

# 비터비 복호기 출력을 이용한 OFDM 주파수 추적 알고리즘

윤대중, 한동석

경북대학교 전자전기공학부

dshan@ee.knu.ac.kr

## Viterbi Decoder-Aided Frequency Offset Tracking Algorithm for OFDM

Dae-Jung Yoon and Dong Seog Han

School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University

본 논문에서는 OFDM(orthogonal frequency division modulation) 시스템의 비터비 복호기 출력을 이용한 주파수 동기추적알고리즘을 제안한다. OFDM 시스템은 직교성이 보장된 부반송파에 데이터를 실어 전송함으로써, 부반송파간 직교성 유지가 매우 중요하다. 부반송파간 직교성을 해치는 가장 큰 원인으로써 주파수 오프셋을 들 수 있다. OFDM 시스템의 안정적인 신호 수신을 위해서는 잔존 주파수까지 제거할 수 있는 고성능 주파수 동기 알고리즘이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 다중변조 OFDM 시스템에서, 주파수 오프셋을 블라인드 모드로 추적하여 보상 할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 전산실험을 통해 주파수 선택적 채널에서 제안한 알고리즘의 우수성을 보인다.

### 1. 서론

현재 OFDM(orthogonal frequency division modulation)은 차세대 이동통신 및 디지털 방송 시스템을 위해 가장 주목 받고 있는 변조 방식이다. OFDM은 주파수간 직교성을 이용해 다수의 부반송파에 동시에 정보를 실어 전송함으로써, 부반송파간 직교성 유지가 매우 중요하다. 특히 상대적으로 좁은 대역폭 내에 고차의 고속푸리에변환(fast fourier transform, FFT) 변조를 사용할 경우 부반송파간 간격이 좁아져 주파수 직교성 훼손에 더욱 민감하게 반응한다[1].

부반송파간 직교성을 해치는 가장 큰 원인은 주파수 오프셋을 들 수 있다. 주파수 오프셋은 송수신기 시스템간의 국부발진기의 주파수 오차와 도플러 현상에 의해 발생된다. 따라서 안정적인 방송 수신을 위해서는 이를 해결할 수 있는 주파수 동기 알고리즘이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 다중변조 OFDM 시스템에서, 주파수 오프셋을 파일럿의 도움 없이 추적하여 보상 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

본 알고리즘은 Marco Luise의 NDA(non-data

aided) 주파수 오프셋 추정 방식을 이용하여 주파수 선택적 채널에서 우수한 주파수 오프셋 검출 성능을 얻는다[2]. 그러나 다중레벨 QAM(quadrature amplitude modulation)을 사용할 때에는 추적이 불가능하여 고속 멀티미디어 정보의 전송에는 적합하지 않은 단점이 있다. 제안한 알고리즘에서는 이러한 문제점을 보완하여 다중레벨 QAM 신호의 주파수 오프셋 추정도 가능한 장점이 있다. 그림 1과 같이 비터비 복호기 출력을 재부호화하여 얻은 다중레벨 신호에 대하여 NDA 주파수 오프셋 추정값을 구한다. 또한 수신 신호에 대해서도 NDA 주파수 오프셋 추정값을 계산하여 두 추정값의 차를 구함으로써 주파수 오프셋을 검출할 수 있다.

2장에서는 비터비 복호기 출력과 NDA 주파수 추정식을 결합한 잔존 주파수 추정법을 소개하고, 3장에서는 NDA 주파수 추정기법을 설명한다. 전산 실험에서는 제안 알고리즘의 다중레벨 QAM에 따른 NDA 주파수 추적 성능 평가와 함께, 주파수 선택적 채널에서 제안한 알고리즘과 파일럿 이용 추정기의 추정 오차를 비교해 본다.

