논문 2010-47IE-3-6

MB-OFDM UWB 시스템에서 초기 반송파 주파수 동기의 정확도 향상을 위한 다중 심볼 간격 추정 알고리즘

(A Multiple-Symbol Interval Estimation Algorithm for Precision Improvement of Initial Carrier-Frequency Synchronization in Multiband-OFDM UWB System)

진 용 선*, 박 계 완**

(Yong-Sun Jin and Kye-Wan Park)

요 약

본 논문은 MB-OFDM UWB 시스템에서 양자화 잡음의 영향에 의해 저하된 초기 반송파 주파수 오프셋 추정의 정확도를 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 일반적인 OFDM 시스템에서 반복적으로 이웃하는 프리엠블 심볼들이 초기 반송파 주파수 동기에 사용되지만, 수신부 A/D 변환기에서 발생한 양자화 잡음의 영향에 의해 주파수 오프셋 추정의 성능은 제한된다. 본 논문에서는 초기 주파수 동기를 위해 이웃하는 한 심볼 간격의 프리엠블 심볼을 사용하는 일반적 방식을 위상 모호성 (phase ambiguity)이 발생하지 않는 범위 안에서 바로 이웃하지 않는 다중 심볼 간격의 프리엠블 심볼에 기반한 방식으로 확장하여 초기 주파수 오프셋 추정의 성능을 향상시키는 다중 심볼 간격 추정 알고리즘이 제안된다. 또한 본 논문은 3-대역 도약 (hopping)하는 최대 30 개의 프리엠블 심볼이 4-비트 A/D 변환기를 통해 입력될 때 최적의 다중 심볼 간격이 '6'임을 구하여 제시한다. MB-OFDM UWB 시스템용 채널 환경에서의 시뮬레이션 결과, 제안된 다중 심볼 간격 추정 방식은 5 ppm 미만의 정확도로 초기 주파수 오프셋을 추정할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose an algorithm to improve the precision of initial carrier-frequency offset estimation for multiband-OFDM (MB-OFDM) UWB system which is considering the quantization-noise effect. In the general OFDM system, the two adjacent and repeated preamble symbols are used for the initial carrier-frequency synchronization while the performance of the frequency-offset estimation is bounded by quantization effect generated from analog-to-digital conversion at the receiver. This paper proposes a method in which one-symbol interval between two adjacent preamble symbols for the initial frequency synchronization is extended to multiple-symbol interval between non-adjacent symbols in an extent that phase ambiguity does not occur. In this paper, we also present '6' as optimal multiple symbol interval for the MB-OFDM system with 30 preamble symbols on 3-band hopping and with 4-bit A/D conversion at the receiver. Under the channel environments for the MB-OFDM UWB system, the simulation results show that the proposed estimation algorithm can achieve the initial estimation in offset precision less than 5 ppm.

Keywords: MB-OFDM, UWB, Carrier-Frequency Synchronization, Frequency-Offset Estimation

I. 서 론

UWB (Ultra Wide Band)는 다양한 무선 통신 분야에서 주목받고 있는 기술들 중 하나이다. UWB 시스템은 기존 통신 시스템에 비해 광대역을 이용하여 초고속

* 정회원, 국제대학교 정보통신과
(Kookje University)
** 학생회원, 한양대학교 전자공학과
(Hanyang University)
접수일자: 2010년2월24일, 수정완료일: 2010년8월31일

