

# HDR-WPAN 시스템을 위한 주파수 오프셋 보상과 트래킹 알고리즘 성능분석

## Performance Analysis of Frequency Offset Compensation and Tracking Algorithms for HDR-WPAN System

박지우\*, 오창현\*\*

Ji-Woo Park\* and Chang-Heon Oh\*\*

### 요 약

본 논문에서는 HDR-WPAN 시스템에 적합한 주파수 오프셋 보상과 누적 위상오차를 개선할 수 있는 트래킹 알고리즘을 제안하고 이에 대해 분석하였다. 주파수 오프셋 보상 알고리즘은 CAZAC sequence의 자기상관 특성을 이용하여 각 심벌 내 샘플 간 위상오차를 통해 coarse 주파수 오프셋과 fine 주파수 오프셋을 추정하게 된다. 그러나 HDR-WPAN 시스템은 payload에 pilot 심벌이 없기 때문에 payload 길이가 길어질수록 샘플 간 미소 위상오차가 누적되어 수신단의 정상도가 회전하게 된다. 따라서 트래킹 알고리즘을 통해 틀어진 누적 위상오차를 보상해야 한다. 트래킹은 정상도내 들어온 신호가 일정 영역을 벗어나게 되면, 벗어난 만큼의 크기  $\theta$ 을 곱해 누적된 미소 위상오차를 보상하게 된다.

### Abstract

In this paper, we proposed the frequency offset compensation algorithm and tracking algorithm which could improve the accumulated phase error for HDR-WPAN system. The proposed frequency offset compensation technique estimated each sample phase error by autocorrelation characteristics of CAZAC sequence, estimated phase error multiple each sample in a symbol, and finally compensated for the frequency offset. After frequency offset compensation using two steps, coarse and fine frequency offset, tracking algorithm have to use to compensate for the accumulated phase error. Because there is no pilot symbol in payload, more phase rotation occurred in received signal constellations due to the accumulated phase error as the payload length increase. Tracking algorithm compensates for a cumulative phase error  $\theta$  between payload data.

Key words : 홈 네트워크, HDR-WPAN, 주파수 동기, 주파수 오프셋 보상, 트래킹 알고리즘

### I. 서 론

음성, 영상, 데이터 등의 다양한 정보를 실시간으로 전송하기 위해 수십, 수백 Mbps 이상의 고속 테

이터를 전송하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 최근 홈 네트워킹에 대한 관심이 높아지면서 옥내 환경에서 추가적인 배선 없이 무선 채널을 통해 고속의 멀티미디어 데이터 전송을 위한 표준화 작업

\* 아이엔씨테크놀로지 (I&C Technology)

\*\* 한국기술교육대학교 정보기술공학부 (School of Information Technology, Korea University of Technology and Education)

· 제1저자 (First Author) : 박지우

· 접수일자 : 2005년 10월 28일

이 빠르게 진행되고 있다. 그 가운데 대표적인 기술로 WPAN (wireless personal area network)이 각광받고 있는데, 이 기술은 가정이나 사무실 내 가전기기, 사무기기 및 각종 정보기기 등을 근거리에서 무선으로 다양한 형태의 멀티미디어 데이터를 전송하는 것을 목표로 하고 있다. 이와 관련하여 지난 2003년 IEEE 802.15.3 working group에서 표준화가 완료된 high data rate WPAN 기술은 근거리에서 단말기들 사이에 무선을 통해 멀티미디어 데이터를 전송할 수 있도록 설계되어 있어 차세대 홈 네트워크 기술로서 주목받고 있다[1],[2].

HDR-WPAN은 기존의 ISM 밴드 대역인 2.4GHz에서 최고 55Mbps까지를 지원하므로 가정 내 멀티미디어 데이터 트래픽에 적합하며, 자체적인 security suite를 보유하고 있을 뿐만 아니라 19.2Mbps의 HD급 비디오 데이터의 전송이 가능하다. 또한, QoS와 security를 지원하며 WLAN에 비해 낮은 전력을 소모하는 저가의 칩을 사용하고, 11Mbaud의 심벌 레이트를 이용하여 5가지 전송 모드 (QPSK-TCM, DQPSK, 16/32/64 QAM-TCM)에서 각각 데이터 전송을 11, 22, 33, 44, 55Mbps를 제공한다[3].