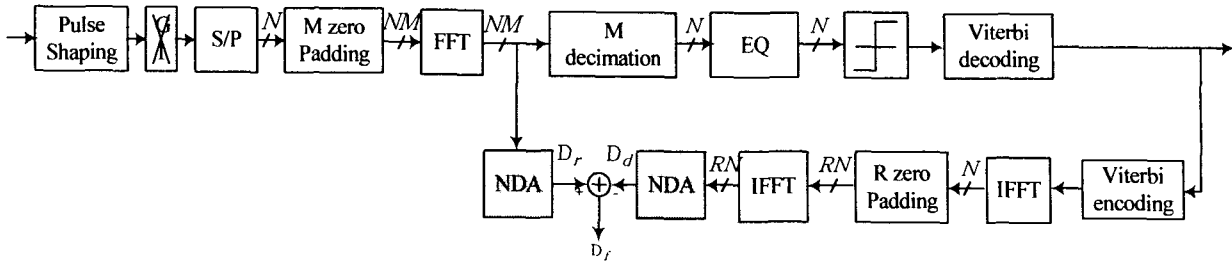


그림 1. 복호기 출력을 이용한 NDA 잔존 주파수 추정기

## 2. 제안한 OFDM 주파수 동기 추적 알고리즘

제안한 알고리즘은 파일럿을 이용하지 않고, 데이터에 의존하여 잔존 주파수를 추정한다. 주파수 오프셋은 신호 스펙트럼의 주파수축 상 이동으로 나타나므로 스펙트럼의 이동량을 측정하면 주파수 오프셋을 추정할 수 있다. PSK변조 방식처럼 모든 데이터의 절대값 크기가 같은 경우 NDA 추정식은 고성능을 보인다. 그러나 M-QAM처럼 다중 레벨신호에 대하여 NDA 주파수 오프셋 추정식을 적용을 하면 주파수 오프셋을 측정할 수 없는 단점이 있다[2]. 이것은 다중레벨 신호의 경우 주파수 오프셋이 없더라도 NDA 추정식을 통하면 오프셋이 있는 것처럼 계산되기 때문이다. 본 알고리즘에서는 다중레벨 신호가 유발하는 오프셋 오차를 계산하여, 실제 추정값에서 빼줌으로써 파일럿 도움 없이 주파수 오프셋을 추적 할 수 있다. 수신 신호에 대하여 M배 영 패딩(padding)을 하여 FFT하면 수신신호에 대한 주파수 영역 오버샘플 신호를 얻을 수 있다. N차 FFT를 이용한 신호를 M배 오버샘플링 된 신호를 식(1)과 같이 나타낸다.

$$X_k = \frac{4A}{MN} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} p_n Q_n \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} e^{-j2\pi(k/M-n-\Delta)l/N} \quad (1)$$

$$\Delta = \Delta_f / \text{subcarrier BW}, k=0,1,\dots,MN-1$$

여기서  $p_n$ 은 각 부반송파에 실려진 데이터를 나타내며,  $Q_n$ 은 채널과 펄스성형 필터의 주파수영역 응답의 곱을 나타낸다. 주파수 오프셋  $\Delta f$ 를 부반송파간격 기준으로 정규화시켜 주파수 오프셋  $\Delta$ 로 나타낸다. 식(1)에서 알 수 있듯이 주파수 오프셋은 주파수 영역 신호의 위상변화를 유발한다. 그림 2와 같이, 주파수 오프셋의 영향으로 인해 각 성상 위치에 정확히 나타나야 할 점들이 회전될 수 있다.

