

# OFDM 기반 시스템에서 파일럿 심볼을 이용한 새로운 정수 주파수 오프셋 추정 기법

준회원 이 영 윤\*, 김 상 훈\*, 종신회원 한 태 희\*, 준회원 유 승 환\*\*,  
종신회원 김 선 용\*\*, 윤 석 호\*

## A Novel Pilot-Aided Integer Frequency Offset Estimation Scheme for OFDM-Based Systems

Youngyoon Lee\*, Sanghun Kim\* *Associate Members*, Tae Hee Han\* *Lifelong Member*,  
Seung Hwan Yoo\*\* *Associate Member*, Sun Yong Kim\*\*, Seokho Yoon\* *Lifelong Members*

### 요 약

본 논문에서는 직교 주파수 분할 다중 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 시스템 기반의 디지털 비디오 방송 (digital video broadcasting: DVB) 시스템에서 파일럿 심볼을 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 기법을 제안하였다. OFDM 기반의 DVB 시스템에서 정수 주파수 오프셋을 추정하는 기존 기법은 파일럿 심볼이 제공하는 조합 정보 중 일부분만 이용하였다. 따라서 본 논문에서는 파일럿 심볼이 제공하는 모든 조합 정보를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 기법을 제안하였다. 기존 기법과 제안한 기법의 정수 주파수 오프셋 추정 성능을 비교하기 위해 덧셈잡음 백색 정규잡음 환경과 (additive white Gaussian noise: AWGN) 다중 경로 레일리 (multipath Rayleigh) 환경에서 모의실험을 수행하였으며, 이를 통해 제안한 기법의 정수 주파수 오프셋 추정 성능이 기존 기법보다 뛰어남을 확인하였다.

**Key Words** : Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), Digital video broadcasting (DVB), Frequency offset, Synchronization

### ABSTRACT

In this paper, a novel pilot-aided integer frequency offset estimation scheme is proposed for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-based digital video broadcasting (DVB) systems. The conventional pilot-aided integer frequency offset estimation scheme proposed for OFDM-based DVB systems exploits the partial information of combinations provided by pilots. Thus, in this paper, we propose a novel integer frequency offset estimation scheme exploiting all information of pilot combinations. To compare the performance of the proposed scheme with that of the conventional scheme, we conduct a simulation in additive white Gaussian noise (AWGN) and multipath Rayleigh channels, which shows that the proposed scheme outperforms the conventional scheme in terms of the probability of integer frequency offset estimation failure.

\* 이 논문은 성균관대학교의 2006학년도 성균학술연구비에 의하여 연구되었음

\* 성균관대학교 정보통신공학부 (syoon@skku.edu), \*\*건국대학교 전자공학부

논문번호 : KICS2008-04-179, 접수일자 : 2008년 4월 17일, 최종논문접수일자 : 2008년 6월 4일

## I. 서론

직교 주파수 분할 다중 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 방식은 다중 경로 페이딩에 강하고 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점 때문에 무선랜 (wireless local area networks: WLANs), 디지털 비디오 방송 (digital video broadcasting: DVB), 디지털 오디오 방송 (digital audio broadcasting: DAB) 등의 무선 통신 표준 변조 방식으로 널리 사용되고 있다<sup>[1][2]</sup>.

그러나 잘 알려진 바와 같이 OFDM 방식은 송수신단 사이의 상대적인 속도에 의해 생기는 도플러 이동 (Doppler Shift) 및 송수신단의 발진기 (oscillator) 동작 불일치로 인해 발생하는 주파수 오프셋에 (frequency offset) 매우 민감하다<sup>[3]</sup>. 그리고 주파수 오프셋이 수신단에서 정확하게 추정되고 보상되지 않으면 부반송파 간 직교성을 파괴함으로써 시스템 성능을 저하시키므로, OFDM 기반 시스템에서 주파수 오프셋 추정 과정은 매우 중요한 단계이다.

주파수 오프셋은 OFDM 심볼의 부반송파 간격으로 정규화한 후 정수부분과 소수부분으로 나눌 수 있다. 데이터 심볼 복조 전에 주파수 오프셋이 정확하게 추정되고 보상되지 않으면 정수부분은 고속 푸리에 변환을 (fast Fourier transform: FFT) 통해 복조된 OFDM 심볼의 부반송파 색인의 순환 이동을 초래한다. 그리고 소수부분은 부반송파 간 직교성을 잃게함으로써 고속 푸리에 변환 후 부반송파 간 간섭을 (intercarrier interference: ICI) 일으킨다<sup>[3]</sup>.

