

OFDM 신호의 동기 알고리즘

허영식, 김기호, 김용훈
 삼성종합기술원 디지털 통신 Lab

(Tel) 0331-280-8173, (Fax) 0331-280-9207, (E-mail) yshur@saitgw.sait.samsung.co.kr

A synchronization algorithm for OFDM signals

Young-sik Hur, Ki-ho Kim and Yong-hoon Kim
 Digital Communication Lab.
 Samsung Advanced Institute of Technology
 yshur@saitgw.sait.samsung.co.kr

Abstract - In this paper, a synchronization method of OFDM signals are introduced and its performance is estimated. A proposed method can perform a frame/symbol timing, carrier frequency synchronizations. Reference symbols consist of two duplicate OFDM symbols carrying signals on every sub-carriers. Performances of synchronization under 60GHz millimeter-wave indoor channels are evaluated, which were measured with frequency-sweeping method in common office buildings. A proposed method has improved performances owing to long averaging durations of synchronization metrics in frame/symbol timing, carrier frequency synchronization procedures.

1. 서론

정보의 고속화, 멀티미디어화가 진행되면서 기존의 무선 주파수 자원으로는 이를 수용할 수 없는 단계에 도달하게 되자, 새로운 주파수 대역인 밀리미터파를 이용한 통신시스템에 대한 필요성이 대두되어 왔다. 그러나, 밀리미터파 대역의 광대역 실내채널은 frequency-selective multipath fading 채널이기 때문에, 심볼길이 가 매우 짧은 고속 디지털 통신 신호를 전송할 때 채널의 time dispersive 특성인 ISI (Intersymbol Interference)의 영향을 없애는 과정이 매우 복잡할 뿐만 아니라, 원하는 성능을 얻기가 쉽지 않다.

한편, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 multipath fading 채널의 길이 보다 훨씬 긴 심볼 길이동안에 블록단위의 여러 데이터를 서로 적교하는 다수의 sub-carrier에 나누어 송/수신한다[1]. 그러므로, 이 방식은 다중경로 채널의 영

향에 효과적으로 대처할 수 있고, 동기화가 간단한 장점 때문에 고속데이터 전송에 적합한 방식으로 널리 연구되어 왔다. 그러나, OFDM시스템은 carrier 주파수 offset에 매우 민감하므로, 수신기에서 carrier 주파수 synchronization을 정확히 수행해야 하며, 심볼의 시작 지점을 정확히 찾아야 올바른 데이터 검출이 가능하다.

보통의 경우 OFDM신호의 동기는 신호에 있는 overhead의 특성을 이용하는데, overhead를 줄이면서 우수한 성능을 얻을 수 있는 동기방식에 대한 연구의 필요성이 제기되어 왔다. Schmidl[2]은 2개의 reference 심볼을 사용하는 동기방법을 제시하였다. 즉, 첫 번째 OFDM 심볼은 주파수영역에서는 짝수번째 sub-carrier에만 신호가 실려있으므로 시간영역에서는 심볼의 반이 나머지 반과 같은 값을 갖는 형태이며, 두 번째 심볼은 모든 sub-carrier 에 신호가 실려있는 형태이다. 이 방법에서는 첫 번째 심볼을 이용하여 심볼 timing 동기와 sub-carrier 주파수 간격내의 carrier 주파수 동기를 수행한다. 또한, 두 번째 심볼을 이용하여 sub-carrier 주파수 간격의 정수 배의 값을 갖는 carrier 주파수 동기를 수행하는 한편, channel estimation 을 수행한다.

본 논문의 2장에서는 동기 reference 심볼과 동기원리를 설명하고, 3장에서는 밀리미터파 실내 채널에서의 동기 알고리즘의 심볼 timing 동기, carrier 주파수 동기 성능을 고찰하고 Schmidl 알고리즘의 성능과 비교하였다. 4장에서는 본 논문의 결론을 맺었다.

2. OFDM 신호의 동기 알고리즘

2.1 동기 reference 심볼 생성 원리

동기 알고리즘의 reference 심볼은 두개의 반복되는

OFDM 심볼로 이루어져 있으며, 각 데이터 frame의 맨 처음 또는 어떤 고정된 순서에 전송된다. 주파수 영역에서 보면, DC와 edge 부근의 virtual carrier 가 실리는 위치를 제외한 모든 sub-carrier 에 DQPSK sub-심볼 신호가 존재하며, reference 심볼의 첫번째 심볼을 그대로 reference 심볼의 두번째 심볼로 사용한다. 또한, data 가 실린 OFDM 심볼들과는 달리 CP(cyclic prefix)를 붙이지 않고 reference 심볼을 이루는 두개의 OFDM 심볼을 연결하여 전송한다.

