 정도로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째로 Beek 가 제안한 방법으로 OFDM 신호의 보호구간을 사용하는 방법이다. 보호구간은 OFDM 신호의 마지막 N_g 만큼을 앞에 붙이는 것이므로, 심볼의 시작점을 다음과 같은 상관 값을 사용하여 찾을 수 있다.

$$P_g(m) = \sum_{n=0}^{N-1} r(n+m)r^*(n+m+N) \quad (5)$$

이 방법은 방송과 같이 계속해서 심볼이 전송이 될 경우, 사용될 수 있는 방법이다. 데이터 전송을 위한 버스트(burst) 모드인 경우에는, Schmidl 이 제안한 다음과 같은 값을 사용하여 심볼의 시작점을 찾을 수 있다.

$$M_s(m) = \frac{|P_{N/2}(m)|^2}{(R_{N/2}(m))^2} \quad (6)$$

여기서 $P_{N/2}$ 는 반이 똑같은 신호의 상관값이고, $R_{N/2}$ 는 수신된 신호의 에너지이다.

데이터 전송 모드에서 사용할 수 있는 또 다른 방법으로, 알고 있는 훈련 신호를 사용하는 방법이 있다. 수신된 신호와 훈련 신호와의 상관값을 사용하는 이 방법은 자기 상관특성이 좋은 훈련신호를 사용하면, 상관값의 최대가 다른 값들보다 20dB이상 차이 나게 할 수 있기 때문에, 심볼의 시작점을 쉽게 판별할 수 있다는 장점이 있다.

위에서 얘기한 3가지 방법들은 모두 상관값들이 최대가 되는 곳을 심볼의 시작점으로 생각하여, 심볼 오차를 찾는다. 이런 상관값을 이용하는 방법은 간단하기 때문에 OFDM 심볼 동기 알고리즘으로 적당하다. 하지만, Beek 나 Schmidl 이 제안한 방법은 인접 샘플간의 상관값의 변화가 적을 수 있기 때문에 정확한 시작점을 찾는다는 문제가 있게 된다.

또한 다중 경로 페이딩 채널에서는 정확한 심볼의 시작점을 찾는 것이 더 힘들어지게 된다. 채널의 임펄스 응답이 그림 2.의 (a)와 같다면, 상관값이 최대가 심볼의 시작점에서 나오게 될 것이다. 하지만, 채널의 임펄스 응답이 그림 2.의 (b)와 같다면 최대가 뒤로 밀려날 것이고 (c)와 같다면 잡음에 의해 최대가 되는 점이 바뀌게 될 것이다. 따라서 상관값이 최대가 되는

점을 심볼의 시작점으로 하게 되면, 정확한 심볼 오차를 추정할 수 없게 된다. 특히 심볼의 시작점을 원래 심볼의 시작점보다 뒤로 잡게 되면, 수식 (4) 에서 본 것과 같이 ISI 가 일어나게 되어 시스템의 성능을 크게 저하시키게 된다.

이를 방지하기 위해서는 채널에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 그러나 초기 동기를 획득하는데 있어서는 채널 정보를 알 수 없기 때문에, 채널에 상관없이 정확한 심볼의 시작점을 찾는 방법이 필요하다.

3.2 제안된 시간 동기 알고리즘

정확한 심볼의 시작점을 찾기 위해서는 처음 도달한 신호의 파워가 나중에 들어온 신호의 파워보다 약한 경우, 즉 채널의 임펄스 응답이 그림 2. 의 (b)와 같은 경우에 상관값이 최대가 되는 점을 심볼의 시작점으로 결정하지 않아야 한다. 오히려 이런 경우에는 상관값이 최대가 된 곳이 아니라, 그보다 몇 샘플 앞을 심볼의 시작점으로 잡아야 한다. 그래서 ISI가 생기지 않고 심볼 오차에 의해 위상 오차만 생기게 만들어 주어야 한다. 심볼 오차에 의해 생긴 위상 오차는 차등 복조를 사용하거나, 채널을 추정하면 그 영향이 사라지기 때문이다. 그러나 채널이 시간에 따라 변함에 따라서 채널의 임펄스 응답이 달라지기 때문에 최대가 되는 지점의 몇 샘플 앞을 심볼의 시작점으로 잡을 것인가에 대한 정확한 기준을 만들기가 어렵다.