이를 해결하기 위해 최근 OFDM 기반의 DVB 시스템에서 주파수 오프셋을 추정하는 많은 연구가 이루어져 왔다<sup>[2][4][5]</sup>. 연속하는 두 개의 OFDM 심볼의 동일한 색인에 위치한 연속 파일럿 (continual pilots: CPs) 심볼이 제공하는 조합 정보와 하나의 심볼 내에서 연속 파일럿 심볼과 인접한 분산 파일럿 (scattered pilots: SPs) 심볼과의 조합 정보를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 기법이 [2]에서 제안되었다. [4]에서는 연속하는 두 개의 OFDM 심볼에서 분산 파일럿 심볼의 패턴 및 색인을 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하였다. 그리고 [5]에서는 수신한 OFDM 심볼과 파일럿 심볼 템플릿과의 상관관계를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하였다.

그러나 기존 연구들은 파일럿 심볼이 제공하는 조합 정보 중 일부분만 이용하였다. 따라서 본 논문에서는 OFDM 기반의 DVB 시스템에서 시간 및

소수 주파수 오프셋이 완벽하게 추정되고 보상되었다고 가정한 후에, 주파수 영역에서 연속 파일럿 심볼과 분산 파일럿 심볼이 제공하는 모든 조합 정보를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 새로운 기법을 제시하였다. 그리고 제안한 기법의 성능 평가를 위해 모의실험을 한 결과, 제안한 기법은 기존 기법에 비해 파일럿 심볼이 제공하는 보다 더 많은 조합 정보를 이용하기 때문에 기존 기법에 비해 우수한 정수 주파수 오프셋 추정 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

본 논문은 총 6장으로 구성되어 있다. II장에서는 OFDM 시스템과 DVB 시스템의 모형에 대해 알아보았다. III장에서는 OFDM 기반의 DVB 시스템에서 정수 주파수 오프셋을 추정하는 기존 기법에 대해 알아보았다. IV장에서는 파일럿 심볼이 주는 모든 조합 정보를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 새로운 기법을 제안하였다. V장에서는 덧셈꼴 백색 정규잡음과 (additive white Gaussian noise: AWGN) 다중 경로 레일리 (multipath Rayleigh) 환경에서 모의실험을 실행하였으며, 이를 통해 기존 기법과 제안한 기법의 성능을 비교하였다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

## II. 시스템 모형

DVB 시스템은 부반송파의 개수에 의해 2K 모드와 8K 모드로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 총 2048개의 부반송파 중 1705개의 부반송파를 데이터 심볼 및 파일럿 심볼을 전송하는데 사용하는 2K 모드 DVB 시스템을 고려한다. 2K 모드 DVB 시스템에서 하나의 OFDM 심볼은 데이터 심볼 외에 45개의 연속 파일럿 심볼과 142개 또는 143개의 분산 파일럿 심볼을 전송하는데, 이는 채널을 추정하거나 시간 및 주파수 오프셋을 추정하는데 사용된다. 파일럿 심볼의 값은  $+4/3$  또는  $-4/3$ 이며, 이는 의사 랜덤 이진 수열에 (pseudo random binary sequence: PRBS) 의해 결정되고, 파일럿 심볼의 위치 및 값은 송신단과 수신단이 서로 알고 있다. 그림 1은 2K 모드 DVB 시스템에서 연속 파일럿 심볼 및 분산 파일럿 심볼의 위치를 보여준다. 여기서 가로와 세로는 각각 OFDM 시스템의 부반송파 색인과 심볼 색인을 나타내며,  $K_{min}$  과  $K_{max}$  는 각각 데이터 심볼 및 파일럿 심볼을 전송하는데 활성화된 부반송파의 가장 작은 그리고 가장 큰 색인을 의미한다<sup>[6]</sup>. 분산 파일럿 심볼은 하나의 OFDM 심볼 상에서 매 12개

