

# OFDM 시스템의 효율적인 심볼 타이밍 검출 알고리즘

## A Simple Symbol Timing Detection Algorithm for OFDM Systems

金東奎\*, 崔炯辰\*

( Dong Kyu Kim\* and Hyung Jin Choi\* )

### 요 약

OFDM 신호의 복조를 위해서는 시스템 초기화 과정에서 심벌의 시작 부분을 올바르게 찾아내는 심볼 타이밍 복원 기능이 수행되어야 한다. 이 논문은 심볼 타이밍 오프셋이 신호에 미치는 영향을 분석하고, 보호 구간을 이용한 새로운 심볼 타이밍 복원 알고리즘을 제시하였다. 제안하는 알고리즘은 계산량, 필요 메모리량을 현저하게 줄이면서, 주파수 오프셋과 위상 오프셋의 영향을 받지 않는 장점을 가진다. 그리고, OFDM을 표준 방식으로 채택한 유럽형 디지털 TV 방송 규격을 기반으로 한 시스템 모델에 제안한 알고리즘을 적용하여 AWGN과 다중 경로 페이딩 채널에서 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능을 평가하였다.

### Abstract

To demodulate the received OFDM signal, symbol timing detection which finds symbol start in the received sample stream is required in the system initialization. In this paper, we analyze the effect of symbol timing offset and propose a new symbol timing detection algorithm, which is using the guard interval. The proposed algorithm requires low computational process and small memory size, and dose not be affected by frequency offset and phase offset. In addition, We apply this algorithm to European digital TV broadcasting model based on OFDM to evaluate the performance in AWGN and multipath fading channel by the computer simulation.

Keywords : OFDM, symbol timing detection, DVB-T

### I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 직교 다중 반송파 변조 방식(Orthogonal Multicarrier

Modulation Technique)의 일종으로서 디지털 신호 처리 기술과 VLSI 기술의 발전에 힘입어 디지털 가입자 전화 선로, 지상 디지털 오디오/TV 방송, 그리고 무선 근거리 정보 통신망 등의 다양한 분야에 고속 디지털 전송 방식으로 널리 적용되고 있다[1],[2],[3].

OFDM 전송 기술은 비트 스트림을 다수의 반송파를 이용하여 병렬로 전송하므로써 심벌의 길이가 상대적으로 길어져 다중경로의 영향을 줄일 수 있고,

\* 成均館大學校 電子電氣·컴퓨터工學部  
(Dept. of Electrical and Computer Engineering,  
Sungkyunkwan Univ.)

※ 博士課程 優秀賞

주파수 선택성 페이딩과 같은 채널 열화에 효과적으로 대처할 수 있으며 대역 효율이 뛰어난 방식으로 알려져 있다. 그러나 OFDM 기술은 동기 오류에 민감한 단점을 가지고 있다.

일반적으로 송신기에서 전송된 OFDM 방식의 신호를 수신기가 정확히 복원하기 위해서는 주파수 동기(frequency synchronization)와 시간 동기(time synchronization)가 정확히 수행되어야 한다. 주파수 동기는 수신기의 RF 발진 주파수를 송신기의 발진 주파수에 일치시키는 기능이다. 그리고, 시간 동기는 정확한 신호의 병렬 처리를 위한 심볼 타이밍 복원(혹은 FFT 윈도우 위치 복원) 기능과 수신 신호 중에 신호 대 잡음비가 최대한 곳을 샘플링하기 위하여 ADC (Analog-to-Digital Converter)의 샘플링 클럭을 제어하는 기능으로 구성된다. OFDM 시스템은 일반적으로 초기화 과정동안 심볼 타이밍 복원, 주파수 동기, 그리고 샘플링 클럭 제어 순으로 동작한다.

