

OFDM 수신기를 위한 낮은 복잡도의 초기 시간 동기 알고리즘

남광호, 이태홍
영남대학교 전자공학과

Low-Complex Timing Synchronization Algorithm for OFDM System

Kwang-ho Nam, Tai-hong Yi
Dept. of Electronic Engineering Yeungnam University

요 약

본 논문은 OFDM의 Cyclic Prefix를 사용하여 적은 계산량을 통해 보다 빠른 초기 시간동기 획득을 구현하였다. QPSK 매핑 신호를 입력으로 하고 수신단에서 계산의 복잡도를 줄이기 위해 실수 부와 허수 부를 양자화를 하고 양자화된 신호를 이용하였다. 또한 양자화된 신호의 개수를 줄이는 방법으로 샘플링을 통해 기존의 상관성 알고리즘에 적용할 데이터 량을 줄였다. 즉, 계산 량과 복잡도를 줄여 초기 시간 동기 획득률을 유지하면서 복잡도를 줄였다.

1. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 직렬로 입력되는 데이터열을 QPSK나 QAM 신호로 매핑한 후 매핑된 신호를 병렬로 변환하고 이들을 각각 상호 직교성을 가지는 다수의 부반송파에 변조시켜 전송하는 다중반송파 변조 방식이다.[1]

주파수 분할 다중화 방식(FDM)보다 부반송파간 직교성을 가지며 중첩하기 때문에 대역폭 효율이 좋고, 병렬화한 심볼 열의 길이만큼 각 부채널에서 심볼의 주기가 길어지게 되어 단일 반송파 변조 방식에 비해 심볼 간 간섭에 강한 특성을 가지며, 채널의 지연보다 긴 순환전치(cyclic prefix)를 전송되는 심볼 앞에 보호구간으로 삽입할 경우 심볼 간 간섭(ISI)을 흡수할 수 있다. 뿐만 아니라 보호구간의 정보를 이용하여 OFDM 주파수 및 시간 동기 문제를 극복하는 데 많이 이용되고 있다.[1] 또한, 주파수 선택적 페이딩 채널 환경을 다수의 협대역 부채널로 구성된 주파수 비선택적 채널로 볼 수 있기 때문에 수신단에서 각 부채널마다 간단한 단일탐 등화기를 사용하여 보상할 수 있으며, 송수신단의 변복조 과정에 IFFT/FFT를

이용할 수 있는 장점을 지닌다.

따라서, 고속의 데이터 전송을 필요로 하는 유림의 DAB(Digital Audio Broadcasting)와 DVB(Digital Video Broadcasting)의 표준전송방식으로 채택되었으며, IEEE 802.11a의 고속 무선 LAN의 표준으로도 채택되어 적용되고 있다.[4]

그러나, OFDM은 높은 주파수 효율을 위해 좁은 부반송파 간격을 유지해야만 한다. 이로 인해 심볼 간 간섭이 발생하게 되면 시스템에 심각한 성능저하를 초래한다. 이러한 성능저하를 방지하기 위하여 OFDM 전송방식은 시간영역 신호에 대한 보호구간의 사용뿐만 아니라 채널 코딩 및 주파수와 시간영역 각각에 대한 인터리빙 등 다양한 방법을 사용하여 성능저하를 보상하고 있다.

본 논문은 심볼 간 간섭을 완화시키기 위해 삽입된 보호구간을 제거하는 심볼 타이밍 동기의 추정 단계에서 많은 계산량이 필요로 한다는 단점을 극복하기 위해 양자화 기법[2]과 샘플링 단계를 적용하였다. 양자화 단계에서 수신정보를 2bits 정보로 단순화 시켜 하드웨어의 부하를 줄이고 양자화된 신호를 샘플링하여 계산에 사용되는 데이터 량을 줄였다.