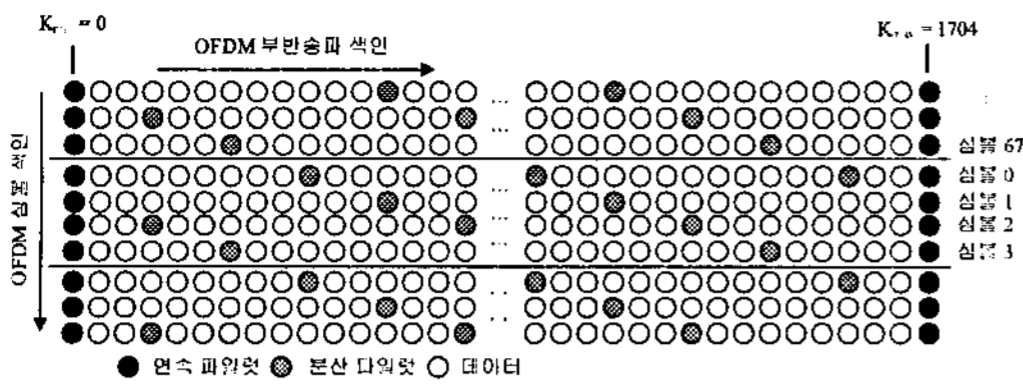


그림 1. 2K 모드 DVB 시스템에서 파일럿 심볼의 위치

의 부반송파마다 삽입되며, 하나의 OFDM 심볼 내에서 분산 파일럿 심볼의 위치는 4개의 OFDM 심볼을 주기로 반복된다. 동일한 부반송파 색인에 삽입된 파일럿 심볼의 값은 동일하며, 연속 파일럿 심볼과 분산 파일럿 심볼의 위치는 서로 겹칠 수 있다.

OFDM 심볼은 역 고속 푸리에 변환을 통해 생성되며,  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $n$ 번째 샘플은 다음과 같다.

$$x_l(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} P_l(k) \exp(j2\pi kn/N), \quad (1)$$

for  $l=0,1,\dots$ , and  $n=0,1,\dots,N-1$ .

여기서  $k$ 와  $N$ 은 각각 부반송파의 색인과 역 고속 푸리에 변환의 크기를 의미한다.  $P_l(k)$ 는  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $k$ 번째 부반송파를 통해 전송되는 파일럿 심볼 또는 데이터 심볼을 의미하며, 위상 편이 방식 (phase shift keying: PSK) 또는 직교 진폭 변조 (quadrature amplitude modulation: QAM) 방식으로 생성된다.

역 고속 푸리에 변환을 통해 생성된 OFDM 심볼  $x_l(n)$ 에 보호 구간을 삽입하고 채널을 통과한 후, 수신된  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $n$ 번째 샘플,  $y_l(n)$ 은 다음과 같다.

$$y_l(n) = \exp(j2\pi\Delta(n+lN_T)/N) \quad (2)$$

$$\cdot [h_l(n) \otimes x_l(n)] + n_l(n).$$

여기서  $N_T$ 와  $\Delta$ 는 각각 보호 구간을 포함하는 OFDM 심볼의 길이 및 부반송파 간격으로 정규화된 주파수 오프셋을 의미하며,  $n_l(n)$ 은 평균이 0인 복소 AWGN을 나타낸다.  $h_l(n)$ 과  $\otimes$ 은 각각 채널의 임펄스 응답과 컨볼루션 연산을 나타낸다.

수신단에서 시간 및 소수 오프셋이 완벽하게 추정되어 보상되었다고 가정하자. 이때 고속 푸리에 변환을 거친  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $k$ 번째 샘플  $Y_l(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_l(k) = \exp(j2\pi l\Delta_i N_T/N) \quad (3)$$

$$\cdot H_l(k-\Delta_i)P_l(k-\Delta_i) + N_l(k).$$

여기서  $\Delta_i$  및  $H_l(k)$ ,  $N_l(k)$ 는 각각 정수 주파수 오프셋 및 채널 응답, 평균이 0인 복소 AWGN을 의미한다. 이 식으로부터 정수 주파수 오프셋은 고속 푸리에 변환 이후, 수신된 OFDM 심볼 색인의 순환적 이동을 추론할 수 있다.

### III. 기존 기법

기존 기법은 파일럿 심볼의 위치 및 값과 관련된 두 가지 템플릿을 사용하여 OFDM 기반의 DVB 시스템에서 정수 주파수 오프셋을 추정하였다<sup>[2]</sup>. 두 가지 템플릿은 각각 동일한 OFDM 심볼 내에 있는 연속 파일럿 심볼과 그 연속 파일럿 심볼과 가장 가까이 있는 분산 파일럿 심볼 간의 조합, 그리고 연속하는 두 개의 OFDM 심볼 내의 동일한 색인에 있는 두 개의 연속 파일럿 심볼 간의 조합을 이용하여 표현된다. 두 가지 템플릿은 식 (4)와 (5)처럼 표현할 수 있으며, 그 값은 +1 또는 -1이다.

$$X_l(k) = \frac{P_l(k')}{P_l(k)}, \text{ for } k \in C_{cp}. \quad (4)$$

여기서  $C_{cp}$ 는 연속 파일럿 심볼의 부반송파 색인의 집합을 의미하고  $k'$ 은  $P_l(k)$ 에 가장 인접한 분산 파일럿 심볼의 부반송파 색인을 의미한다.