특히, 전형적인 OFDM 방식은 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference)을 방지하기 위해서 전송 데이터의 후반부를 복사하여 보호 구간(guard interval)을 먼저 전송한다. 보호 구간과 원 데이터 구간간의 상관성을 이용한 심볼 타이밍을 검출할 수 있으며, 이런 종류의 알고리즘들이 다양하게 제안되었다. [3]은 수신된 OFDM 복소 신호들간의 차의 절대값을 이용하는 방법으로 개념적으로 심볼 시작 지점 검출 알고리즘의 개념을 잘 설명해주고 있으며, [4]는 복소 신호들간의 공액 곱셈을 이용하는 방법으로 계산량이 큰 단점이 있다. [5]는 수신 복소 신호의 위상을 2 비트 양자화하는 방법으로 기존 알고리즘에 비해 계산량을 현저하게 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만, 이들 알고리즘의 경우 주파수 오프셋이 존재할 경우 그 성능이 급격하게 저하된다[6]. 즉, 심볼 타이밍 복원은 OFDM 시스템의 초기화 과정에서 첫 단계로 수행되어야 하므로, 초기화 과정에서 존재하는 주파수 오프셋과 위상 오프셋 등의 동기 오프셋에 민감하지 않는 알고리즘이 필요하다. [7]은 [5]의 알고리즘을 개선한 것으로 인접 샘플간의 위상차를 이용함으로써 주파수 오프셋의 영향을 줄일 수 있지만, 전체적인 성능이 타 알고리즘의 성능과 비교하면 열등하다[6]. 그리고, [8]은

복소 신호의 절대값(혹은 전력)간의 차의 절대값을 이용함으로써 동기 오류의 영향을 받지 않는 장점이 있으나, 계산량이 많다는 단점이 있다. 따라서, OFDM의 근본적인 문제점인 방대한 계산량과 많은 메모리의 요구를 해결할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구된다. 이 논문은 동기 오류의 영향을 받지 않으면서, 동시에 계산량과 구현의 복잡도를 낮춘 알고리즘을 제안한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 일반적인 OFDM 시스템 모델에 대해 기술하고 III 장에서는 심볼 타이밍 오류의 영향에 대해서 기술한다. IV 장에서는 간단한 구조를 가지는 새로운 심볼 타이밍 복원 알고리즘을 제안한다. V 장에서는 컴퓨터 모의 실험을 통하여 AWGN과 다중경로 페이딩 채널에서 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고, 제안된 알고리즘이 필요로 하는 메모리량을 기존 알고리즘과 비교 분석한다. 끝으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

## II. OFDM 시스템 모델

그림 1은 일반적인 OFDM 시스템의 구성도이다. 송신 IFFT에서 출력되는  $N$ 개의 부반송파를 사용하는 OFDM 기저대역 신호  $x_l(n)$ 는 식(1)과 같다.

$$x_l(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_l(k) e^{j2\pi kn} \quad (1)$$

여기서  $X_l(k)$ 는  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $k$ 번째 부반송파에 대한 복소 변조값이고,  $n$ 은 샘플 시간을 의미한다. 일반적으로 OFDM 심볼은 심볼간의 간섭을 방지하기 위해 삽입되는  $G$ 개 샘플의 보호 구간(guard interval)과  $N$ 개 샘플의 유효 데이터(useful data)로 구성되므로 전송되는 OFDM 심볼  $s_l$ 은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} s_l &= \sum_{n=-G}^{N-1} x_l(n) \\ &= \sum_{n=-G}^{N-1} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_l(k) e^{j2\pi k \frac{(N+n)}{N}} \\ &\quad + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_l(k) e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \end{aligned} \quad (2)$$

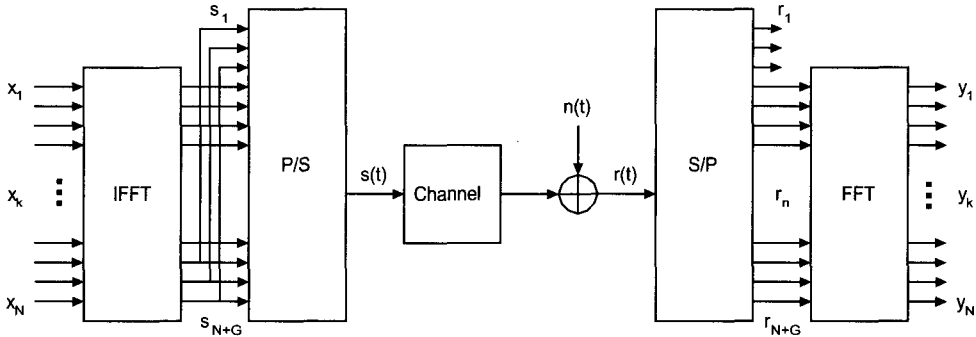


그림 1. OFDM 시스템의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of OFDM systems.

