

주파수 선택적 시변 채널 환경에서의 강건한 OFDM 시간동기 복원 알고리즘

최용호, 박병준, 홍대식
연세대학교 전기.전자공학과

A Robust Timing Recovery Algorithm for OFDM Systems Over Frequency Selective Time-Varying Channels

Youngho Choi, Byungjun Park, Daesik Hong
Dept. of Electrical & Electronic Eng., Yonsei Univ.
E-mail : ilovebokgi@itl.yonsei.ac.kr

Abstract

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 심벌 타이밍 jitter 를 최소화하기 위해 가장 강한 신호를 주기적으로 감시하고, 그 신호를 적응적으로 DLL(Delayed Locked Loop)의 기준 신호로 정한다. 결과적으로 제안된 알고리즘은 DLL 추적 실패를 피할 수 있고, 기존의 알고리즘에 비하여 DLL의 정상 상태 추적 오류가 작다. 모의 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 정상 상태 DLL 추적 오류가 작고 다중 경로 상황에서 DLL 추적 실패를 피할 수 있음을 확인 하였다. 따라서 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 OFDM의 시간동기 복원 알고리즘에 적합하다.

I. 서론

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템의 시간동기 복원은 심벌 동기와 샘플링 클럭 동기 나뉘어진다. 심벌 동기의 목적은 FFT를 위한 보호구간과 유효 심벌 구간의 경계 지점을 찾기 위한 것이다. 반면에, 샘플링 클럭 동기는 송신기와 수신기의 샘플링 클럭 위상과 주파수를 일치시키는 것이다. 심벌 동기가 보호구간 안쪽에서 이루어지면, 샘플링 클럭 위상 오차는 ISI를 발생시키지 않기 때문에 간단한 등화기를 사용하여 쉽게 보상할 수 있다. 그러나 샘플링 클

럭 주파수 오차는 심벌 타이밍 드리프트(drift)를 유발시키기 때문에 지속적인 심벌 타이밍 오차의 추정과 보상이 필요하다. 심벌 타이밍 오차의 추정과 보상 과정이 정확하지 않을 경우에는 심벌 타이밍 jitter가 발생된다. 심벌 타이밍 jitter는 일반적으로 보간기법(interpolation)을 이용한 채널 추정 [2] 성능의 열화를 가져온다. 또한 두개의 연속적인 심벌을 이용한 주파수 오프셋 추적 알고리즘 [3]도 심벌 타이밍 jitter에 의해 성능이 열화되어 시스템 전체의 비트 오류 확률이 증가하게 된다.

기존의 알고리즘 [4]은 심벌 타이밍 jitter를 최소화하기 위하여 가장 먼저 도착한 신호를 기준으로 주파수 영역의 DLL을 사용하였다. 그러나 기존의 알고리즘은 초기 FFT 윈도우 설정 시 pre-echo에 의한 ISI가 발생할 수 있다. 또한 기준신호가 오랫동안 매우 약할 경우, DLL은 기준신호에 대한 시간오차를 더 이상 추정할 수 없게 된다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 초기 FFT 윈도우를 보호구간 안쪽으로 어느 정도 여유를 두고 구성한 뒤 DLL을 적응적으로 동작시켜 위에서 제시한 2가지 문제점을 해결한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 시간동기 복원 알고리즘의 2가지 문제점을 제시한다. 3장에서는 제안된 알고리즘에 관하여 설명을 한다. 4장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 모의 실험을 통하여 기존의 알고리즘과 비교하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 기존의 시간동기 복원 알고리즘

2.1 FFT 윈도우 구성 방법 및 문제점

가장 먼저 도착한 신호의 전력이 매우 약할 경우, 기존의 알고리즘은 두 번째 도착한 신호를 기준으로 FFT 윈도우 구성을 한다. 이 경우 그림 1 (가)에서 보는 바와 같이 FFT 윈도우 2 를 구성하게 되며 첫 번째 경로 신호 (pre-echo) 에 의한 ISI 가 발생한다.

2.2 DLL 기준 파일럿 발생 방법 및 문제점

기존 알고리즘은 DLL 구동을 위한 수신기의 Early/Late 기준 파일럿을 다음과 같이 각각 발생 시켰다.