$$\hat{X}_l(k) = \frac{P_{l+1}(k)}{P_l(k)}, \text{ for } k \in C_{cp}. \quad (5)$$

템플릿인 식 (4)와 (5)에 사용된 파일럿 심볼 간 채널 응답이 각각 동일하며, 신호대잡음비가 (signal to noise ratio: SNR) 크다는 가정 하에, 다음 식을 통해 정수 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

$$\hat{\Delta}_l = \arg \max_{f \in \{f_1, \dots, f_n\}} \left\{ \text{Re} \left( \sum_{k \in C_{cp}, l=0}^D Z_l(k+f) X_l(k) \right) + \sum_{k \in C_{cp}, l=0}^{D-1} \hat{Z}_l(k+f) \hat{X}_l(k) e^{j2\pi f N_T/N} \right\}. \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 부반송파 간격으로 정규화된 실제 정수 주파수 오프셋 값인  $\Delta_i$ 를 구하기 위하여  $Z_l(k+f)X_l(k)$ 를 통해 미리 선택된  $\alpha$ 개의 시험 값을 의미한다.  $D+1$ 은 정수 주파수 오프셋을 추정하기 위해 사용된 연속하는 OFDM 심볼의 수를 의미하며,  $Z_l(k+f)$ 와  $\hat{Z}_l(k+f)$ 는 각각  $Y_l(k+f)Y_l^*(k+f)$ 와  $Y_l(k+f)Y_{l+1}^*(k+f)$ 로 나타낼 수 있다.

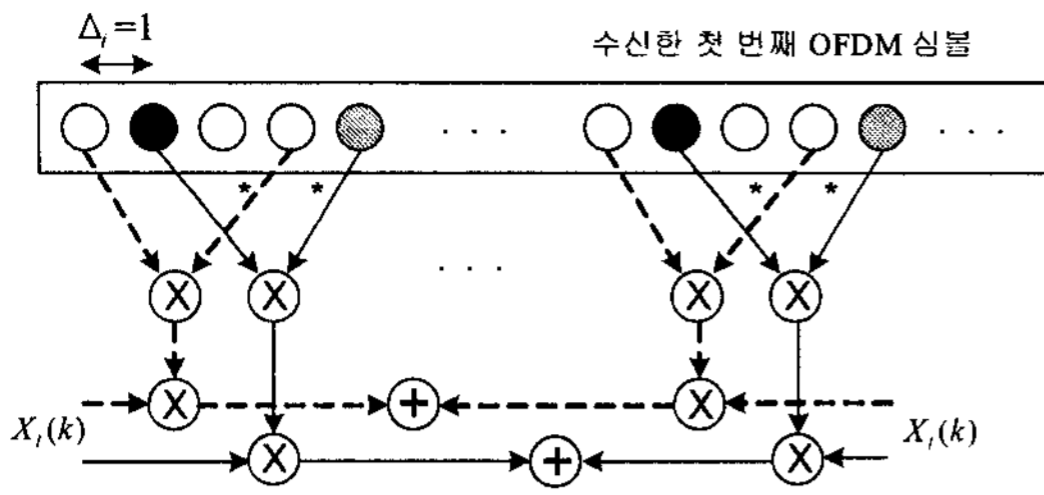


그림 2. 첫 번째 템플릿을 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 구조

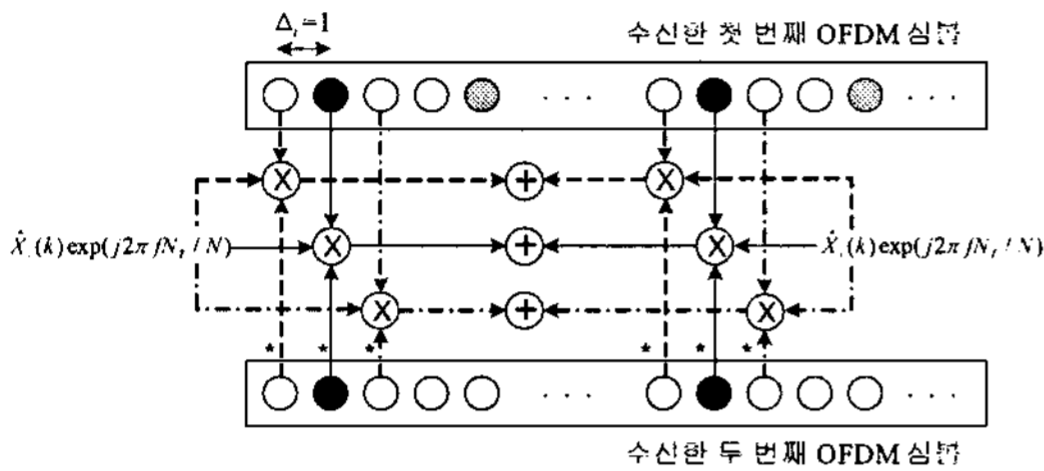


그림 3. 두 번째 템플릿을 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 구조

그림 2와 3은 연속하는 두 개의 OFDM 심볼에서 두 개의 템플릿을 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 기존 기법을 나타낸다.