수신된 \$l\$ 번째 OFDM 심볼의 \$n\$ 번째 샘플값은 식(3)과 같이 표현된다.

$$y_l(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} X_l(k) e^{j2\pi k \frac{n}{N}} H(k) \cdot e^{j\left(2\pi k \frac{T_d}{T_u} + \phi_0 + 2\pi \Delta f T_{sym} n\right)} + w_l(n) \quad (3)$$

여기서 \$H(k)\$는 \$k\$ 번째 부반송파의 주파수대에 대한 전송 채널의 주파수 전달 특성이며 \$T\_d\$는 FFT 윈도우 옵셋, \$\phi\_0\$는 송, 수신기의 RF 반송파간의 위상 옵셋, \$\Delta f\$는 송, 수신기의 RF 반송파간의 주파수 옵셋을 의미한다. 또한 \$w(n)\$은 등가 저역 복소 AWGN(additive white Gaussian noise)이며 \$T\_u\$와 \$T\_{sym}\$는 유효 데이터 구간과 OFDM 심볼 구간을 각각 의미한다. 수신 OFDM 심볼은 보호 구간이 제거된 후 FFT 단에 입력된다. FFT에서 출력된 \$l\$ 번째 심볼의 \$k\$ 번째 부반송파에 대한 수신 복소값은 식(4)와 같이 표현된다.

$$Y_l(k) = X_l(k) H(k) e^{j\left(2\pi k \frac{T_d}{T_u} + \phi_0 + 2\pi \Delta f T_{sym} l\right)} + I(k) + W(k) \quad (4)$$

여기서 \$I(k)\$는 주파수 옵셋으로 인하여 발생한 부반

송파간 간섭을 나타내며 \$W(k)\$는 부반송파에 대한 잡음 성분을 의미한다.

특히, 보호 구간은 그림 1의 IFFT와 P/S(parallel-to-serial converter)사이에서와 같이 유효 데이터 구간의 후반부를 복사하여 사용하므로, 이들 구간간의 상관성을 이용하여 심볼의 시작 지점을 검출할 수 있다. 그림 2는 검출 알고리즘의 개념을 잘 설명해준다. 수신된 신호와 유효 데이터 구간만큼 지연된 신호를 겹치면 보호 구간(블록 2)과 원 데이터(반전된 블록 2)가 일치하므로 상관성을 이용하여 심볼의 시작 지점을 검출할 수가 있다.

### III. FFT 윈도우 위치 옵셋의 영향

OFDM 시스템은 다중 반송파를 이용하여 데이터

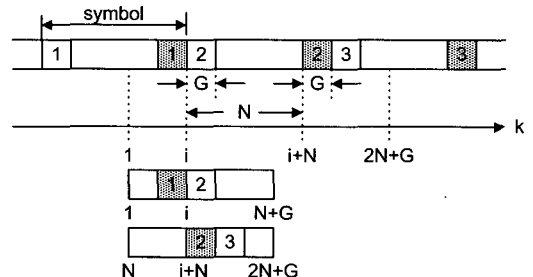
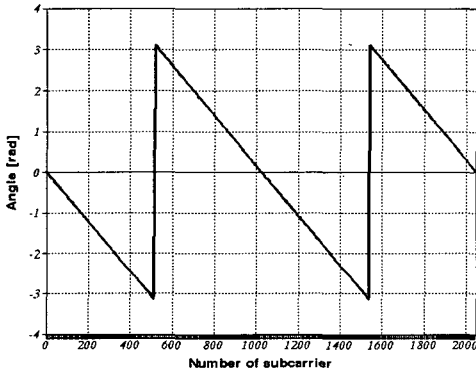


그림 2. OFDM 신호의 시간 영역 특징  
Fig. 2. Characteristic of OFDM signal in the time domain.