HDR-WPAN 시스템은 단일캐리어(single carrier)로 전송되기 때문에 송·수신단의 발진기에 의해 발생하는 주파수 오프셋이 OFDM 방식을 사용하는 WLAN보다 민감하지 않지만, WLAN과 같은 파일럿 심벌이 없어 payload가 길어질 경우 잔류 주파수 오프셋에 의한 성능열화가 발생하게 된다. 이에 따라 본 논문에서는 HDR-WPAN 시스템에서 송·수신단의 발진기 차이로 인해 발생하는 주파수 오프셋 보상 및 잔류 주파수 오프셋을 개선하기 위한 트래킹 알고리즘을 제안하고 이에 대해 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I장 서론에 이어 II장에서는 HDR-WPAN 시스템에 대해 설명하고 III장에서는 HDR-WPAN 시스템의 주파수 오프셋 보상방법 및 잔류 주파수 오프셋 제거를 위한 트래킹 알고리즘을 설명한다. IV장에서는 제안한 주파수 오프셋 보상과 트래킹 알고리즘에 대해 모의실험을 통해 성능을 분석하며, 마지막 V장에서는 결론을 맺는다.

## II. HDR-WPAN 시스템

HDR-WPAN 시스템은 IEEE 802.15.3 tasking 그룹에서 표준으로 제정한 기술로 10m의 거리에서 데이터 전송을 요구하는 기기들 간의 무선 네트워킹 기술이다. HDR-WPAN 시스템은 11, 22, 33, 44, 55Mbps의 전송속도를 지원한다[3].

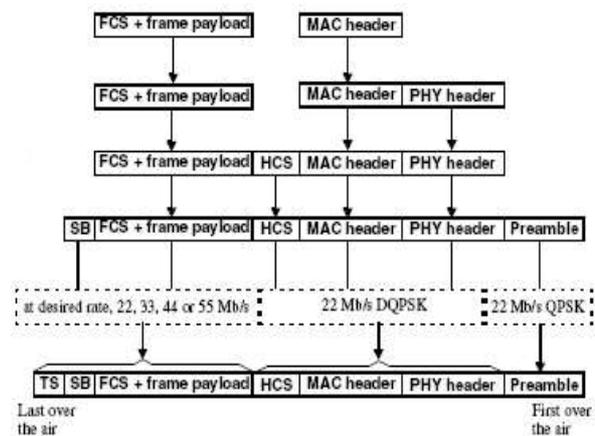


그림 1. 22, 33, 44, 55Mbps를 위한 PHY 프레임 포맷  
Fig. 1. PHY frame format for 22, 33, 44, 55Mbps.

HDR-WPAN 시스템의 PHY 프레임은 4가지 세그먼트(프리앰블, 헤더, 데이터, 테일 심벌)를 포함한다. 프리앰블은 수신기에서 동기화, carrier offset 복구 그리고 신호 등화 용도로 사용하고, 프리앰블의 마지막 심벌은 difference-QPSK 변조 시 기준신호가 된다. 헤더에는 스크램블러를 초기화하기 위한 seed id, PHY의 변조방식, 프레임 payload의 길이가 포함되며, 헤더는 CCITT CRC-16 header check sequence (HCS)로 보호된다. 테일 심벌은 프레임의 끝에 위치하며, 트래리스 코드의 가장 좋은 거리특성을 갖도록 해준다. Payload는 최소 64 octets, 최대 2048 octets을 지원하며, 보안을 목적으로 하는 4 octets을 제외하면 최대 2044 octets 까지 가능하다.

그림 1은 22, 33, 44, 55Mbps의 전송속도를 위한 PHY 프레임 포맷을 나타낸다. 11Mbps의 경우는 그림 2에서와 같이 PHY 헤더, MAC 헤더, HCS를 TCM-QPSK로 한 번 더 변조한다.

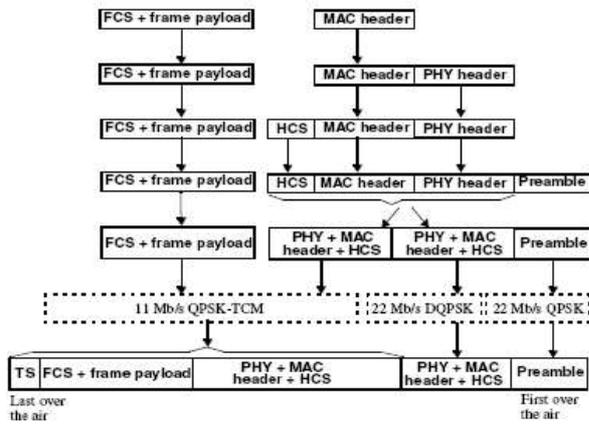


그림 2. 11Mbps를 위한 PHY 프레임 포맷  
Fig. 2. PHY frame format for 11Mbps.