2. OFDM 시스템

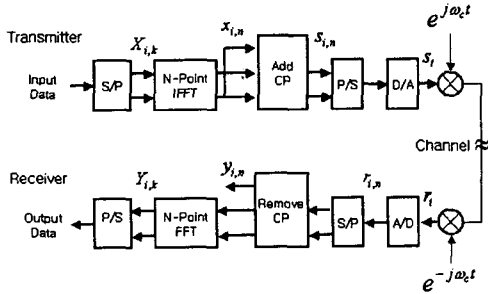


그림 1. OFDM 시스템의 블록도

OFDM 시스템은 상호 직교성을 갖는 복수개의 부반송파를 사용하여 주파수 이용효율을 높이는 방식으로 유무선 채널에서 다중 반송파를 사용하여 고속 데이터 전송에 적합한 방식이다. OFDM 시스템의 변복조 방법에는 송신 단의 IFFT와 수신 단의 FFT를 사용한다. OFDM 시스템의 일반적인 송수신 전송 블록도는 그림 1과 같다. QPSK나 QAM 매핑된 신호가 입력되면 N 개 씩 병렬로 IFFT단계의 입력으로 들어가 각 부반송파에 적용된다. 송신기의 IFFT에서 출력되는 기저대역 신호는 식 (1)과 같다.

$$x_{i,n} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{i,k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

여기서, $X_{i,k}$ 는 i 번째 OFDM심볼의 k 번째 부반송파에 대한 복소 변조값이고, n 은 샘플 시간을 의미한다. 일반적으로 OFDM 심볼은 심볼 간의 간섭을 방지하고 수신단에서 동기획득에 유용한 정보인 L 개 샘플의 보호구간 삽입하여 N 개 유효 샘플 데이터의 앞에 전송한다. 유효심볼 데이터와 보호구간으로 구성된 OFDM의 i 번째 샘플을 s_i 라고 하면 그 신호는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} s_i &= \frac{1}{N} \sum_{n=-L}^{N-1} X_{i,n} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=-L}^{-1} \sum_{k=0}^{N-1} X_{i,k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \\ &\quad + \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} X_{i,k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \end{aligned} \quad (2)$$

특히, FFT에서 출력된 i 번째 심볼의 k 번째 수신 복소값 $Y_{i,k}$ 를 시간 동기 오차만을 고려했을 때 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Y_{i,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_{i,n} e^{-2\pi kn/N} = X_{i,k} e^{-j2\pi k\theta/N} \quad (3)$$

여기서 θ 는 시간동기 오차이며 수신신호에 대한 영향은 크기에 영향을 없고 위상변화만 나타난다. 그 영향은 그림 2와 같다.

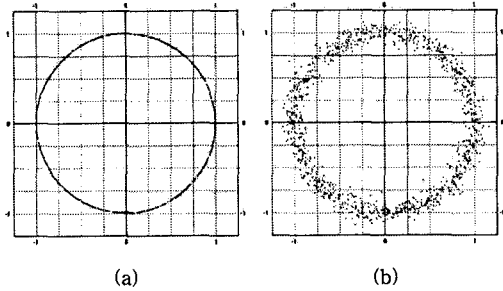


그림 2. 시간동기오차의 영향
(a) no noise (b) SNR=20dB

3. 시간 동기 알고리즘

1) 기존의 시간 동기 알고리즘

수신단에서 $2N+L$ 의 연속된 데이터를 수신한다고 가정하면 이 수신 데이터에는 $N+L$ 개의 완전한 OFDM 심볼 구간이 항상 포함된다. 임의의 위치 θ 를 정하여 이를 기준으로 두 개의 구간 I 와 I' 을 다음과 같이 정의한다.[1]

$$\begin{aligned} I &\equiv [\theta, \dots, \theta+L-1] \\ I' &\equiv [\theta+N, \dots, \theta+N+L-1] \end{aligned} \quad (4)$$

N 은 부반송파의 수(FFT의 길이)이며, L 은 보호구간의 길이이다. 수신신호에 대한 $\forall \theta \in I \cup I'$ 범위 내의 상관관계를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \forall \theta \in I: \\ E\{r(\theta)r^*(\theta+m)\} &= \begin{cases} \sigma_s^2 + \sigma_n^2 & m=0 \\ \sigma_s^2 & m=N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 θ 를 이동시키면서 두 구간 I 와 I' 의 시간영역 수신데이터에 대한 자기 상관관계가 최대가 되는 위치를 구하면 그 위치로부터 심볼의 시작 위치를 추정할 수 있다. 식 (6)은 식 (4)의 구간에 해당하는 데이터 사이의 상관성을 구하여 두 구간의 평균 전력을 빼줌으로써 결과적으로 두 구간의 데이터에 대한 오차 제곱값에 해당한다. 즉, 오차 성분이 가장

적은 값을 찾아 시간 동기 위치인 θ 를 획득하는 것이다.