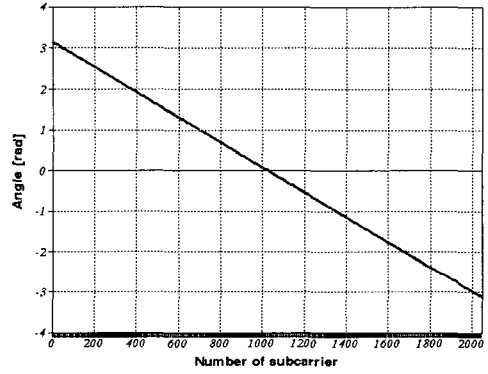
를 병렬로 전송하므로 송신기의 IFFT의 출력값을 수신한 수신기는 재정렬하여 FFT단에 입력하여야 한다. FFT 윈도우 위치 옵셋은 수신기가 정확한 OFDM 심볼의 시작 지점을 추정하지 못할 경우 정확한 유효 데이터 구간이 시작하는 시점과 수신기가 추정한 유효 데이터의 시작 시점간의 차이로 정의되며, 심볼 타이밍 옵셋  $T_d$ 에 의한  $k$ 번째 부반송파에 발생하는 위상 회전량은 식(4)의 지수부에서 첫째항이며, 다시 쓰면 식(5)와 같다[9].

$$\phi(k) = \frac{k}{T_u} \times 2\pi \times T_d \quad (5)$$

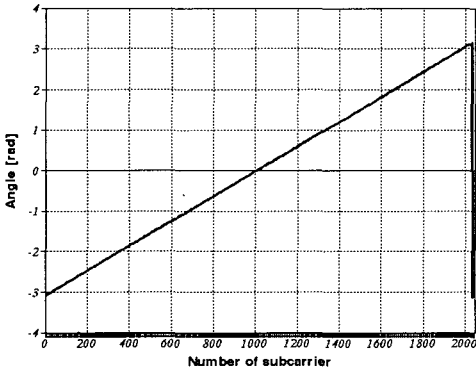
그러므로, 심볼 타이밍 옵셋으로 인하여 발생하는 위상 회전량은 부반송파에 따라 다르게 나타나며 특히 부반송파의 주파수에 비례하여 위상 회전량이 증가한다. 그림 3은 심볼 타이밍 옵셋이 각각 -2, -1, 1, 2 샘플일 때, 각 부반송파에 발생하는 위상 회전량을 보이고 있다. 여기서, 수신기가 추정한 심볼 시작 지점이 정확한 심볼 시작 지점보다 앞설 경우에 (-) 부호를 사용한다. 가로축은 부반송파 번호(혹은 부반송파 주파수)이고, 세로축은 위상 회전량이다.



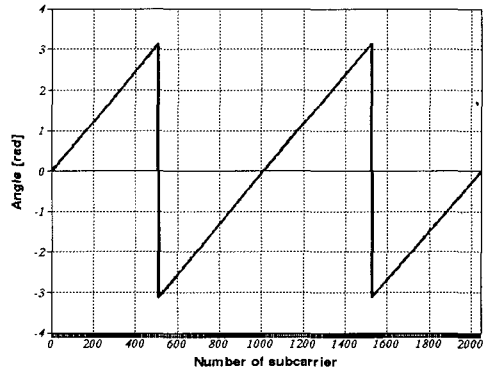
(a) -2 샘플  
(a) -2 samples



(b) -1 샘플  
(b) -1 sample



(c) 1 샘플  
(c) 1 samples



(d) 2 샘플  
(d) 2 samples

그림 3. 심볼 타이밍 옵셋 크기에 대하여 각 부반송파에 발생하는 위상 변화량

Fig. 3. Phase shift vs. subcarrier frequency for various symbol timing offset.

IV. 제안하는 검출 알고리즘

제안하는 검출 알고리즘은 OFDM 심볼의 시작 지점을 찾는 데에 샘플의 절대치 대신에 인접 샘플의 절대치 간의 증감을 이용한다. 그림 4는 제안하는 검출 알고리즘의 기능 구성도를 도시한 것이다. 입력되는 기저대역 OFDM 연속 신호  $r(t)$ 는 ADC를 통하면서 일반적으로 샘플당 8 내지 14 비트 크기의 이산 복소 신호  $y(n)$ 으로 변환된다. 여기서, 표기를 간단하게 하기 위해 심볼 번호  $l$ 을 생략하기로 한다. 이들 복소값에 대한 절대치를 구하는 방법은 식(7)과 같이 근사화 공식을 이용하면 구현의 복잡도와 계산량을 줄일 수 있다[10].