### III. 주파수 오프셋 보상 및 트래킹 알고리즘

#### 3-1 주파수 오프셋 보상 알고리즘

기저대역 신호는 송신단의 국부 발진기에서 발생된 반송파 주파수에 의해 통과대역으로 천이되며, 수신단에서는 동일한 반송파 주파수에 의해 기저대역 신호로 변환된다. 이 때, 기저대역 신호에는 반송파와 관련된 왜곡이 포함될 수 있는데, 왜곡은 크게 두 가지 형태로 구분될 수 있다.

첫 번째는 송신기와 수신기에서 사용하는 발진기의 특성이 안정적이지 못하여 발생하는 위상잡음으로 주파수가 정상적인 주파수 주위에서 시간에 따라 변동하는 것이다. 두 번째는 송신기 반송파 주파수와 수신기 반송파 주파수 차이에 의한 반송파 주파수 오프셋으로 수신된 기저대역 신호는  $\Delta f = f_c - f'_c$ 의 오프셋을 포함하게 된다[4].

송신기와 수신기의 반송파 사이에 주파수 오프셋이 존재하고 위상잡음이 없는 경우 샘플링된 기저대역 시간영역 수신신호는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$y_n = r_n e^{j2\pi n \theta} = r_n e^{j\theta n} \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 패킷의 길이,  $\varepsilon$ 는 샘플 duration ( $1/T_{sample}$ )으로 식 (2)과 같이 정규화 된 반송파 주파수 오프셋으로 표현되며,  $\theta$ 는 식 (3)과 같이 수신된

신호의 위상 값을 나타낸다. HDR-WPAN 시스템에서는 이  $\theta$  값을 추정하여 주파수 오프셋을 보상하게 된다.

$$\varepsilon = \Delta f \cdot T_{sample} \quad (2)$$

$$\theta = 2\pi \Delta f t \quad (3)$$

한편, HDR-WPAN 시스템은 표 1, 그림 3과 같은 CAZAC sequence를 사용하는데, CAZAC sequence는 16개의 샘플로 구성된 심벌 12개로 구성되어 있으며, 마지막 심벌은 inverse된 샘플로 구성되어 심벌 오프셋 추정이 용이하도록 설계되어 있다. 특히 CAZAC sequence는 자기상관 (autocorrelation) 특성이 뛰어나 각 심벌의 평균값을 통한 주파수 오프셋 추정 시 비교적 정확한 추정이 가능하다.

표 1. CAZAC sequence 구성

Table 1. Construction of CAZAC sequence.

CAZAC Sequence Element	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	1+j	1+j	1+j	1+j	-1+j	-1-j	1-j	1+j
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
	-1-j	1+j	-1-j	1+j	1-j	-1-j	-1+j	1+j

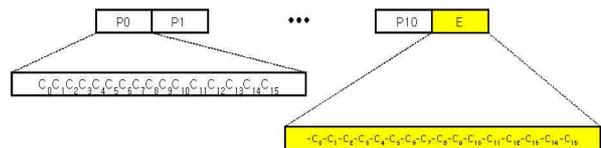


그림 3. HDR-WPAN의 CAZAC sequence  
Fig. 3. CAZAC sequence of HDR-WPAN.

그림 4는 HDR-WPAN 시스템에서 사용되는 CAZAC sequence를 이용한 주파수 오프셋 동기 알고리즘을 나타내고 있다.

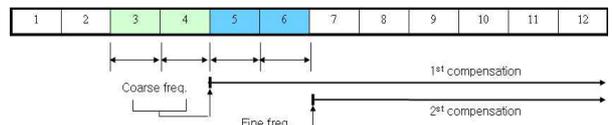


그림 4. HDR-WPAN의 주파수 동기 알고리즘  
Fig. 4. Frequency synchronization algorithm of HDR-WPAN.

주파수 오프셋이 발생하게 되면 한 샘플이 수신될 때마다  $\theta$ 만큼의 일정한 위상오차가 누적되어 발생하게 된다. 따라서 payload가 길어질수록  $\theta$ 크기만큼 계속된 누적 오차로 인해 수신할 수 없는 형태의 성상도가 나타나게 된다. 이와 같은 누적 위상오차를 보상하기 위해서는 16 샘플 간 차이가 나는 인접 심벌의 샘플에 대해 각각 conjugation 곱을 한 후 평균을 구하면 된다. 이 평균을 통해 각 샘플 당  $\theta$ 만큼의 누적 위상오차가 발생했다고 추정할 수 있고 추정된 샘플들의 평균 위상오차를 통해 주파수 오프셋이 보상되므로 많은 샘플의 평균을 취할수록 각 샘플이 틀어진 위상오차에 가깝게 되고 보다 정확한 보상을 할 수 있다.