$$P_e(k) = P_k e^{+j\frac{2\pi k\zeta}{N}}, k \in P_s \quad (1)$$

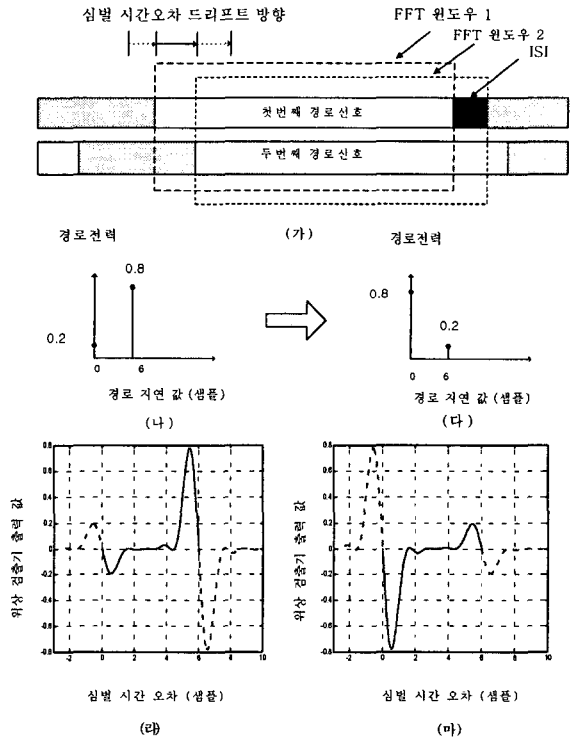
$$P_l(k) = P_k e^{-j\frac{2\pi k\zeta}{N}}, k \in P_s \quad (2)$$

여기서 P_k 는 k 번째 부 반송파에 위치하는 수신기의

파일럿이며 P_s 는 파일럿의 위치를 나타낸다. N 은 FFT

크기를 나타내고 ζ 은 기준 파일럿 신호의 Early/Late 위상 값을 의미하며 기존의 알고리즘은 ζ 값을 0.5 로 정하였다.

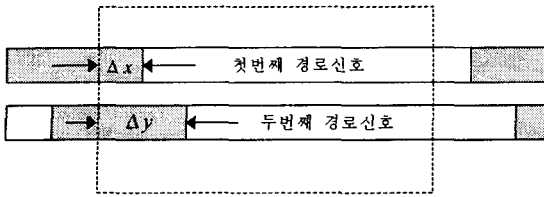
그림 1 (라), (마) 는 채널 환경이 그림 1 (나), (다) 일때 심벌 시간 오차가 -3 샘플에서 +10 샘플 변동 되었을 경우 각각의 위상 검출기 S 곡선을 나타낸다. S 곡선의 점선과 실선 부분은 그림 1 (가) 에서 심벌 시간오차 드리프트 방향이 각각 점선과 실선 화살표 범위일 때를 나타낸다. 그림 1 (라), (마) 에서 보는 바와 같이, DLL 을 이용한 위상 검출기는 설정된 FFT 윈도우 시작점 기준으로 ± 1.5 샘플 이상의 시간 오차가 발생한 심벌에 대하여 상관성을 갖지 않는다. 즉, 그림 1 (가) 와 같이 6 샘플 어긋난 2 개의 다중 경로 신호에 대하여 유효심벌이 FFT 윈도우 1 로 설정 되었을 경우, 그림 1 (라)의 작은 S 곡선은 첫 번째 경로 신호에 대하여 상관성을 가지며 두 번째 경로 신호에 대하여 상관성을 갖지 않는다. 마찬가지로 유효심벌이 FFT 윈도우 2 로 설정 되었을 경우, 큰 S 곡선은 두 번째 경로 신호에 대하여 상관성을 가지며 첫 번째 경로 신호에 대하여 상관성을 갖지 않는다. 또한 위상 검출기 S 곡선의 크



<그림 1> 기존 알고리즘의 FFT 윈도우 미끄러짐 현상

기는 각 경로 신호의 크기에 비례한다.

그림 1 (가) 에서 우선 기존의 알고리즘이 그림 1 (나)의 채널 환경에서 첫 번째 경로 신호를 기준으로 정확하게 FFT 윈도우 1 을 구성 하였다고 가정한다. 만약 페이딩 (fading)에 의해 첫 번째 경로 신호의 크기가 오랫동안 더욱 더 작아진다면 그림 1 (라) 의 작은 S 곡선은 더욱 더 작아지게 되며 위상 검출기는 심벌 시간 오차를 제대로 추정 할 수 없게 된다. 따라서 수신기 샘플링 클럭 주파수가 송신기 기준 클럭 주파수 보다 느린 경우, FFT 윈도우 1 은 그림 1 (가) 에서 표시된 방향으로 서서히 미끄러지게 되며 DLL 은 두 번째 다중 경로 신호를 기준으로 동작하게 된다. 만약 그림 1 (나) 의 채널 환경이 그림 1 (다) 와 같이 바뀐다면 그림 1 (라) 의 두 번째 경로 신호에 대한 큰 S 곡선은 그림 1 (마) 의 두 번째 S 곡선과 같이 작아진다. 페이딩에 의해 두 번째 경로 신호의 크기가 오랫동안 더욱더 작아진다면 FFT 윈도우는 계속 미끄러지게 된다. 만약 수신기 샘플링 클럭 주파수가 송신기 기준 클럭 주파수 보다 빠르면 그림 1 (가)에 표시된 반대 방향으로 FFT 윈도우가 미끄러지게 되며 DLL 추적은 불가능하게 된다.