통신이 가능하므로, 대용량 멀티미디어 송수신에 적합하다. 광대역을 이용하는 OFDM에 기반한 MB-OFDM (Multi-band Orthogonal Frequency Division Multiplex) UWB 시스템은 IEEE 산하 802.15.3a 연구그룹에서 국제 표준 중 하나로 고려되었으며[1~4], WiMedia 국제 단체에서 무선 USB 등의 응용에 대해 국제 표준 및 시스템 개발이 진행 중이다[5]. 일반적인 OFDM 시스템의 수신부에서는 반송파 주파수 (Carrier Frequency)의 오프셋 추정 (Offset Estimation) 또는 동기 (Synchronization)는 상당히 정확하게 이루어져야 하는데, 주파수 오프셋이 부반송파들 (Sub -carrier) 사이의 직교성 (Orthogonality)을 깨뜨려 성능을 저하시키기 때문이다[5~7]. MB-OFDM 시스템 또한 OFDM 모듈을 가지고 있어 반송파 주파수의 오프셋에 민감하다. 국제 표준 그룹에서 제시한 MB-OFDM 시스템 사양은 송신 반송파 주파수 내성 (Tolerance)은 ±20 ppm 이내 이어야 한다고 기술하고 있다[1~3]. 이것은 수신기에서 최대 ±40 ppm 주파수 오프셋이 발생할 수 있음을 뜻한다. 그러므로, MB-OFDM UWB 수신기는 이러한 주파수 오프셋 발생 상황에 대한 주파수 동기를 수행하여야 한다. 수신기의 소모 전력과 하드웨어 복잡도를 고려하여 국제 표준 그룹에서는 MB-OFDM 수신기가 4-비트 A/D 변환기를 가지고 구현되도록 권장한다[1~2]. 이렇게 낮은 해상도의 A/D 변환기에 의해 발생한 양자화 잡음 (Quantization Noise)은 추정하고자 하는 주파수 오프셋의 값과 유사하거나 그보다 클 수 있다. 이 경우에 주파수 오프셋에 대한 추정 정확도는 저하된다. 그러므로, 양자화 잡음을 극복하여 초기 반송파 주파수 동기의 정확도를 향상시키는 방법의 제안은 중요하다.

본 논문은 4-비트 A/D 변환기에 기반한 MB-OFDM UWB 수신기용 반송파 주파수 오프셋 추정 알고리즘 및 구조를 제안한다. 양자화 잡음에 의한 추정 성능 저하를 감소시키기 위해 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 위상 모호성이 발생하지 않는 범위 안에서 오프셋 추정에 사용되는 프리엠블 (Preamble) 심볼 간격을 확장하는 방법에 기반한다. 제안된 알고리즘은 최대 ±40 ppm 주파수 오프셋과 최소 -4.3 dB SNR (Signal-to-Noise Ratio)을 갖는 채널 환경 아래에서 시뮬레이션되었다. 성능 시뮬레이션 결과, 3-대역 도약하는 30 개의 프리엠블을 갖는 MB-OFDM UWB 시스템에 대해 6 심볼 간격의 주파수 추정이 효율적임을 볼 수 있었다.

Ⅱ. 반송파 주파수 동기에서의 양자화 잡음 영향

OFDM 시스템에서 수신부 반송파 주파수의 동기 또는 오프셋 추정은 이웃하면서 반복되는 프리엠블 심볼에 기반한 방법들에 의해 이루어진다[7~9]. 주파수 오프셋에 의해 영향받은 수신 신호는 시간 간격에 비례하는 위상 회전 (Phase Rotation)을 갖는다. 이것은 이웃하면서 반복되는 심볼의 자기 상관 (auto-correlation)을 통해 반송파 주파수 오프셋을 반영하는 위상 회전을 구할 수 있음을 뜻한다.

디지털 무선 통신 시스템에서 사용되는 A/D 변환기

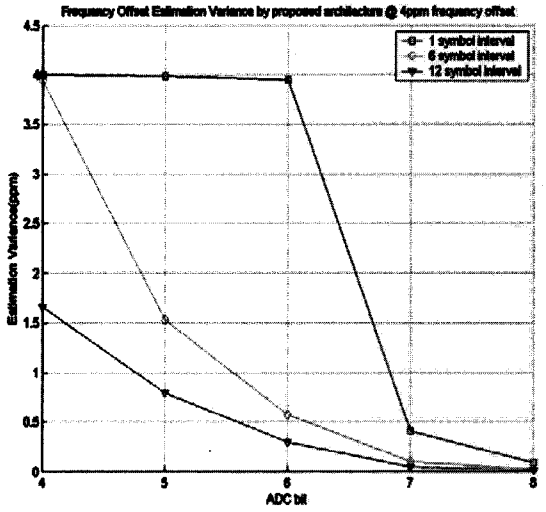


그림 1. 4 ppm 주파수 오프셋에 대한 추정 오차 분산
Fig. 1. Estimation Error Variance for 4 ppm Frequency Offset.