$$\theta_{est} = \arg \max_{\theta} \left\{ \left| \sum_{n=\theta}^{\theta+L-1} r(n)r^*(n+N) \right| - \frac{1}{2} \left(\sum_{n=\theta}^{\theta+L-1} |r(n)|^2 + |r(n+N)|^2 \right) \right\} \quad (6)$$

2) 복잡도를 줄인 프레임 동기 알고리즘

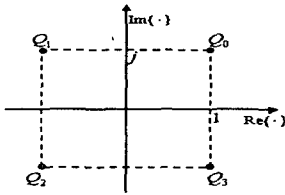


그림 3. 수신된 신호의 양자화

수신신호 $r_{i,n}$ 을 식 (4)에 주어지는 복소 양자화식을 통해 양자화를 수행한다.[2]

$$c(n) = Q[n] \equiv \text{sign}(\text{Re}\{r_{i,n}\}) + j \text{sign}(\text{Im}\{r_{i,n}\})$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$A = \{a_0, a_1, a_2, a_3\} = \{1+j, -1+j, -1-j, 1-j\}$$

양자화된 신호는 2bits로 표현이 가능하며 수신신호에 대한 정보량이 줄어 하드웨어에 대한 복잡도를 줄일 수 있다. 양자화하더라도 양자화된 신호는 시간동기에 대한 정보를 여전히 포함하고 있다. 따라서 양자화된 신호를 식 (7)을 적용하면 식 (8)과 같이 시간 동기 획득에 사용할 수 있다.

$$\theta_{est} = \arg \max_{\theta} \left\{ \left| \sum_{n=\theta}^{\theta+L-1} c(n)c^*(n+N) \right| - \frac{1}{2} \left(\sum_{n=\theta}^{\theta+L-1} |c(n)|^2 + |c(n+N)|^2 \right) \right\} \quad (8)$$

양자화 단계에서 손실된 정보에 의해 동기획득의 열화는 식 (9)와 같이 연속된 심볼에서 구해진 M 개의 수신 심볼에 대하여 획득된 시간동기 값을 평균을 취하여 동기 획득의 성능 향상을 볼 수 있다.

$$\hat{\theta}_{est} \sim \sum_{i=1}^M \theta_{est}^i(\theta) \quad (9)$$

3) 제안된 초기 시간 동기 알고리즘

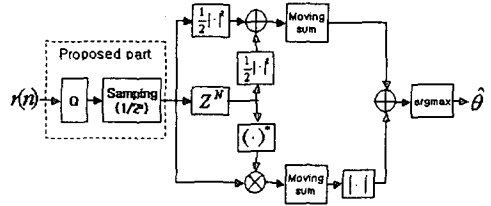


그림 4. 시간동기 획득 블록도

동기 획득 알고리즘은 성능향상을 위한 알고리즘 개발 뿐만 아니라 복잡도를 줄이는 알고리즘 개발도 병행했다.[2][3][4] 동기 획득 과정이 초기시간동기, 초기 주파수동기, 미세 시간동기, 미세 주파수동기 획득 단계로 나누는데 이중 초기 시간동기 획득은 10~20 샘플이내의 동기획득을 목적으로 한다. 따라서 빠르고 단순한 동작이 필요하다.

본 논문에서 계산에 사용되는 구간은 다음 식에 주어진 I_S 와 I'_S 구간으로 데이터 량을 줄인다.

$$I_S \equiv [\theta, \theta+S, \theta+2S, \dots, \theta+l \times S], \quad l=0,1,\dots$$

$$I'_S \equiv [\theta+N, \theta+N+S, \theta+N+2S, \dots, \theta+N+l \times S] \quad (10)$$

I_S 와 I'_S 는 샘플링된 구간이고, S 는 샘플링 간격이며 $l \times S \leq L-1$ 이다.

본 논문에서는 그림 4와 같이 초기 입력 데이터를 식 (7)에 주어진 양자화 단계를 거치고 신호를 다시 샘플링하여 계산량을 줄여 속도를 향상시킨다.

샘플링단계는 그림 5와 같이 보호구간과 유효 심볼 구간의 데이터를 일정한 구간마다 샘플링하여 기존의 상관성 알고리즘을 적용한다.

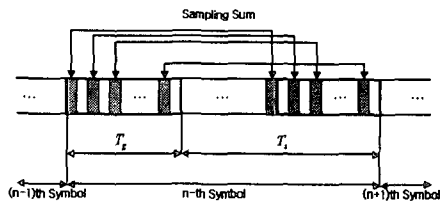


그림 5. 제안된 알고리즘의 영역

4. 모의 실험 및 검토

모의 실험에 사용된 OFDM시스템에서 1024개의 유효심볼, 128개의 보호구간을 사용한 심볼을 생성하여 채널 모델에 적용하였으며 심볼 300개를 관찰하였다.