$$|y(n)| = \sqrt{y_r^2(n) + y_i^2(n)} \quad (6)$$

$$\approx |L| + 0.4|S| \quad (7)$$

여기서,  $y_r(n)$ 와  $y_i(n)$ 는 수신된 복소 샘플  $y(n)$ 의 실수부와 허수부이고,  $|L|$ 과  $|S|$ 는  $y_r(n)$ 와  $y_i(n)$ 의 절대값 중 큰 값과 작은 값을 각각 의미한다. 그러나, 식(6)에서  $|S|$ 에 0.4를 곱하는 과정을 식(8)과 같이 다시 근사화하므로써 구현의 복잡도를 더 낮출 수 있다.

$$|y(n)| \approx |L| + 0.5|S| - 0.125|S| \quad (8)$$

즉, 임의의 값에 0.5를 곱하는 동작은 비트 단위로 1회 우측 이동(bit-wise right shift)한 결과와 같으며, 0.125를 곱하는 동작은 비트 단위로 3회 우측 이동과 같다.

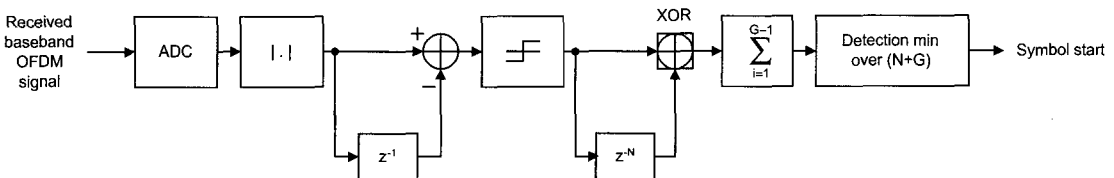


그림 4. 제안하는 심볼 타이밍 복원 알고리즘의 기능 구성도

Fig. 4. Functional block diagram of the proposed symbol timing recovery algorithm.

다음으로 식(9)와 같이 인접한 샘플의 절대치 간의 증감을 판정하여 보호 구간 검출을 위해 사용되는 정보를 1비트 줄인다.

$$z(n) = H[|y(n)| - |y(n-1)|] \quad (9)$$

여기서,  $H[\cdot]$ 는 식(10)과 같이 경판정(hard decision) 동작을 의미한다.

$$H[a] = \begin{cases} 1, & \text{if } a \geq 0 \\ 0, & \text{if } a < 0 \end{cases} \quad (10)$$

경판정의 출력이 1비트의 값을 가지므로, 임의의 샘플열과 유효 데이터 구간만큼 지연된 샘플열간의 상관값을 계산하는 데에 식 (11)과 같이 단순히 XOR (Exclusive-OR)를 사용할 수 있다. 또한, 다음 단계에서  $(G-1)$ 샘플 구간의 길이를 가지는 미끄럼 윈도우(sliding window)를 이용하여 구간 안의 값들을 합한다. 식 (12)와 같이 반복적인 계산으로 합을 구할 수 있다.

$$c(d) = \sum_{i=1}^{G-1} z(d+i) \oplus z(d+i+N) \quad (11)$$

$$c(d+1) = c(d) - [z(d) \oplus z(d+N)] + [z(d+G) \oplus z(d+G+N)] \quad (12)$$

여기서,  $\oplus$ 는 XOR 동작을 의미한다. 식(13)과 같이  $(N+G)$  구간에 걸쳐서 최소값을 가지는  $c(d)$ 를 검출하여 심볼의 시작지점으로 결정한다.

$$\hat{T}_d = \text{Min}_d c(d), \quad d=0, \dots, (N+G-1) \quad (13)$$

여기서  $\hat{T}_d$ 는 추정된 심볼 시작 지점을 의미한다.

V. 모의 수행 결과 및 분석

시스템 모델은 OFDM 방식을 표준으로 채택한 유럽형 디지털 지상파 TV 방송용 규격을 기초로 하였으며, 2048-point FFT를 사용하므로 유효 데이터 구간은 2048 샘플이며, 보호 구간은 4가지 길이가 제공되며, 이 논문에서는 가장 짧은 길이로서 유효 데이터 구간(useful data interval)의 1/32인 64 샘플로 하였다 [11]. 따라서, 심볼 길이는 2112 샘플이다. 신호 매핑은 16-QAM을 사용하였다.