그림 2는 수신한 첫 번째 OFDM 심볼 내의 연속 파일럿 심볼과 그 연속 파일럿 심볼과 가장 가까이 있는 분산 파일럿 심볼 간의 관계를 나타내는 템플릿인 식 (4)를 이용해서  $\Delta_f = 1$ 인 경우, 정수 주파수 오프셋을 추정하는 구조를 나타낸다. 이와 동일하게 두 번째 OFDM 심볼에도 적용할 수 있다. 그림 3은 연속하는 두 개의 OFDM 심볼 내의 동일한 색인에 있는 연속 파일럿 심볼 간의 관계를 나타내는 템플릿인 식 (5)를 이용하여  $\Delta_f = 1$ 인 경우, 정수 주파수 오프셋을 추정하는 구조를 나타낸다.

#### IV. 제안한 기법

앞 장에서 알아 본 기존 기법은 하나의 OFDM 심볼에 위치하는 연속 파일럿 심볼과 그 연속 파일럿 심볼과 가장 가까이 위치한 분산 파일럿 심볼과의 조합 및 연속하는 두 OFDM 심볼의 동일한 색인에 위치한 두 개의 연속 파일럿 심볼 간의 조합을 이용하여 두 개의 템플릿을 만들었다. 그리고 이를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하였다. 즉, 기존 기법에서는 연속 파일럿 심볼과 분산 파일럿 심볼이 주는 조합 정보 중 일부분만을 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하였다. 따라서 이 장에서는

파일럿 심볼이 제공하는 모든 조합 정보를 이용한 정수 주파수 오프셋 추정 기법을 제안한다.

총  $D+1$ 개의 OFDM 심볼 중에서 연속하는 두 개의 OFDM 심볼에 있는 모든 파일럿 심볼의 조합을 고려한 템플릿은 다음과 같이 표현할 수 있으며, 그 값은 +1 또는 -1이다. 그리고 송신단과 수신단에서 서로 알고 있다.

$$d_{l,m}(n,i) = \frac{P_m(i)}{P_l(n)} \quad (7)$$

여기서  $n \in p_l$ ,  $i \in p_m$ 이며,  $l, m \in \{0, 1, \dots, D\}$ ,  $|m-l| \leq 1$ 이다. 그리고  $p_l$ 과  $p_m$ 은 각각  $l$ 번째와  $m$ 번째 OFDM 심볼에 있는 파일럿 심볼의 부반송과 색인들의 집합을 의미한다. 식 (7)을 이용하여 정수 주파수 오프셋 추정 우도함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$X(f) = \sum_{n,i \in p_l, p_m} d_{l,m}(n,i) Y_l(n+f) Y_m^*(i+f) \cdot \exp(j2\pi f N_T(m-l)/N) \quad (8)$$

수신된  $l$ 번째 OFDM 심볼의  $n$ 번째 파일럿 심볼과  $m$ 번째 OFDM 심볼의  $i$ 번째 파일럿 심볼 간 채널 응답이 동일하고 SNR이 크다고 가정하면, 정수 주파수 오프셋을 추정하기 위한 우도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X(f) &= \sum_{n,i \in p_l, p_m} d_{l,m}(n,i) Y_l(n+f) Y_m^*(i+f) \cdot \exp(j2\pi f N_T(m-l)/N) \\ &\approx \sum_{n,i \in p_l, p_m} d_{l,m}(n,i) |H_l(n+f-\Delta_f)|^2 \\ &\quad \cdot P_l(n+f-\Delta_f) P_m^*(i+f-\Delta_f) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi N_T(m-l)(f-\Delta_f)/N). \end{aligned} \quad (9)$$

실제 정수 주파수 오프셋을 제대로 추정하였다면, 식 (9)는 실수 값을 갖기 때문에, 정수 주파수 오프셋 추정 값은 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

$$\hat{\Delta}_f = \underset{|f| \leq M}{\operatorname{argmax}} \{ \operatorname{Re}(X(f)) \}. \quad (10)$$

여기서  $M$ 은 정수 주파수 오프셋 시험값의 최대 허용 범위이며, 식 (8)의 템플릿을 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 방법을 제안한 기법 I이라 한다. 제안한 기법 I은 식 (8)이 나타내는 것처럼 모든 파일럿 조합 정보를 이용하여 정수 주파수 오프셋

을 추정한다. 그러나 제안한 기법 I의 연산 복잡도는 크며, 실제 환경에서는 OFDM 심볼의 서로 다른 색인의 파일럿 심볼 간 채널 응답이 서로 다를 수 있다.