<그림 2> 제안된 알고리즘의 FFT 윈도우 구성 방법

III. 제안된 시간동기 복원 알고리즘

3.1 제안된 FFT 윈도우 구성 방법

제안된 알고리즘은 우선 Beek 기법 [1] 을 이용하여 대략적인 보호구간과 유효심벌 구간의 경계지점을 찾은 후, 적절히 보호구간 안쪽에서 그림 3 의 스위치 1 을 통하여 초기 FFT 윈도우 시작점을 결정한다. [1] 의 기법은 다중경로 채널 환경에서 추정 편차가 크기 때문에 [1] 의 기법에 의해 결정된 FFT 윈도우 시작점에서 약 20 샘플 앞부분에서 FFT 윈도우를 결정하면 pre-echo 에 의한 ISI 를 방지할 수 있음을 모의 실험을 통하여 확인하였다. 제안된 방법에 의한 FFT 윈도우 설정에 따른 시간오차는 등화기에서 보상하면 된다.

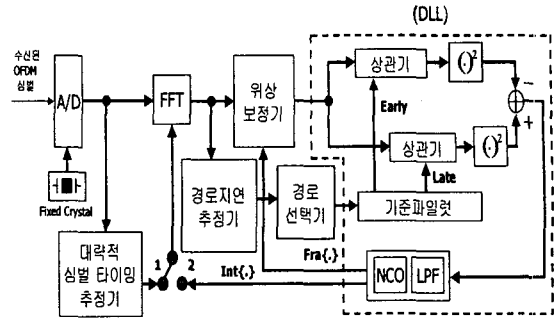
3.2 제안된 DLL 기준 파일럿 발생 방법

초기 FFT 윈도우 결정 후 그림 3 의 스위치 1 은 2 로 전환이 되고 기존의 알고리즘과 동일한 방법으로 경로 지연 추적을 수행한다. 경로 지연 추적 후 경로 선택기는 가장 강한 신호의 경로지연, \hat{s}_{max} 를 선택한 뒤, 수신기 Early/Late 기준 파일럿을 다음과 같이 각각 발생 시킨다.

$$P_e(k) = P_k e^{+j \frac{2\pi k(-\hat{s}_{max} + \zeta)}{N}}, k \in P_s \quad (5)$$

$$P_l(k) = P_k e^{+j \frac{2\pi k(-\hat{s}_{max} - \zeta)}{N}}, k \in P_s \quad (6)$$

그림 2 에서 만약 두 번째 경로 신호의 크기가 가장 크다면 식 (5), (6) 의 \hat{s}_{max} 대신에 Δy 를 각각 대입 시킨다. 만약 페이딩에 의한 영향으로 첫번째 경로 신호의 세기가 두 번째 경로 신호 보다 커진다면 식 (5), (6) 의 \hat{s}_{max} 대신에 Δx 를 각각 대입 시킨다. 즉,



<그림 3> 제안된 알고리즘의 시간동기 블럭도

초기 FFT 윈도우의 시작점은 어느 정도의 여유를 두고 고정된 상태에서 가장 강한 신호의 경로 지연 값을 기준으로 수신기의 파일럿을 적응적으로 발생시킨다. 따라서 제안된 방법은 기존의 방법에 비하여 정상상태 DLL 추적 실패를 방지 할 수가 있다. 그림 1 (라), (마) 에서 보는 바와 같이, 위상 검출기 S 곡선 왜곡은 약한 신호에 비하여 강한 신호에 대하여 더 작다. 따라서 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 정상상태 DLL 추적 오류가 더 작고 부드러웠다.

IV. 모의실험

모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 기존의 방법과 비교하였다. 실험조건은 영국의 지상파 디지털 텔레비전 전송 규격을 사용하였다. 즉, 전송모드, 보호구간 길이 그리고 부 반송파의 변조 방식은 각각 2K, 1/32 그리고 64QAM 인 경우를 가정하여 실험하였다. 대역폭은 8MHz, 중심 주파수는 803MHz 를 가정하였고 채널은 COST207 도심지역 모델을 사용하였다. DLL 은 동일한 조건 즉, OFDM 심벌 시간에 정규화된 DLL 의 대역폭인 $BT = 0.01$ 그리고 감쇄 계수는 0.707 로 하였다 [6].