그림 1은 데이터 frame내에서 reference 심볼과 사용자 데이터 심볼을 전송하는 예를 나타낸다. 그림 2는 reference 심볼의 시간영역 특성을 나타낸다.

첫 번째 referenc 심볼은 주파수 영역에서 보면, 각 sub-carrier에 QPSK sub-symbol 을 지정한 다음, differential encoding한 DQPSK신호를 IFFT하여 만든다. 두 번째 reference 심볼은 첫 번째 심볼을 반복하여 전송한다. 즉 reference 심볼의 주파수 영역 sub-symbol sequence D_n 와 시간영역 sequence x_k 은 다음과 같이 표현된다.

$$D_n = Q^*_{n-1} Q_n \quad (1)$$

$$x_k = IFFT(D_n) \quad (2)$$

여기서, Q_n , D_n 는 각각 QPSK, DQPSK 심볼이며, x_k 는 OFDM심볼의 시간영역 샘플이다

2.2 동기 알고리즘의 동작원리

동기과정의 첫 번째 단계인 심볼 timing 동기를 수행하기 위하여, 수신된 OFDM 신호 샘플 r_k 로부터 심볼 timing metric $M(d)$ 를 구한다. 시간지연과 주파수 offset이 없고, 잡음도 없는 이상적 수신신호를 y_k 라고 할 때, 시간 지연이 d 샘플있고 주파수 offset이 ϕ/T Hz 있는 실제 수신 신호 r_k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_k = y_k - \alpha e^{j2\pi\phi k/N} + n_k \quad (3)$$

식(3)으로부터 심볼 timing metric $M(d)$ 를 구한다.

$$M(d) = |P(d)|^2 / R^2(d) \quad (4)$$

여기서 $P(d)$, $R(d)$ 는 각각 다음과 같다

$$P(d) = \sum_{k=0}^{N-1} r^*_{k+d} r_{k+d+N} \quad (5)$$

$$R(d) = \sum_{k=0}^{N-1} |r^*_{k+d+N}|^2 \quad (6)$$

동기 reference 심볼은 처음 N 샘플이 다음 N 샘플과 같은 값을 갖기 때문에, 동기 reference 심볼에 대한 $M(d)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$M(d) = e^{j2\pi\phi} \sum_{k=0}^{N-1} |y_k|^2 + n_k \quad (7)$$

동기 reference 심볼에 대해서는 첫 번째, 두 번째 심볼간의 correlation 이 매우 커서 $M(d)$ 값이 크지만, 일반 데이터용 심볼 사이에는 correlation 값이 매우 작기 때문에 $M(d)$ 값이 매우 작다. 그러므로, frame의 시작점은 timing metric $M(d)$ 값을 비교하여, 최대인 시점 d_{opt} 를 결정하고, 이로부터 N 샘플 이후에 데이터 OFDM 심볼이 시작된다는 타이밍 정보를 공급한다.

두 번째 synchronization 단계인 carrier 주파수 동기는 sub-carrier 간격 이내의 offset값 ϵ 을 제거하고, sub-carrier 간격의 정수 배의 값을 갖는 offset값을 제거하는 두 단계로 이루어져 있다. 먼저 ϵ 을 구하기 위하여 다음의 관계식을 이용한다.

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \angle \{P(d_{opt})\} = \tan^{-1} \left(\frac{Im(P(d_{opt}))}{Re(P(d_{opt}))} \right) \quad (8)$$

여기서, d_{opt} 는 $M(d)$ 값이 최대인 지점을 나타낸다.

ϵ 을 구하여 reference 심볼에서 제거해 준 후에도 여전히 존재하는 sub-carrier 간격의 정수 배되는 주파수 offset 값을 구하기 위하여 다음의 주파수 offset metric $S(u)$ 를 구한다.

$$S(u) = \left| \sum_n D_n^* F_{n+u} (F_{n-1}^* F_n) \right|^2 \quad (9)$$

여기서 D_n 과 F_n 은 각각 전송신호와 수신신호의 동기 reference 심볼의 QPSK 심볼값이다. 즉, ϵ 이 제거된 reference 심볼의 두번째 N 샘플의 QPSK 심볼과 저장하고 있던 원래의 reference 심볼의 QPSK 심볼의 correlation 이 최대인 shift 값 u_{opt} 를 찾는다. 식(8), 식(9)로부터 구한 ϵ 과 u_{opt} 를 이용하여 총 carrier 주파수 offset 값 ϕ/T 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi/T = (\epsilon + u_{opt})/T \text{ (Hz)} \quad (10)$$

3. 동기 알고리즘의 성능 고찰

60GHz 밀리미터파 실내채널에서 OFDM신호에 대한 동기 알고리즘의 성능을 고찰하고 Schmidl 알고리즘의 성능과 비교한다.