AWGN과 20개의 다중 경로와 직경로(LOS; Line-Of-Sight)가 존재하는 다중 경로 페이딩 채널[11]에서 추정 성능을 평가하였다.

추정 오류는 실제 심볼 타이밍 옵셋에 대한 추정치 간의 차이로 정의할 수 있으며, 단위는 샘플이 된다. 추정 성능은 추정 오류가 소정의 샘플보다 클 확률로 평가하였다. 수신기가 허용할 수 있는 심볼 시작 지점 검출 기능의 추정 오류는 OFDM 수신기의 FFT 블록 다음단의 위상 보상기의 능력에 따라 달라질 수 있으며, 특히 데이터를 전송하지 않고 송,수신기간에 약속한 값을 보내는 데 사용되는 파일럿들간의 주파수 간격에 밀접하게 관련되어 있다. 이 논문은 유럽형 디지털 지상파 TV 방송용 규격을 기초로 하였으므로, 허용 추정 오류를 15 샘플로 정한다[6].

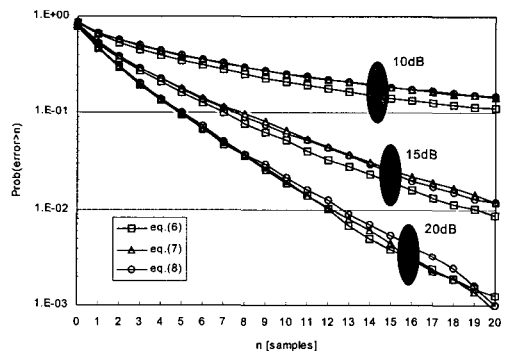
5.1 절대치 근사화가 추정 성능에 미치는 영향

복소값의 절대치를 구하는 방법에서 근사화 계산이 추정 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 식(6), (7), 그리고 (8)에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 그림 5와 같다. 그림에서 식(7)과 (8) 방법 간의 성능 차이는 없으며, 식(6)의 성능과 비교하면, SNR 10, 15dB에서 각각 약 5샘플과 1샘플의 성능 열화가 있음을 알 수 있다. 또한, SNR이 높을수록 그 성능 차이는 줄어든다. 그러므로, SNR이 10dB 이상의 환경에서는 근사화 방식의 적용에 따른

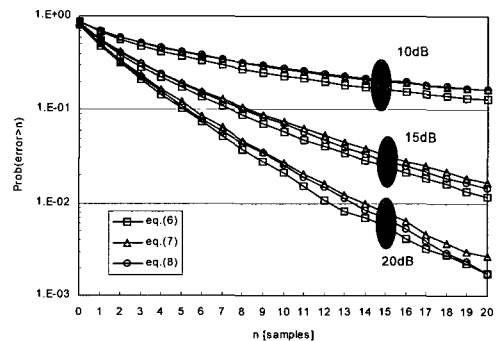
성능 열화를 무시할 수 있다.

5.2 AWGN 환경하의 추정 성능

그림 6은 AWGN 환경에서 제안된 알고리즘의 추정 성능을 보여주고 있다. 특히, 추정 신뢰도를 높이기 위해서 3개의 심볼에 대한 경관정 결과를 누적한 후 심볼 시작 지점을 추정하는 방법도 고려하였다. 추정 오류가 15 샘플이상일 확률이  $10^{-2}$  이하를 만족하려면, 1 심볼을 이용하여 추정할 경우에는 SNR이 약 20dB이상이어야 하며, 3 심볼을 이용하여 추정할 경우에는 SNR이 약 10dB이상이어야 한다.



(a) AWGN  
(a) AWGN



(b) 다중 경로  
(b) multipath

그림 5. 절대치 근사화가 추정 성능에 미치는 영향  
Fig. 5. Effect of Absolute approximation to the estimation performance.

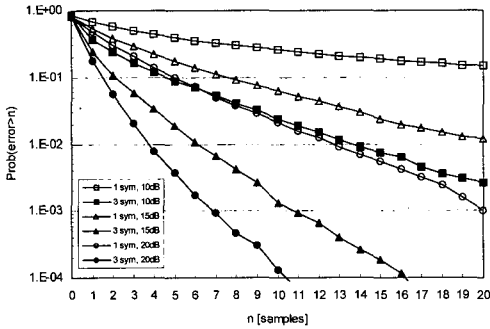


그림 6. AWGN 환경에서 추정 성능  
Fig. 6. Estimation performance in AWGN channel.