초기 동기를 잡는 훈련신호를 자기상관 특성이 좋은 PN sequence를 사용한다고 가정하면, 채널에 의해 처음 도달한 신호의 파워가 나중에 도달한 신호의 파워보다 작다고 하더라도 정확한 심볼 시작점에서의 상관값이 최대는 아니지만, 이전 값들보다는 커지는 것을 관찰 할 수 있다. 그러나 상관값이 커진다고 하더라도, 어떤 임계치를 사용하여 심볼의 시작점을 결정할 수는 없다. 왜냐하면, 상관값이 채널에 따라 달라지기 때문이다. 따라서, 정확하게 심볼의 시작점을 찾아내기 위해서는 상관값이 급격히 커지는 곳을 찾아내야 한다.

상관값이 급격히 커지는 지점을 찾아내기 위해서 간단한 윈도우를 사용한다. 사용하는 윈도우는 High-pass 필터의 역할을 하게 된다. 기존의 방법으로 훈련신호와 수신신호의 상관값을 미리 계산한 후 이 상관값을 윈도우를 통과시키게 되면, 윈도우가 High-pass 필터 역할을 하기 때문에 상관값이 급격히 변하는 점에서는 큰 값을 가지게 되며, 나머지 부분에서는 작은 값을 가지게 된다. 또한 윈도우 출력값은 상관값 자체를 반영하게 되므로, 상관값 자체의 크기도 윈도우 출력값에 반영되게 된다. 이를 이용하여 윈도우를 통과하여 나타난 값이 어떤 임계치 이상의 값을 가질 때를 심볼의 시작점으로 잡으면 된다. 제안된 방법을 간단한 블록도로 나타내면, 그림 3. 과 같다.

제안된 방법은 상관값으로부터 두 가지 정보를 사용

하게 된다. 상관값 자체뿐만 아니라 상관값의 변화 정보를 심볼의 시작점을 추정하는데 사용하기 때문에, 상관값만을 사용하는 방법에 비해서 더 나은 성능을 가지게 된다. 또한 채널의 임펄스 응답이 어떠한 경우라도 정확한 심볼의 시작점을 추정할 수 있게 된다. 제안된 방법은 다른 방법에서 제안한 상관값을 그대로 사용하면서, 간단한 윈도우를 사용하므로 다른 방법과 비교해서 계산의 복잡도가 많이 증가하지 않는다.

4. 모의 실험 결과

제안된 방법을 다양한 임펄스 응답을 가지는 채널에서 실험하였다. 사용한 OFDM 시스템은 64개의 부채널을 가지며, 모든 경우에 주파수 오차를 0.2로 가정하였다. 훈련신호로는 자기상관 특성이 좋은 PN sequence를 사용하였다.

그림 2. (a) 와 같이 지수 감소하는 임펄스 응답을 가지는 채널에서의 결과를 그림 4.에 나타내었다. 이러한 채널에서는 기존의 방법과 제안된 방법은 크게 차이가 나지 않았다.

그림 2. (b) 와 같은 임펄스 응답을 갖는 채널 경우 그림 5. 에서 보는 것과 같이 제안된 방법이 훨씬 더 좋은 성능을 보였다. 상관값의 최대를 심볼의 시작으로 하는 기존의 방법과 Schmidl 이 제안한 방법은 SNR이 증가함에도 불구하고, variance를 2정도 가지고 있다.

그림 2. (c) 와 같은 임펄스 응답을 갖는 채널의 결과가 그림 6.에 나타나 있다. (c) 와 같은 임펄스 응답을 갖는 경우는 error variance 가 10^{-3} 인 경우 제안된 방법이 기존의 방법보다 약 4dB 정도 우수한 성능을 보였다.

결론적으로, 제안한 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 우수한 성능을 가진다. 이는 제안한 알고리즘이 심볼의 시작점을 찾는데 상관값과 함께 상관값의 변화도 같이 이용하기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 새로운 시간 동기 알고리즘을 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제안된 알고리즘은 High-pass 필터 역할을 하는 윈도우를 사용하여, 심볼의 시작점을 결정하는데 상관값과 함께 상관값의 변화도 같이 고려하여, 기존의 방법보다 성능이 개선됨을 보였다. 또한 제안된 방법은 채널의 변화에 상관없이 일정한 성능을 보여주기 때문에 채널의 변화가 심한 이동환경에 적합한 시간 동기 알고리즘이라고 할 수 있겠다.