밀리미터파 실내 통신 환경은 그림 3과 같은 상황에서 frequency-sweeping 방법을 이용하여 측정된 채널 임펄스 응답 중에서 가장 열악한 채널인 ecs7를 사용하였다.

또한, 표 1은 동기알고리즘의 성능을 고찰하기 위한 시뮬레이션에 사용된 OFDM전송방식의 사양을 나타낸다.

표 1. OFDM 전송방식 사양

OFDM 사양	
Data Rate	50Mbps
Bandwidth	75MHz
# Sub-carriers	256
#Virtual carrier	5 for DC 29 for Edges
Sub-symbol	DQPSK
CP	20 samples

먼저 주파수 offset값 $\phi = 0.7/T$ Hz를 channel에서 인가하여 동기알고리즘의 심볼 timing, carrier 주파수 동기 성능을 계산하였다.

그림 4는 동기알고리즘의 timing 동기 성능을 timing 동기estimation error의 평균전력 $E\{e^*_f * e_f\}$ 으로 표현한 그림이다.

그림 4에서 곡선 A, B는 각각 본 논문의 동기 알고리즘과 Schmidl 알고리즘의 timing 동기 estimation error의 평균전력 $E\{e^*_f * e_f\}$ 을 나타내는 그림이다. 곡선 A가 곡선 B보다 심볼 timing 동기 성능이 우수하며 곡선 A의 경우에는 SNR의 증가에 따라 timing 동기 estimation 성능이 개선되지만, 곡선 B의 경우에는 SNR = 14dB 이상에서 SNR이 증가해도 성능개선이 없음을 알 수 있다.

그림 5는 주파수 offset 동기성능을 주파수 offset estimation error의 평균전력 $E\{e^*_f * e_f\}$ 으로 표현한 그림이다.

그림 5에서 곡선 A, B는 각각 본 논문의 동기 알고리즘과 Schmidl 알고리즘의 carrier 주파수 offset estimation error의 평균전력 $E\{e^*_f * e_f\}$ 을 나타내는 그림이며, 곡선 A가 곡선 B보다 carrier 주파수 동기 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5에서 본 논문의 동기 알고리즘의 성능이 더 우수한 이유는 심볼 timing 동기 metric M(d)와 carrier 주파수 offset metric S(u)의 averaging 길이가 N으로서 Schmidl 알고리즘의 N/2 보다 2배 길기 때문에 노이즈에 대한 동기성능이 우수하기 때문이다.

그림 6은 각각 동기알고리즘이 원활하게 동작할 수 있도록 SNR값을 17dB 유지하고, 주파수 offset값이 $0.2/T \sim 3.8/T$ Hz 범위의 값을 가질 때 동기 알고리즘의 carrier 주파수 동기 성능을 고찰한 것이다. 이때, sub-carrier 간격의 정수 배의 carrier 주파수 offset값을 구하기 위한 metric S(u)의 계산에서 correlation의 최대 shift값을 3일 때 계산한 결과이다.

그림 6으로 부터 곡선 A의 성능이 B보다 우수함을 알 수 있으며, 이는 이미 언급한 바와 같이 carrier 주파수 offset metric의 averaging 길이가 길기 때문에 노이즈에 대한 성능의 차이 때문이다.

또한, 곡선 A, B 모두 $3/T$ Hz이상의 carrier 주파수 offset값에서 주파수 offset estimation 값이 급격히 증가하여 동기 기능을 수행하지 못하는 것을 알 수 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 carrier 주파수 offset 값을 구하기 위한 metric S(u)의 계산에서 correlation의 최대 shift값을 3으로 하였기 때문에 ($-3/T \sim 3/T$) Hz 이상의 주파수 offset값에 대해서는 전혀 carrier 주파수 동기를 수행하지 못하기 때문이다. 그러나, 만약 S(u)의 최대 shift값을 N으로 할 경우에는 임의의 carrier 주파수 offset 값이라도 계산하여 correction 해 줄 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 OFDM신호의 frame/symbol timing 동기 및 carrier 주파수 동기를 수행하는 동기 알고리즘을 소개하고, 성능을 고찰하였다.