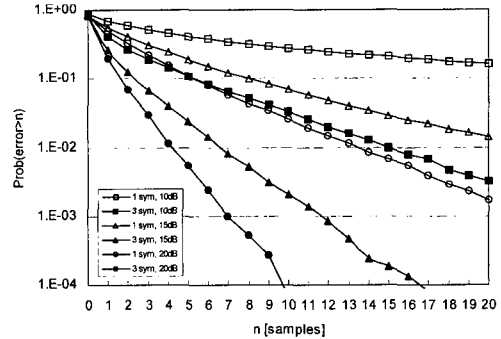


그림 7. 다중 경로 환경에서의 추정 성능  
Fig. 7. Estimation performance in multipath channel.

5.3 다중경로 환경하의 추정 성능

그림 7은 다중 경로 환경에서 제안된 알고리즘의 추정 성능을 보여주고 있다. 다중 경로의 추정 성능은 AWGN 환경에서의 결과와 유사함을 알 수 있다.

그러므로, 방송 시스템의 경우에는 높은 SNR이 제공되므로 3 심볼을 이용하여 추정하는 방법의 적용이 가능하다. 또한, 반복 추정후 추정 결과의 재확인 단계를 추가한다면 1 심볼의 이용한 방법도 사용가능하다.

5.4 필요 메모리량의 분석

계산의 편리를 위해 유효 데이터 구간을  $N$  샘플, 보호 구간을  $G$  샘플, 샘플당 비트 크기를  $b$  비트, 누적 횟수를  $a$  회라고 정의한다. 각 샘플은 복소값이므로 샘플당  $(2 \times b)$  비트 단위로 처리되고, 절대치의 크기는 과부하를 피하기 위해서  $(b + 1)$  비트 단위로 처리되어야 한다.

기본적인 지연기와 미끄럼 윈도우 합산기에서 필요한 메모리량을 비교하면 다음과 같다. 지연기의 경우 식(11)과 같이  $N$  샘플 길이의 지연기(shift registers)가 필요하고, 미끄럼 윈도우 합산기의 경우는 식(11)과 식(12)와 같이  $(G - 1)$  개의 지연기와  $(G - 1)$  개 입력값에 대한 합산값을 저장할 저장기가 각각 필요하다. 그림 8은 미끄럼 윈도우 합산기의 일반적인 기능 구성도이다.

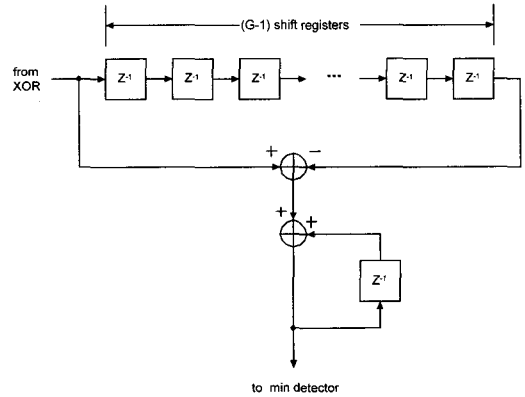


그림 8. 미끄럼 윈도우 합산기의 구조  
Fig. 8. Scheme of the sliding window summer.

표 1은 샘플의 절대값을 그대로 이용하는 알고리즘과 이 논문에서 제안하는 알고리즘에 대해서 지연기와 미끄럼 윈도우 합산기에 필요로 하는 메모리량을 비교한 것이다.

예를 들어,  $N=2048$  샘플,  $G=64$  샘플,  $b=10$  비트/샘플,  $a=3$  회 누적(제안하는 알고리즘에만 해당) 하는 시스템을 고려하자. 절대값을 이용하는 알고리즘은 총 23936 비트의 메모리를 필요로 하며, 제안하는 알고리즘은 1 심볼을 이용하는 경우와 3 심볼을 이용하는 경우에 각각 2185 비트와 8773 비트의 메모리를 필요로 한다. 따라서, 제안하는 알고리즘의 메모리량은 절대값을 그대로 이용하는 알고리즘의 필요 메모리량의 약 9.1 %와 약 36.7 %에 해당한다.