따라서 이러한 점에 착안해서 제안한 기법 I을 보완하여 연산 복잡도도 줄이고 채널 응답을 고려하여 보다 효율적인 방법을 생각할 수 있다. 하나의 OFDM 심볼에서 12개의 부반송파마다 분산 파일럿 심볼이 삽입되므로, 이를 고려하여 각각의 모든 파일럿 심볼을 중심으로 하여 좌우로 각각 12개의 부반송파를 포함하는 그룹을 생각할 수 있다. 두 개의 연속하는 OFDM 심볼을 고려하면, 그룹의 중심 파일럿 심볼은 첫 번째 OFDM 심볼의 첫 번째 파일럿 심볼로부터 두 번째 OFDM 심볼의 마지막 파일럿 심볼로 이동한다. 그에 따라 각각의 파일럿 심볼을 중심으로 좌우로 12개씩의 부반송파를 포함하는 그룹은 연속하는 두 개의 OFDM 심볼을 따라 이동한다. 그림 4는 첫 번째 OFDM 심볼의 두 번째 파일럿 심볼을 중심으로 하여 좌우 12개의 부반송파를 포함하는 그룹을 이룬 예를 보여준다.

그리고 중심 파일럿 심볼이 이동함에 따라 생기는 그룹 내 파일럿 심볼들의 모든 조합은 식 (7)과 (8)을 기반으로 하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는데 사용된다. 이 방법을 제안한 기법 II라 한다.

표 1은 곱셈 연산 수와 덧셈 연산 수를 통해 기존 기법과 두 개의 제안한 기법 사이의 연산 복잡도를 나타낸다.

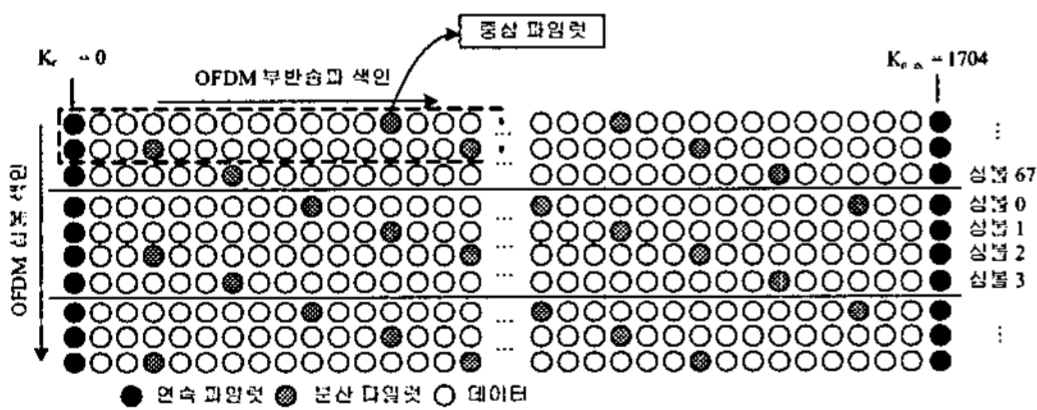


그림 4. 제안한 기법 II에서 사용된 그룹의 예

표 1. 기존 기법과 두 개의 제안한 기법의 연산 복잡도 비교

	곱셈 연산 수	덧셈 연산 수
기존 기법	$N_{cp}(14M+7)$	$N_{cp}(6M+3)$
제안한 기법 I	$N_p(N_p-1)(6M+3)$	$\{N_p(N_p-1)-1\} \cdot (2M+1)$
제안한 기법 II	$\sum_v N_{v,p}(N_{v,p}-1) \cdot (6M+3)$	$[\sum_v \{N_{v,p}(N_{v,p}-1)-1\} + N_G-1] \cdot (2M+1)$

기존 기법과 제안한 기법들 사이의 공정한 비교를 위해  $\alpha=2M+1$ 과  $D=1$ 로 가정했다. 표에서  $N_{cp}$ 는 하나의 OFDM 심볼 안에 있는 연속 파일럿 심볼의 수를 의미하며,  $N_p$ 는 연속하는 두 개의 OFDM 심볼 내 파일럿 심볼의 수를 의미한다. 그리고  $N_G$ 는 제안한 기법 II에서 사용된 그룹의 수를 의미하며,  $N_{v,p}$ 는  $v$ 번째 그룹 안에 있는 파일럿 심볼의 수를 의미한다.