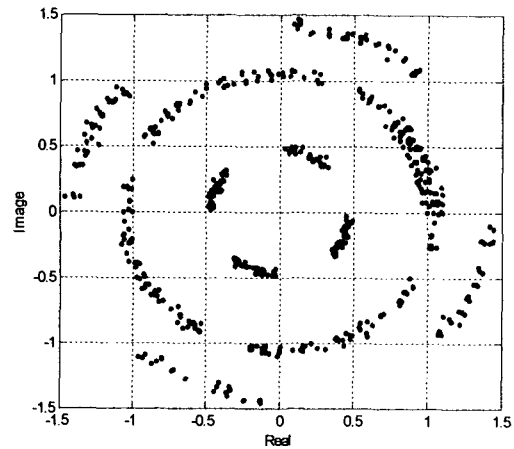


그림 2. 주파수 오프셋의 영향을 받은 신호 성상도

식(1)에서  $\Delta$ 를 변수로 하는 부반송파간 간섭함수  $IF$ 를 식 (2)로 정의한다.

$$IF(k/M-n-\Delta) = \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} e^{-j2\pi(k/M-n-\Delta)l/N} \quad (2)$$

$$= e^{-j\pi(k/M-n-\Delta)(1-1/N)} \frac{\sin(\pi(k/M-n-\Delta))}{N \sin(\pi/N(k/M-n-\Delta))}$$

데이터가 실려있는 부반송파들이  $k/M=$ 정수를 만족하는  $k$ 에서  $\Delta$ 만큼 이동됨을 식(2)에서 알 수 있다. 따라서 주파수 오프셋 추정과정은 주파수축상의 이동범위를 추정하여, 간섭함수  $IF$ 가 영이 될 수 있는  $k$ 값을 결정하는 과정이 된다[2,3]. 추정에 사용된 NDA 추정식은 다음 단원에서 설명한다.

비터비 복호기로부터 재생산된 신호를  $d_n$ 으로 둔다.  $d_n$ 을 이용하여 다중레벨 신호를 재구성하여 NDA 추정식을 적용한다. 식(3)은 채널 효과, 백색 잡음, 주파수 오프셋이 고려되지 않은 다중레벨 신호를 재생산 해낸다[4]. 재생산시 주파수 영역에서 오

버샘플이 필요하므로 IFFT와 영패딩, FFT를 거친 신호를 식(3)으로 정리할 수 있다.

$$X_d(k) = \frac{4A}{RN} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} d_n \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} e^{-j2\pi(k/M-n)l/N} \quad (3)$$

$R$ 은  $d_n$ 에 대한 오버샘플링율을 의미한다. 식(1)과 식(3)를 각각 NDA 추정알고리즘을 이용하여 주파수 옵셋을 계산한다. 식(4)에서 NDA 추정식 결과의 차를 구하면 신호의 주파수 옵셋을 추정할 수 있다.

$$\hat{D} = NDA[X_r(k)] - NDA[X_d(k)] \quad (4)$$

### 3. Non-data aided 주파수 추정식

앞서 언급한 바와 같이, Marco Luise의 NDA 주파수 추정식은 주파수영역에서 스펙트럼이 이동한 양을 측정한다[2]. OFDM의 주파수 영역 신호를 오버샘플링 하게 되면 그림 3처럼 데이터 사이에 정현파모양의 샘플이 구성된다. NDA 추정식은 이러한 특징을 이용해 파 일럿 없이 주파수 옵셋을 추정한다.