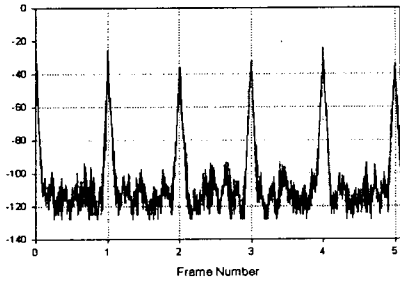
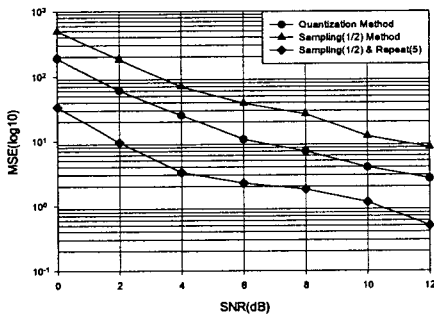


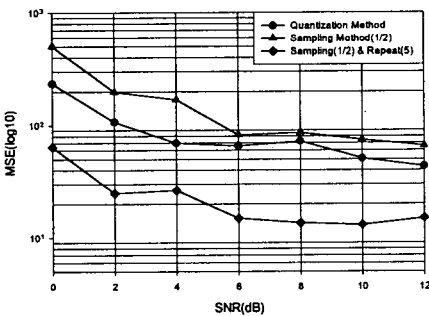
그림 6. 상관 관계에 대한 결과

그림 6은 AWGN 환경 하에서 SNR=10dB인 경우의 수신신호에 대한 제안된 알고리즘을 적용하여 관찰한 초기 시간 동기를 위한 상관값에 대한 그래프이다.

최대치가 발생하는 곳에서 심볼의 시작점이 되며 제안된 알고리즘은 초기 시간동기 획득 알고리즘이므로 10~20 샘플 이내에서 거의 모든 신호에 대해 안정적임을 알 수 있다.



(a) AWGN



(b) Fading Channel

그림 7. SNR에 대한 동기 획득오차의 MSE

본 논문에서는 초기 시간동기를 기준 동기 위치에서의 오차 분산으로 결과를 분석하였다. AWGN채널 환경과 페이딩 채널 환경에서 성능 분석을 하였으며 그 결과 그래프는 그림 7의 (a)와 (b)와 같다.

그림 7에서와 같이 데이터량의 축소로 성능이 열화가 다소 발생하였다. 하지만 심각한 성능열화는 아니며 이를 해결하기 위해 미리 획득된 동기 값을 이용하여 평균값을 구하여 성능 향상을 볼 수 있었다.

5. 결론

OFDM 시스템의 심벌간 간섭을 줄이기 위한 과정 중 초기 시간동기 알고리즘의 복잡도를 줄이는 방법을 제안하였다. 먼저, 수신된 데이터를 기존의 양자화 알고리즘을 적용하여 간단히 하였고, 초기 시간동기 획득의 속도를 높이기 위해 샘플링을 통해 계산되는 데이터량을 줄였다. 이와 같이 동기 획득을 위한 데이터에 대한 전처리를 하여 보호구간의 신호와 유효 심볼 사이의 상관성을 이용함으로써 적은 데이터 량으로 단순화하여 계산에 필요한 복잡도를 줄였다. 이는 하드웨어 구현시 동기 수행성을 위한 복잡도를 줄일 수 있을 것으로 본다.

[참고문헌]

- [1] J.J. van de Beek, M. Sandell, P. O. Börjesson, "ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 45, no. 7, pp. 1800-1805, 1997
- [2] J.J. van de Beek, M. Sandell, M. Isaksson, P. O. Börjesson, "Low-Complex Frame Synchronization in OFDM Systems", in *Proc. IEEE Int. Conf. Universal Personal Conference*, Nov. 1995, pp.982-986
- [3] Donghoon Lee, Kyungwhoon Cheun, "Coarse Symbol Synchronization Algorithm for OFDM System in Multipath Channels", *JCCI*, 2002
- [4] 진상욱, 이태홍, "OFDM 시스템에서 속도 향상을 위한 심볼 타이밍 동기 기법", *한국멀티미디어학회*, pp.56-59, 2001