참고문헌

- [1] Paul H. Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction", IEEE Trans. Comm, Vol.42, no. 10, pp. 2908-2914, Oct, 1994
- [2] J.J. van de Beek, M. Sandell and P.O. Borjesson, "ML estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 43, pp. 761-766, Aug, 1997
- [3] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM", IEEE Trans. Comm, Vol. 45, No. 12, pp. 1613-1621, Dec, 1997

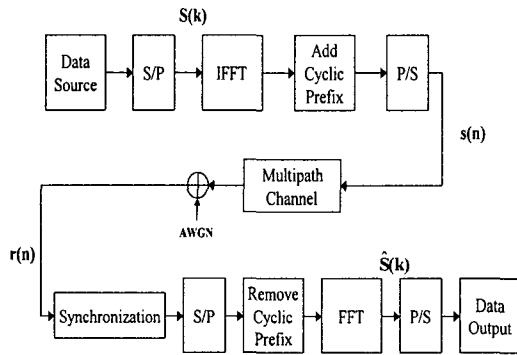


그림 1. OFDM 시스템 블록도

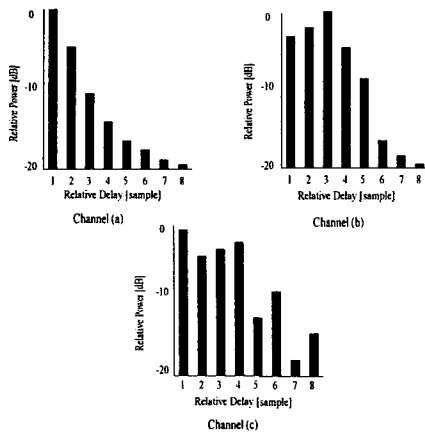


그림 2. 채널 임펄스 응답의 예

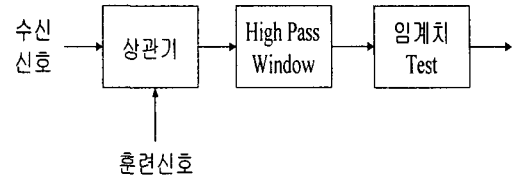


그림 3. 제안된 방법의 블록도

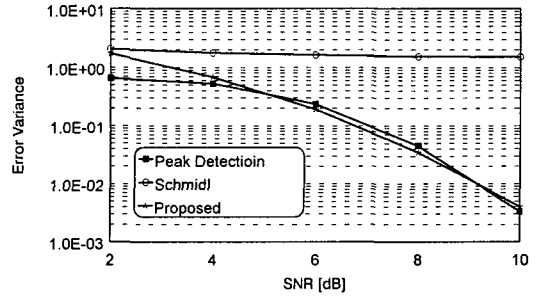


그림 4. (a) 채널에서의 심볼 오차 추정 error variance

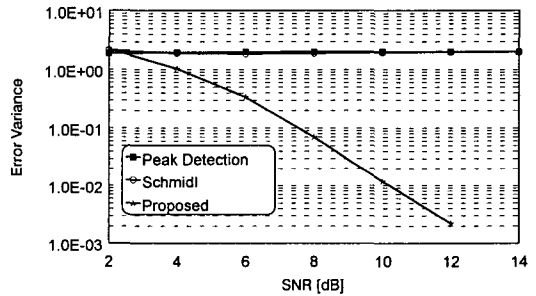


그림 5. (b) 채널에서의 심볼 오차 추정 error variance

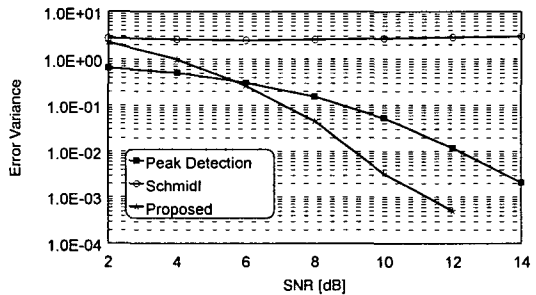


그림 6. (c) 채널에서의 심볼 오차 추정 error variance