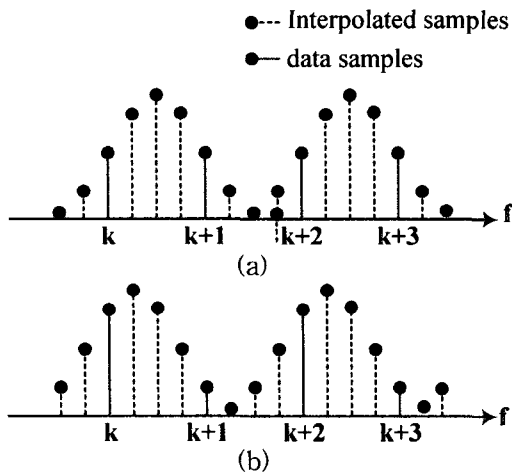


그림 3. 주파수영역의 오버샘플링 시 파형 (a)주파수 옵셋 없는 스펙트럼, (b) 주파수 옵셋 존재하는 스펙트럼

그림3.(a)에서 주파수 옵셋이 없을 경우, 식(1)이  $k/M=$ 정수를 만족하는 점에서 데이터를 검출한다. 데이터를 중심으로 오버샘플링된 샘플들이 정확한 좌우대칭을 이룬다. 그림3.(b)에서는 주파수 옵셋으로 인하여 스펙트럼이 이동하게 되면, 정수배 포인터를 중심으로 한 정현파 위상이 변함을 알 수 있다[1].  $M$ 배 오버샘플링된 신호에 식(5)과 같이,  $k/M$  씩 위상을 곱하여 합산한 후, 식(6)을 이용하면 주파수 영역에서 이동량이

정현파의 위상으로 측정된다[2,3].

$$X = \sum_{k=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} |X_k^Z|^4 e^{-j2\pi \frac{k}{M}} \quad (5)$$

$$\hat{\Delta}_i = -\frac{1}{2\pi} \arg(-X) \quad (6)$$

다중 레벨 신호에 대해서 NDA 주파수 추정 알고리즘을 적용하면, 다중레벨간의 오버샘플링 된 샘플 위상이 흩어져 나타남으로, 주파수 옵셋이 있는 것처럼 측정된다. 따라서 그림 4의 NDA 추정기 블록을 그림 1.에 수신신호와 비터비 복호기 출력에 적용시키면 다중레벨 신호에 대한 주파수 옵셋을 검출 할 수 있다.

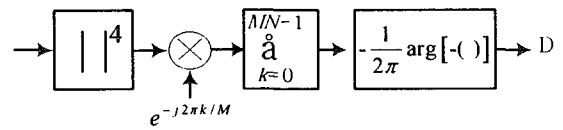


그림 4. NDA 주파수 옵셋 추정기

### 4. 모의 실험

모의 실험은 5MHz 대역폭(샘플을  $t_s = 0.2\mu s$ )에 256-포인트 역이산 푸리에변환을 사용하는 시스템을 이용한다. 64개 샘플을 보호구간으로 사용하였고, 잔존 주파수  $\Delta = 0.1$ 이 주어진 상태에서 주파수 옵셋 추적을 실험하였다. 사용한 채널은 표 1과 같다.

표1. 모의실험 채널 정보

$t$ (ms)	크기	위상( $^\circ$ )	$t$ (ms)	크기	위상( $^\circ$ )
0.08	0.210	21.0	6.070	0.889	183.4
0.325	0.520	243.2	6.521	0.292	159.0
1.481	0.695	271.3	7.158	0.255	312.0
1.933	0.423	230.2	7.975	0.616	147.8
2.407	0.551	354.1	9.552	0.223	233.5
2.769	0.198	78.6	9.887	0.262	97.2
3.123	0.405	132.5	11.137	0.218	74.6
3.959	1.000	0.0	11.78	0.499	315.0
4.529	0.374	174.3	12.132	0.278	90.0

그림 5.는 제안한 알고리즘을 이용하여 얻은 추정값을 식(7)의 망각계수( $\mu = 0.05$ )를 이용하여 수렴시킨 결과이다[5].