그림 4 는 도플러 주파수 10Hz 에서 기존의 알고리즘과 제안된 알고리즘의 정상상태 DLL 추적 오류를 보여 주는 그래프이다. 제안된 알고리즘이 기존의 방법보다 훨씬 더 작고 부드러운 DLL 추적 곡선을 보여줌을 알 수 있다.

그림 5 는 도플러 주파수 5Hz 조건에서 동일한 실험을 하였다. 도플러 주파수를 5Hz 로 낮춘 이유는 도플러 주파수 10Hz 에 비하여 특정 신호가 페이딩에 의해 신호의 전력이 오랫동안 낮을 확률이 더 크기 때문

이다. 그림 5 에서 보는 바와 같이 가장 먼저 도착한 경로 신호가 페이딩에 의해 오랫동안 신호의 세기가 작을 경우 기존의 방법은 DLL 추적 실패가 될 수 있음을 보여주는 실험결과 이다. 이에 반해 제안된 알고리즘은 DLL 이 잘 동작하고 있음을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 강건하고 작은 타이밍 jitter 를 갖는 OFDM 시간동기 복원 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 FFT 윈도우를 보호구간 안쪽으로 어느 정도의 여유를 두고 구성을 하기 때문에 pre-echo 신호에 의한 ISI 를 방지한다. 또한 DLL 기준 신호를 다원화 함으로 인해서 페이딩에 의해 기준 신호의 세기가 작아 지면 새로운 강한 신호를 기준 신호로 선택하여 DLL 을 적응적으로 동작 시킨다. 따라서 제안된 알고리즘은 정상상태 DLL 추적 오류가 기존의 알고리즘에 비하여 더 작고 부드러울 뿐만 아니라 DLL 추적 실패를 피할 수 있다.

참고 문헌

[1] 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, Aug, 1997

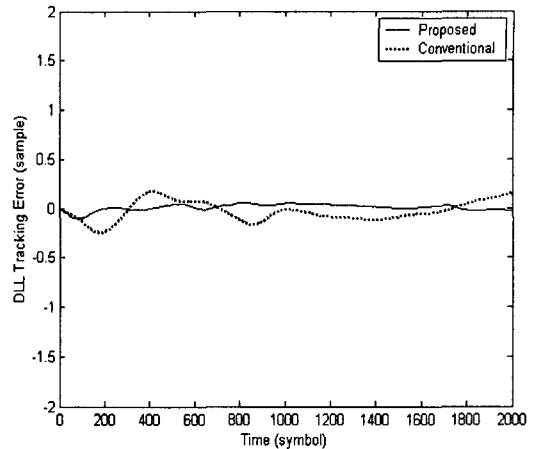
[2] M. Hsieh and C. Wei, "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels", IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 44, pp. 217-225. Feb. 1998. academic, 2002.

[3] F. Classen and H. Meyr, "Frequency synchronization algorithms for OFDM systems suitable for communication over frequency selective channels", Proc. VTC, pp. 1655-1659, 1994.

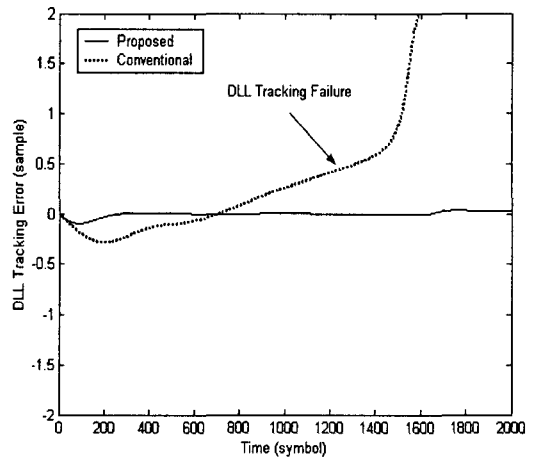
[4] Baoguo Yang, Khaled Ben Letaief, Roger S. Cheng and Zhigang Cao, "Timing recovery for OFDM transmission", IEEE journal on selected areas in comm.,vol. 18, Nov. 2000.

[5] Byungjoon Park, Eunseok Ko, Hyunsoo Cheon, Changeon Kang and Daesik Hong, "A blind OFDM synchronization algorithm based on cyclic correlation", GLOBECOM, 2001.

[6] D.R. Stephens, Phase-Locked Loops for Wireless Communications: Digital, Analog and Optical Implementations, London, Kluwer Academic, 2002.



<그림 4> 정상상태 DLL 추적오류
SNR = 10dB, 도플러 주파수 = 10Hz



<그림 5> 정상상태 DLL 추적 성공과 실패
SNR = 10dB, 도플러 주파수 = 5Hz