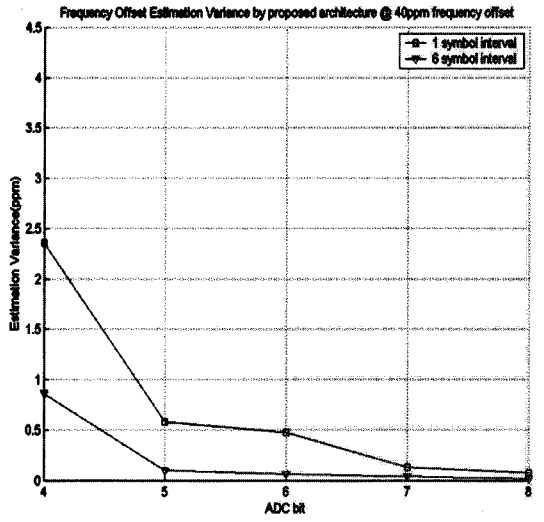


그림 2. 40 ppm 주파수 오프셋에 대한 추정 오차 분산
Fig. 2. Estimation Error Variance for 40 ppm Frequency Offset.

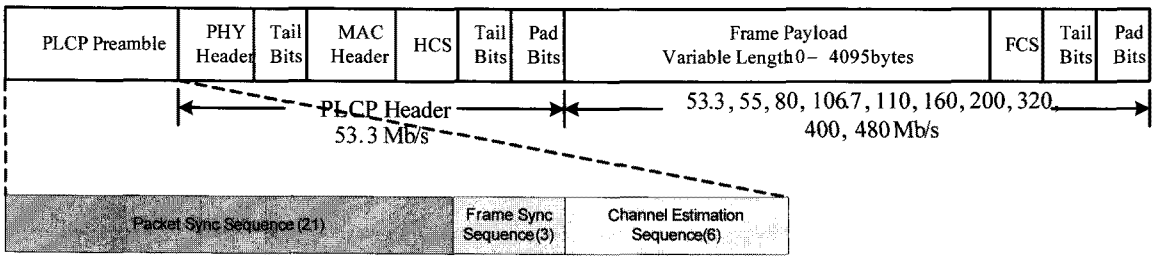


그림 3. MB-OFDM UWB 시스템의 프레임 구조
Fig. 3. Frame Structure of MB-OFDM UWB System.

는 수신 신호에 양자화 잡음의 영향을 발생시킨다. 양자화 잡음에 영향 받은 수신 신호를 사용하여 주파수 오프셋 추정을 할 경우에 양자화 잡음은 추정 성능을 저하시킨다. 그림 1과 2는 4에서 8까지의 A/D 변환기 해상도와 1, 6, 12의 심볼 간격에 대한 주파수 오프셋 추정의 오차 분산 (Frequency Offset Estimation Error Variance)를 보여준다. 이 시뮬레이션에는 MB-OFDM UWB에 대한 시스템 사양인 반송파 주파수 3 GHz, 표본화 주파수 528 MHz가 적용되었다[6]. 그림 1과 2로부터 양자화 잡음의 영향은 주파수 오프셋 추정에 사용되는 심볼 간격이 증가할수록 작아짐을 알 수 있다.

Ⅲ. MB-OFDM용 주파수 오프셋 추정 알고리즘

그림 3은 30 개의 PLCP (Physical Layer Convergence Protocol) 프리엠블, PHY 헤더 (Header), MAC 헤더, HCS (Header Check Sequence) 등으로 구성된 MB-OFDM UWB 시스템의 프레임 형식 (Frame Format)을 보여준다. PHY 헤더는 데이터 전송률 (Rate), 데이터 전송량과 관련된 프레임 길이 (Length) 등과 같이 물리 계층 (physical -layer) 통신을 위한 중요한 정보들을 포함하는데[1~3], 부정확한 반송파 주파수 동기는 PHY 헤더에서의 오류율(error rate)를 증가시켜 통신 성능을 저하시킨다. 반면, 정확한 주파수 오프셋 동기는 PHY 헤더에서의 오류로 인한 재전송 요청 (Requests for Retransmission)을 감소시켜 통신 스루풋 (Throughpu)을 증가시킬 수 있다.