$$\mu \Delta_n + (1 - \mu) \Delta_{n-1} = \tilde{\Delta}_n \quad (7)$$

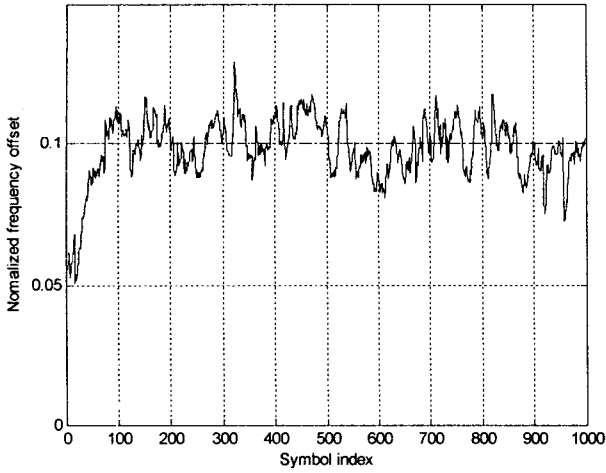


그림 5. 주파수 옵셋 추적 곡선

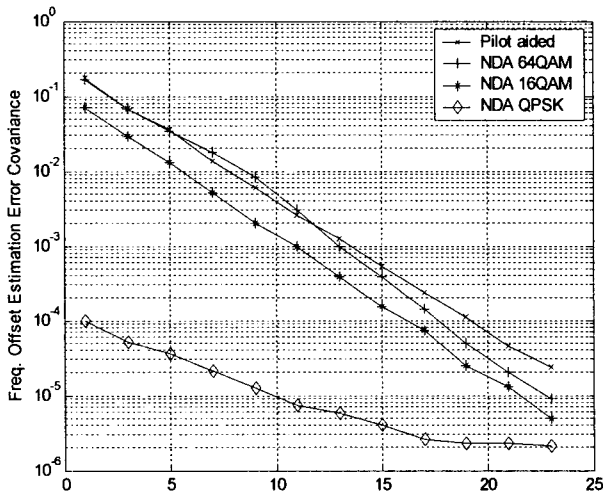


그림 6. 다중레벨에 대한 주파수 옵셋 추적 성능과 파일럿 이용 추정방식과 성능 비교

그림 6은 다중레벨 신호에 대한 주파수 추적성능을 각각 비교한 것이다. 본 알고리즘의 주파수 옵셋 추정값과 주어진 주파수 옵셋 사이의 오차의 분산을 나타낸 그림이다. 파일럿 부반송파 8개를 두어 위상변화를 추적한 결과와 비교 실험 하였다. QPSK인 경우 별도로 비터비 복호기 출력에 대한 추정이 없이도 주파수 옵셋을 추정할 수 있기 때문에 성능이 월등히 우수하게 나타난다. 또한 64QAM과 16QAM에 대해서도 파일럿을 사용하는 추정식 우수하게 나타난다. 또한 NDA 추정식은 파일럿 대신 정보를 전송할 수 있으므로 전송 효율 또한 높일 수 있는 장점이 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 파일럿 정보를 사용하지 않는 다중레벨 신호에 대한 주파수 추정 알고리즘을 제안하였다. 특히 차세대 이동통신 시스템들은 제한된 대역폭 내에 고차수 FFT변조를 사용함으로 부반송파간 간격이 훨씬 좁아진다. 이는 전송율 주파수 직교성 훼손에 더욱 민감하게 반응하는 요인이 된다. 또한 4세대 이동통신에서 요구하는 높은 전송율을 구현하기 위해서는 파일럿 정보 없이 블라인드 모드로 동작하는 시스템 구현이 바람직하다. 따라서 본 알고리즘은 차세대 통신 시스템에서 우수한 성능을 보이는 주파수 추정 알고리즘으로 응용할 수 있다.

## 6. 참고 문헌

- [1] Richard Van Nee and Ramjee Prasad, *OFDM Wireless multimedia communications*, AH, 2000.
- [2] Marco Luise, Marco Marselli and Ruggero Reggiannini, "Low-Complexity Blind Carrier Frequency Recovery for OFDM Signals Over Frequency-Selective Radio Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, pp. 1182, July 2002.
- [3] M. Oerder and H. Meyr, "Digital filter and square timing recovery," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 36, pp. 605-612, May 1988.
- [4] Jeil Jo, Hyung-Woo Kim and Dong-Seog Han, "Residual Frequency Offset Compensation for IEEE 802.11a," *Proc. of IEEE VTC 2004*, pp. 693-697, LA, USA, Sep. 2004.
- [5] Edward A. Lee, *Digital Communication 2nd edition*, Kluwer Academic, 1994.