### V. 모의실험 및 성능 비교

이 장에서는 기존 기법과 두 개의 제안한 기법의 정수 주파수 오프셋 추정 실패 확률을 통해 기법 간 성능 비교를 하였다. 2K 모드 DVB 시스템을 고려하였으며, 데이터 심볼은 직교 위상 편이 변조 (quadrature phase shift keying: QPSK) 방식을 통해 생성하였다. 모의실험에 사용된 매개변수는  $M=2$ ,  $\alpha=5$ ,  $D=1$ 이며, 보호 구간의 길이는 OFDM 심볼 길이의 1/8인 256 샘플로 설정하였다. 채널 모델은 AWGN과 다중 경로 레일리 채널을 사용하였으며, 다중 경로 채널은 9개의 경로를 지니며 각각의 경로의 전력은 지수적으로 감소하는 특성을 지니고 있다. 한편 다중 경로의 최대 지연 시간은 8.75  $\mu$ s이며, 최대 도플러 주파수는 (Doppler frequency) 100 Hz로 하였다.

그림 5와 6은 각각 AWGN 환경과 다중 경로 환경에서 기존 기법과 두 개의 제안한 기법의 정수 주파수 오프셋 추정 실패 확률을 보여준다. 제안한 기법은 기존 기법에 비해 파일럿 심볼이 주는 보다 더 많은 조합 정보를 사용함으로써 연산량은 많지만, AWGN 환경에서 기존 기법에 비해 최소 3 dB의 성능 차이를 보인다. 그리고 100,000번의 반복

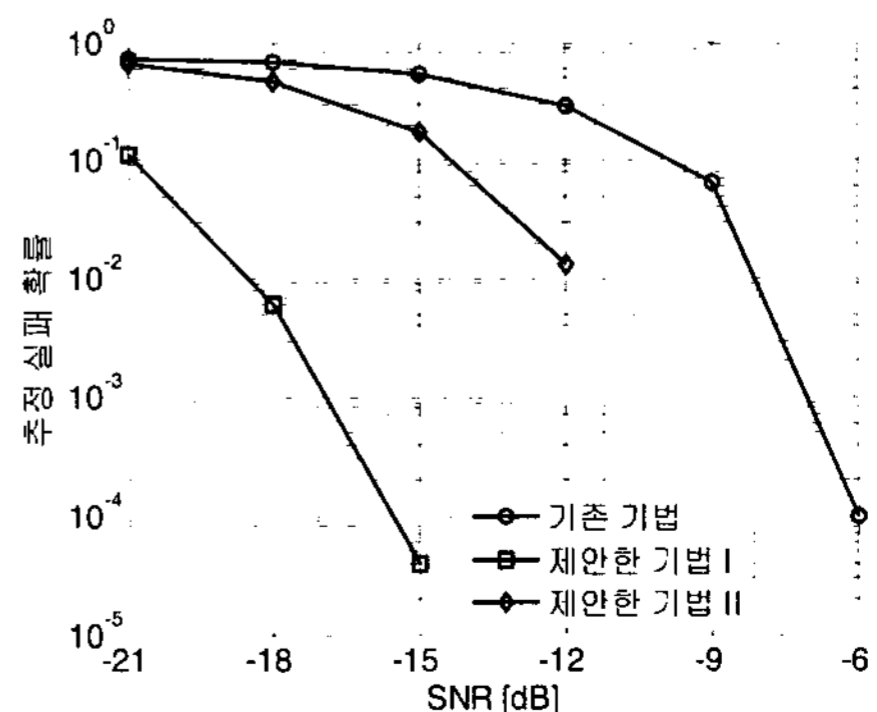


그림 5. 기존 기법과 제안한 기법의 정수 주파수 오프셋 추정 실패 확률 (AWGN 환경)