MB-OFDM UWB 시스템에서 OFDM 한 심볼은 총 165 샘플들로 구성된다[1~3]. MB-OFDM UWB의 표본화 주파수는 528 MHz이기 때문에 표본화 간격은 1.89 ns가 되고 한 심볼 길이는 312.5 ns가 된다[6].

그림 4는 일반적인 디지털 주파수/시간 동기 방식을 채택한 OFDM 시스템의 수신부 구조를 보여준다. 그림 4에서 A/D 변환기의 출력은 주파수 오프셋 추정기로의 입력이 됨을 알 수 있다. 그러므로, A/D 변환기의 해상도가 수신 성능에 커다란 영향을 미치게 된다. MB-OFDM UWB에 대한 국제 표준 그룹은 200 Mbps 전송율에서 소모 전력은 227 mW로 제한될 수 있도록 비교적 낮은 해상도인 4-비트 A/D 변환기를 사용해서 시스템을 구현할 것을 권장한다[1~2].

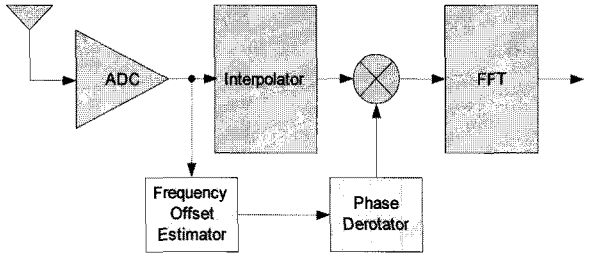


그림 4. 일반적인 디지털 주파수/시간 동기 방식을 채택한 OFDM 시스템의 수신부 구조
Fig. 4. Receiver Structure of OFDM System Adopting General Digital Frequency/Time Synchronization Scheme.

기존 연구에서도 MB-OFDM UWB의 3-대역 도약에 대한 3 심볼 간격의 주파수 추정 방식을 제시했지만[4], 양자화 잡음의 영향까지는 고려하지는 못했다. 본 논문에서는 양자화 잡음 영향 및 SOP (Simultaneously Operating Piconet)에 따른 도약 패턴을 고려한 다중 심볼 주파수 추정 방식을 제안한다.

1. 심볼 간격을 고려한 주파수 오프셋 추정

반송파 주파수 오프셋 추정 시에 반복되는 두 프리엠블 심볼 사이의 간격이 크면 클수록 양자화 잡음에 의한 영향이 작아짐을 그림 1과 2로부터 볼 수 있다. 이 때, 심볼 사이의 위상 회전이 위상 모호함이 발생하는 π 보다 작게 되도록 심볼 간격은 제한되어야 한다.

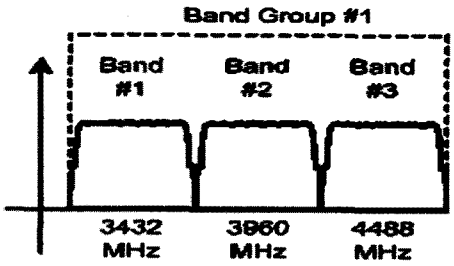


그림 5. MB-OFDM UWB의 주파수 플랜
Fig. 5. Frequency Plan of MB-OFDM UWB1. 심볼 간격을 고려한 주파수 오프셋 추정