동기 reference 심볼은 virtual carrier를 제외한 모든 sub-carrier에 신호가 실린 OFDM 심볼을 연속하여 2번 전송한다.

60GHz 밀리미터파 실내 통신환경에서 동기 알고리즘

의 성능을 고찰하기 위하여 frequency-sweeping 방법으로 일반 사무실에서 측정한 채널 임펄스 응답을 사용하였다.

본 논문에서 제시한 동기 알고리즘과 Schmidl 알고리즘의 성능을 비교하였다. 본 논문의 동기 알고리즘의 심볼 timing 동기 metric $M(d)$ 와 carrier 주파수 offset metric $S(u)$ 의 averaging 길이가 N 으로서 Schmidl 알고리즘의 $N/2$ 보다 2배 길이 때문에 노이즈에 대한 동기 성능이 우수하다.

(*) 본 논문은 정보통신부 국책과제의 연구결과임.

[참고문헌]

[1] L.J. Cimini, "Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, NO.7, pp 665-675 July 1985
 [2] Schmidl and Cox, "Low-overhead, low-complexity burst synchronization for OFDM," *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 1301-1306, June 1996

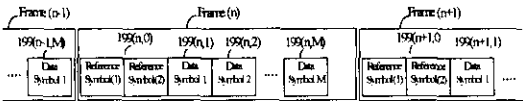


그림 1. 데이터 frame에서 reference 심볼 과 데이터 OFDM 심볼

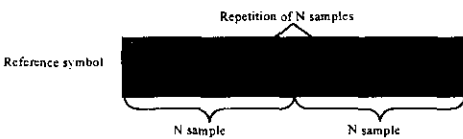


그림 2. 동기 reference 심볼의 시간영역 특성

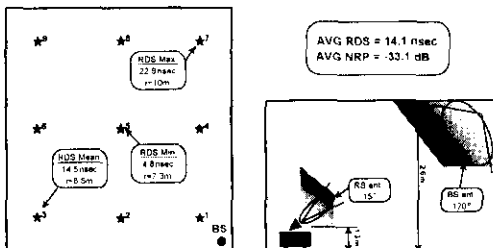


그림 3. 밀리미터파 실내 통신 환경

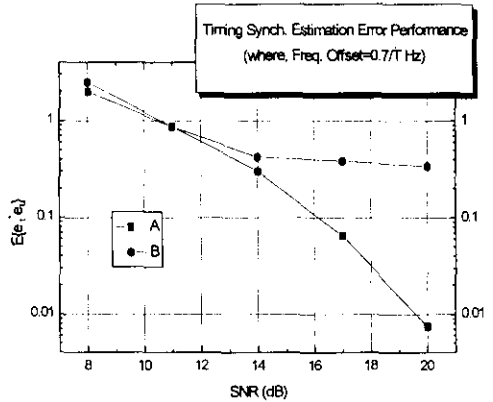


그림 4. 동기 알고리즘의 $E\{e^*, e_f\}$

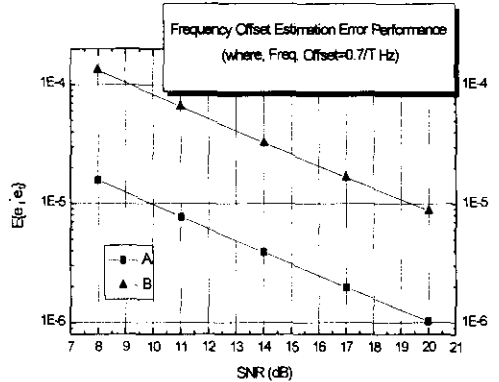


그림 5. 동기 알고리즘의 $E\{e^*, e_f\}$

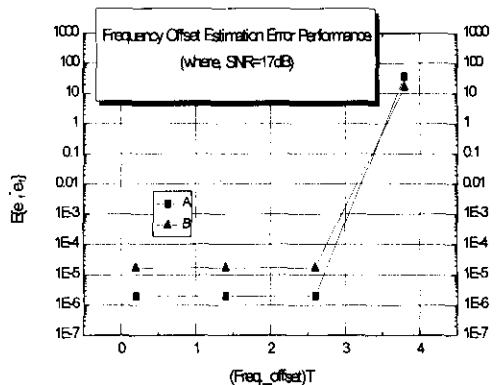


그림 6. 주파수 offset 값에 따른 $E\{e^*, e_f\}$