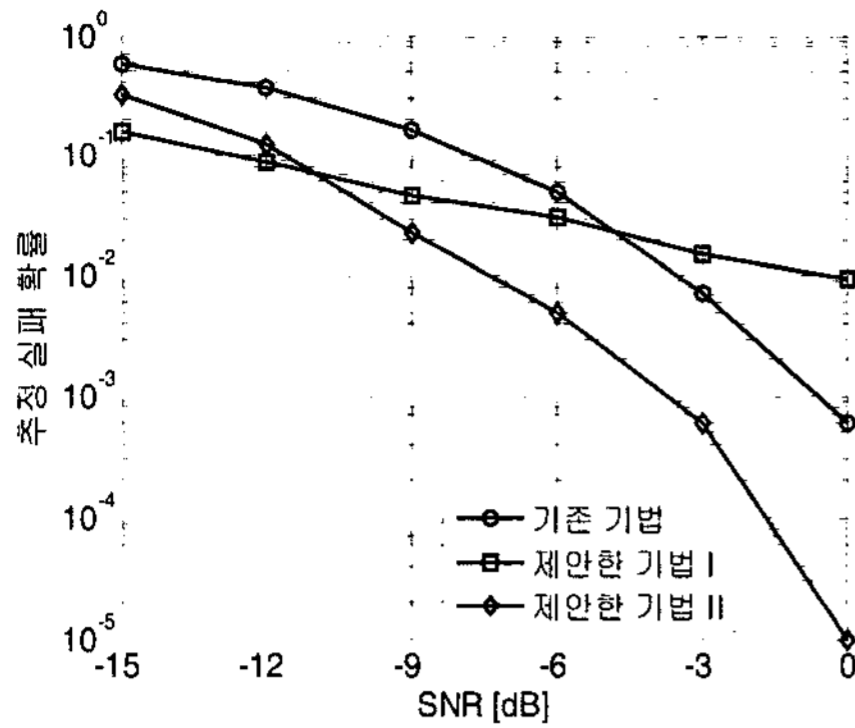


그림 6. 기존 기법과 제안한 기법의 정수 주파수 오프셋 추정 실패 확률 (다중 경로 환경)

모의실험 한 결과 정수 주파수 오프셋 추정 실패가 나오지 않았지만, 더 많은 모의실험을 한다면 SNR이 증가할수록 기존 기법과 제안한 기법 사이의 성능 차이는 더 커질 것이다. 그림 6은 다중 경로 환경에서 기존 기법과 제안한 기법의 성능을 나타낸다. -11 dB 이상인 경우, 제안한 기법 I과 제안한 기법 II의 정수 주파수 오프셋 추정 실패 확률이 역전됨을 알 수 있다. 이는 일반적으로 SNR이 -11 dB 이상인 다중 경로 환경에서 복잡도는 제안한 기법 I에 비해 낮고, 정수 주파수 오프셋 추정 성능은 기존 기법과 제안한 기법 I에 비해 뛰어난 제안한 기법 II가 사용될 수 있음을 나타낸다.

한편, 제안한 기법 I은 템플릿에 사용된 파일럿 심볼 간 채널 응답이 동일하다고 가정한 채 정수 주파수 오프셋을 추정하였기 때문에, 기존 기법에 비해 추정 실패 확률이 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 제안한 기법 II는 이러한 채널 응답을 고려하였기 때문에, 기존 기법과 제안한 기법 I에 비해 다중 경로 환경에서 뛰어난 정수 주파수 오프셋 추정 성능을 보인다.

## VI. 결 론

OFDM 시스템은 송수신단의 이동에 의해 발생하는 도플러 편이와 송수신기단에 있는 발진기 동작 불일치로 인해 발생하는 주파수 오프셋에 매우 민감

하다. 따라서 데이터 복조 과정에서 주파수 오프셋을 추정하여 보상하는 과정은 매우 중요하다. 본 논문에서는 OFDM 기반의 DVB 시스템에서 파일럿 심볼이 주는 모든 조합 정보를 이용하여 정수 주파수 오프셋을 추정하는 새로운 기법을 살펴보았다. 더불어 연산 복잡도 감소 및 파일럿 심볼 간 상이한 채널 응답 등 실제 환경을 고려한 기법도 살펴보았다. 그리고 모의실험을 통해 제안한 기법이 기존 기법에 비해 정수 주파수 오프셋 추정 성능이 뛰어남을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Chang and E. J. Powers, "Efficient frequency-offset estimation in OFDM-based WLAN systems," *Electronics Lett.*, vol. 39, pp. 1554-1555, Oct. 2003.
- [2] K.-T. Lee and J.-S. Seo, "Pilot-aided iterative frequency offset estimation for digital video broadcasting (DVB) systems," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 53, pp. 11-16, Feb. 2007.
- [3] M. Morelli, A. N. D'Andrea, and U. Mengali, "Frequency ambiguity resolution in OFDM systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, pp. 134-136, Apr. 2000.
- [4] M. Li and W. Zhang, "A novel method of carrier frequency offset estimation for OFDM systems," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 49, pp. 965-972, Nov. 2003.
- [5] P. Liu, B.-B. Li, Z.-Y. Lu, and F.-K. Gong, "A new frequency synchronization scheme for OFDM," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 50, pp. 823-828, Aug. 2004.
- [6] ETSI EN 300 744, "Digital video broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television," ETSI, Tech. Rep., Jan. 2001.