그림 5는 3-대역 도약하는 MB-OFDM UWB 시스템에 대한 주파수 플랜 (Frequency Plan)을 보여준다. MB-OFDM 시스템의 한 심볼 길이는 312.5 ns 인데, 이 값은 일반적인 OFDM 시스템에 비해 비교적 상당히 작은 값에 속한다 (예를 들어, IEEE 802.11a 무선랜의 경우, 한 심볼이 4 us이다). 한 심볼 동안 주파수 오프셋 f_{offset}의 영향으로 발생될 수 있는 위상 회전은 2π x f_{offset} x 312.5ns 가 된다. 제시된 주파수 플랜의 대역 1에서 발생될 수 있는 최대 주파수 오프셋 $f_{offset,max}$는 3.428 GHz x 40 ppm = 137.28 KHz 가 되므로 이에 해당되는 위상 회상의 최대값은 0.2629 라디언 (radian)이 된다. 그러므로, MB-OFDM UWB 시스템에서 작은 주파수 오프셋을 일반적인 방식인 한 심볼 간격의 위상 회전을 통해 추정할 경우, 추정된 위상 회전 값은 양자화 잡음에 크게 영향을 받을 수 있다.

주파수 오프셋에 의한 위상 회전은 자기 상관을 취하는 심볼 간격에 비례하여 커진다[8~9]. 본 논문에서는 작은 심볼 길이를 갖는 MB-OFDM UWB 시스템에서 한 심볼 간격이 아닌 다중 심볼 간격으로 확장하여 양자화 잡음에 강건하게 하는 구조를 제안한다. 이 때, 주파수 오프셋에 의한 최대 위상 회전이 위상 모호함이 발생하는 π 보다 작은 정도로 확장하여야 한다. MB-OFDM UWB 시스템에 있어 한 심볼 간격에서의 최대 위상 회상이 0.2692이고 $\pi/0.2692$ = 11.67, 최대로 확장 가능한 심볼 간격은 11 이다.

2. 다중 접속을 고려한 주파수 오프셋 추정

MB-OFDM UWB 시스템에는 다중 접속을 위한 4가지 피코넷 (Piconet)이 있다. 표 1은 다중 접속 피코넷을 위한 3-대역 도약 패턴이 제시되어 있다. 피코넷 1과 2의 경우, 매 3 심볼 간격마다 같은 대역이 나타난다. 피코넷 3과 4의 경우, 바로 옆이나 5 심볼 간격으로

표 1. MB-OFDM UWB의 다중 접속 피코넷을 위한 시간-주파수 코드 세트
Table 1. Time-Frequency Code Set for Multiple Piconets of MB-OFDM UWB.

Preamble Pattern	Time Frequency Code					
1	1	2	3	1	2	3
2	1	3	2	1	3	2
3	1	1	2	2	3	3
4	1	1	3	3	2	2

같은 대역이 나타난다. 그러므로, 모든 피코넷에 대한 도약 패턴을 고려한 주파수 오프셋 추정용 심볼 간격은 6의 배수가 되어야 한다. 이 때 앞에서 고려한 위상 모호성까지 고려한다면, MB-OFDM UWB 주파수 오프셋 추정을 위한 최적의 심볼 간격은 '6'이 된다.

3. MB-OFDM UWB용 주파수 오프셋 추정 구조

그림 6은 본 논문에서 제안하는 MB-OFDM UWB용 주파수 오프셋 추정 구조를 보여준다.

제안된 구조는, 앞에서 고려한 바와 같이, MB-OFDM UWB 시스템의 주파수 오프셋 추정에 최적인 심볼 간격 6 에 기반한다. 그림 8에서 보여지는 구조는

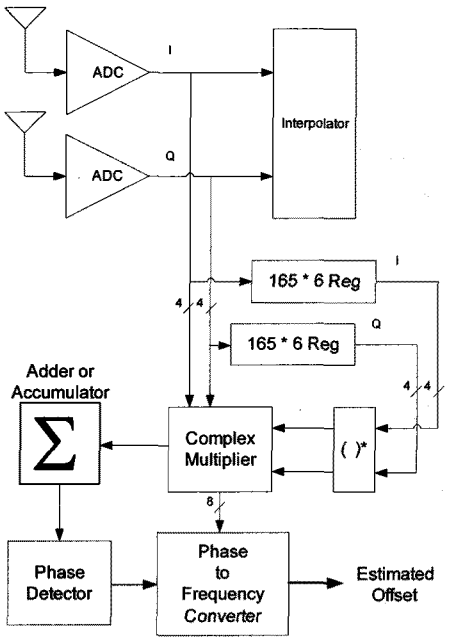


그림 6. MB-OFDM UWB 시스템의 초기 반송파 주파수 동기용 제안 구조
Fig. 6. Proposed Architecture for Initial Carrier-Frequency Synchronization of MB-OFDM UWB System.