표 1. 각 알고리즘에 대한 필요 메모리량의 비교  
(지연기와 미끄럼 윈도우 합산기)

Table 1. Comparison of the required memory size for each algorithm  
(delay register and sliding window summer).

알고리즘	필요 메모리량 [비트]
절대값을 이용하는 방법	$(b+1) \times N + (b+1) \times 2 \times G$
제안하는 방법(1심볼)	$(b+1) + N + (G-1) \times 2$
제안하는 방법(a심볼)	$(b+1) + N + (N+G) \times a + (G-1) \times a \times 2$

VI. 결 론

이 논문은 OFDM 수신기의 심볼 타이밍 옵셋이 신호에 미치는 영향을 분석하고, 새로운 심볼 타이밍 복원 알고리즘을 제시하였다. 구현의 복잡도와 계산량, 필요 메모리량을 현저하게 줄이면서, 수신신호의 절대치를 사용하여 시스템 초기화 과정에서 존재하는 주파수 옵셋과 위상 옵셋의 영향을 받지 않도록 하였다.

또한, 유럽형 디지털 TV 방송 규격을 기반으로 한 시스템 모델에 제안한 알고리즘을 적용하여 AWGN과 20개의 다중 경로와 직경로가 존재하는 페이딩 채널에서 성능을 평가하였으며, SNR이 비교적 높은 방송 환경에서 적용이 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] John A. C. Bingham, "Multicarrier Modulation for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.  
 [2] B. Le Floch, et al., "Digital Sound Broadcasting to Mobile Receiver," *IEEE Trans. on Consumer Elect.*, vol. 35, no. 3, pp.493-503, August 1989.

[3] Ph. J. Tourtier, R. Monnier, and P. Lopez, "Multicarrier Modem for HDTV Terrestrial Broadcasting," *Signal Processing: Image Communication* 5, pp. 379-403, Elsevier, 1993.  
 [4] F. Scalise, et. al., "A Prototype VLSI Soutlion for Digital Terrestrial TV Receivers Conforming to the DVB-T Standard," *Proc. of HDTV*, 1996.  
 [5] Jan-Jaap van de Beek, et. al., "Low Complex Frame Synchronization in OFDM Systems," *Proc. of ICUPU*, pp. 982-986, 1995.  
 [6] Dong Kyu Kim, Sang Hyun Do, So Ra Park, Hyung Jin Choi, and Jang Jin Choi, "Performance Evaluation of the Symbol Start Detectors for OFDM Systems," *Proc. of ITC-CSCC'98*, July 1998.  
 [7] 박소라, 도상현, 김동규, 최형진, 최장진, "OFDM 시스템의 단순화된 대략적인 FFT 윈도우 위치 복원 알고리즘," *한국방송공학회 학술대회*, pp. 107-110, 1997년 11월.  
 [8] 도상현, 김동규, 이현규, 최형진, "OFDM 시스템의 FFT 윈도우 위치복원에 관한 연구," *제7회 통신 정보 합동학술대회(JCCI)*, pp. 223-227, 1997년 4월.  
 [9] S. U. Zaman and K. W. Yates, "Multitone Synchroni- zation for Fading Channels," *Proc. of ICC*, pp. 946-949, 1994.  
 [10] Marvin E. Frerking, *Digital Signal Processing In Communication Systems*, Chap.6, Van Nostrand Reinhold, 1994.  
 [11] ETSI, *ETS 300 744 Digital Broadcasting Systems for Television, Sound and Data Service; Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television*, April 1996.



저 자 소 개



金 東 奎 (學生會員)

1995년 성균관대학교 전자공학과 학사, 1997년 성균관대학교 전자공학과 석사, 현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 이동통신, 디지털통신 기술, 다중 반송파 변조방식 등임.



崔 炯 辰 (正會員)

1974년 서울대학교 전자공학과 학사, 1976년 한국과학기술원 전기전자공학과 석사, 1982년 미국 University of Southern California 전기공학과 박사, 1976년~1979년 주식회사 금성사 중앙연구소 연구원, 1982년~1989년 미국 LinCom Corp. 연구원, 현재 성균관대학교 전자공학과 정교수. 관심분야는 디지털 통신, 무선통신, 이동통신, 위성통신 및 동기화 기술을 포함한 모뎀 기술 등임.