첫 번째 단계로 A/D 변환기의 출력을 레지스터 (Register)에 저장한다. 저장된 신호는 주파수 오프셋 추정을 위한 자기 상관 과정에서 6 심볼 이전 신호로 활용된다. 이 때, 한 MB-OFDM UWB의 한 심볼은 165개의 복소 샘플 (Complex Sample)로 구성되므로, 샘플 저장을 위한 레지스터의 수는 실수부와 허수부 각각 165 x 6 = 990 개가 된다. 두 번째 단계에서 A/D 변환기의 현재 출력과 레지스터에 저장되었던 같은 도약 대역의 6 심볼 이전의 신호를 가지고 자기 상관 값을 구한다. 자기 상관은 한 심볼 동안의 샘플 165 개를 각각 곱한 후에 이들을 더하여 이루어지므로, 복소 곱셈기 (Complex Multipler)와 덧셈기 (또는 누적기)로 구성된다. 그 다음에 자기 상관 값으로부터 주파수 오프셋에 의해 회전된 위상 값을 구한 후, 6 심볼 간격 (312.5 x 6 = 1875 ns)을 적용하여 초기 주파수 오프셋을 추정한다.

4. 시뮬레이션 결과

반송파 주파수 오프셋 추정 시에 반복되는 두 프리엠블 심볼 사이의 간격에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 1과 2에 제시되었다. 그림 1과 2로부터 자기 상관을 구하기 위해 이용되는 두 프리엠블 심볼 사이의 간격이 크면 클수록 양자화 잡음에 의한 영향이 작아짐을 볼 수 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 6-비트 A/D 변환 시에 6 심볼 간격 및 12 심볼 간격에 대한 제안 주파수 오프셋 추정 방식의 오차가 이웃하는 심볼 기반 기존 추정 방식의 오차보다 각각 3.4 ppm과 3.7 ppm 만큼 작다. 그러므로, 제안한 다중 심볼 간격을 통해 주파수 오프셋을 추정하는 제안 방식이 기존의 추정 방식보다 양자화 잡음에 강건함을 알 수 있다.

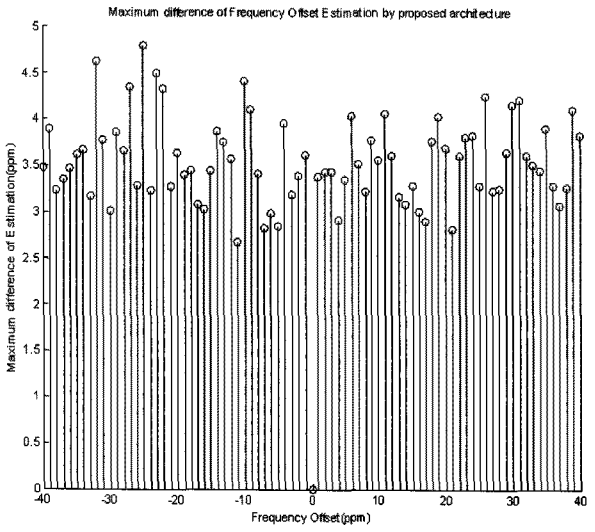


그림 7. 제안된 구조에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation Results for Proposed Architecture.

그림 7은 MB-OFDM UWB에 대해 제안한 초기 주파수 오프셋 추정 구조에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 시뮬레이션은 시간 동기와 채널 추정은 완벽하다는 가정 아래 MB-OFDM UWB의 기술 요구 사항인 -1.3 dB 신호 대 잡음비, 최대 ±40 ppm 주파수 오프셋, 4-비트 A/D 변환 해상도라는 조건을 가지고 수행되었다.[1~3]. 이 때, MB-OFDM UWB에 대한 시스템 사양인 반송파 주파수 3 GHz, 표본화 주파수 528 MHz라는 시뮬레이션 조건도 적용되었다[6]. 시뮬레이션 결과, 제안된 구조는 최대 40 ppm의 주파수 오프셋을 5 ppm 이내로 추정 가능함을 볼 수 있었다. 5 ppm 이내의 누출 주파수 오프셋 (Leakage Frequency Offset)은 파일롯 심볼 (Pilot Symbol)을 이용하는 일반적인 주파수 오프셋 추적 (Frequency-Offset Tracking)을 통해 보상 가능하다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 A/D 변환기에서 발생하는 양자화 잡음의 영향을 극복하기 위한 MB-OFDM UWB용 초기 주파수 오프셋 추정 구조를 제안하였다. 다중 접속 패턴과 위상 모호성을 고려하여 MB-OFDM UWB 시스템에는 6 심볼 간격의 주파수 추정이 최적임도 제시하였다. 최대 40 ppm의 주파수 오프셋, -1.3 dB SNR, 4-비트 A/D 변환이라는 조건 아래에서 수행된 시뮬레이션 결과, 제안된 구조는 5 ppm 미만의 오차로 초기 주파수 오프셋 동기를 이룰 수 있음을 확인하였다. 그러므로 본 논문에서 제안한 구조를 통해 주파수 오프셋에 의해 저하된 부반송파들의 직교성을 향상시킬 수 있다. 제안된 구조를 가지고 추정된 5 ppm 미만의 초기 주파수 오프셋 값을 보상하는 주파수 오프셋 추적, 보상 구조가 뒤따라온다면, 보다 높은 QoS도 가능하다.

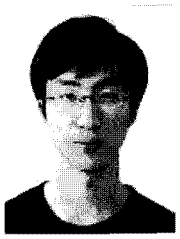
참 고 문 헌

[1] A. Batra, J. Balakrishnan, R. Aiello, J.R. Roerster, A. Dabak and et al., "Multi-band OFDM physical layer proposal," IEEE

P802.15-03/268r0-TG3a, July 2003.
[2] A. Batra, J. Balakrishnan, R. Aiello, J.R. Roerster and A. Dabak, "Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments," IEEE Transcations on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 9, pp. 2123 - 2138, Sept. 2004.
[3] A. Batra, J. Balakrishnan, R and A. Dabak, "Multi-band OFDM: A new approach for UWB," Proc. of IEEE Int. Circuits and Systems Symp., vol. 5, pp. 365 - 368, May 2004.
[4] 김영준, 석원균, 이규인, 조용수, "UWB용 MB-OFDM 기술," 전자공학회지, 제32권, 제4호, 439-450쪽, 2005년 4월
[5] 최은창, "WiMedia UWB 기반 무선 USB 응용 기술 동향," TTA 저널, 124호, 80-85쪽, 2009년 7월
[6] 이성주, "Multi-band OFDM 시스템용 고속 연판정 비터비 디코더의 효율적인 하드웨어 구조 설계에 관한 연구," 전자공학회논문지, 제43권 SD 편, 제11, 90-97쪽, 2006년 11월
[7] P. Moose, "A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction," IEEE Transactions on Communications, vol. 42, pp. 2908 - 2914, Oct. 1994.
[8] T.M. Schmidl and D.C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," IEEE Transactions on Communications, vol. 45, pp. 1613 - 1621, Dec. 1997.
[9] Jan-Jaap van de Beek, Magnus Sandell and Per Ola Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM system," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 45, no. 7, July 1997.

저 자 소 개

진 용 선(정회원)
1978년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.
1991년 한양대학교 전자공학과 석사 졸업.
2001년 한양대학교 전자공학과 박사 졸업.
1978년~1979년 전자통신연구원 연구원
1980년~1987년 LG전자연구소 선임연구원
1988년~1996년 Texas Intrument 연구소 책임연구원
1997년~현재 국제대학 정보통신과 교수
<주관심분야 : 디지털통신시스템, 정보통신, 신호처리>



박 계 완(학생회원)
2003년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.
2005년 한양대학교 전자공학과 석사 졸업.
<주관심분야 : 통신, 신호처리, 반도체>