그림 4는 CAZAC sequence에서 coarse 주파수 오프셋과 fine 주파수 오프셋을 보상하기 위한 WPAN 시스템 프레임 구성을 나타낸다. 먼저, 수신 신호가 검파되면 심벌 오프셋과 주파수 오프셋에 대한 보상이 이뤄지게 된다. 이를 위해 CAZAC sequence의 3번째와 4번째 심벌을 이용하여 conjugation 곱과 평균을 통해 심벌 간 위상차를 구하여 전체 구간에 coarse 주파수 오프셋을 보상한다. 보상이 끝난 후 잔류 주파수 오프셋의 제거를 위해 5번째와 6번째 심벌의 위상차를 구해 fine 주파수 오프셋을 보상해 줌으로써 잔여 프레임을 포함한 전체 payload 구간에 대한 주파수 오프셋을 보상해 준다.

그러나 WPAN 시스템은 WLAN 시스템과는 달리 payload 구간 내 pilot 심벌이 없기 때문에 payload의 길이가 길어지게 되면 payload 후반부로 갈수록 미소 위상오차가 누적되어 발생한다. 결국, 수신된 성상점은 누적된 위상오차의 영향으로 조금씩 원래 위치를 벗어나게 되어 payload를 수신할 수 없는 형태가 된다. 따라서 pilot 심벌을 대신할 트래킹 알고리즘을 적용해야 누적된 미소 위상오차를 보상할 수 있다.

### 3-2 트래킹 알고리즘

그림 5는 payload가 길어졌을 경우 발생하는 미소 위상오차의 과정을 표현한 것이다. 잡음과 채널 환경에 따라 차이가 있겠지만 payload가 일정 길이

이상이 되었을 경우, 수신된 성상점이 원래 성상점에서부터  $\theta$ 만큼 누적되어 어긋나게 된다. 결국 누적된 위상오차로 인해 전체 성상도가 회전하는 형태가 되고 수신된 데이터를 복원할 수 없게 된다. 따라서 payload의 어느 시점부터는 수신된 데이터의 정확한 성상점을 찾기 위한 보상과정이 필요하게 된다.

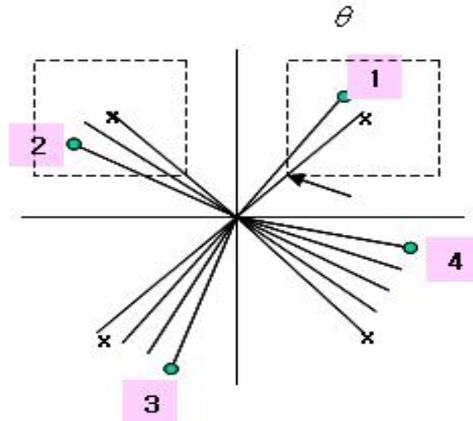


그림 5. Payload 길이에 의한 위상오차  
Fig. 5. Phase error by payload length.

이를 위해 먼저 프레임 내 정보를 통해 수신기가 송신기로부터 오는 변조방식을 추정하여 변조방식에 따른 성상도를 가지고 있어야 한다. 수신기는 이 정확한 성상도를 통해 송신기로부터 들어오는 payload 데이터를 매핑하게 된다. 매핑 과정은 그림 6과 같이 수신된 데이터가 원래 성상점을 기준으로  $\theta$ 만큼의 일정 영역만큼 벗어나게 되면, 그 만큼의 크기를 곱해 위상 오차를 보상해 준다. 이 같은 과정은 수신된 데이터가 수신기의 매핑 정보 영역에서 벗어나게 될 때마다 반복하게 된다. 그러나 매핑 과정 후 payload는 각 성상점과 데이터의 위상오차가 정확히  $\theta$ 만큼만 발생하는 것이 아니고,  $\theta$ 에서  $\pm \alpha$ 만큼의 크기로 발생하게 된다. 이  $\alpha$  값은 잡음의 영향에 의해 발생하는 것으로 2048 bytes 길이에서 발생할 수 있는  $\alpha$  값은 0.01 ~ 0.03(degree) 사이의 값으로서 EVM의 성능곡선을 통해 추정할 수 있다. 추정된  $\alpha$  값은  $\theta$  값과 함께 계속해서 전체 구간에 걸쳐 보상해 주게 된다. 이렇게 함으로써 2048bytes의 payload에서 발생하는 누적 위상오차를 보상해 줄 수 있다.

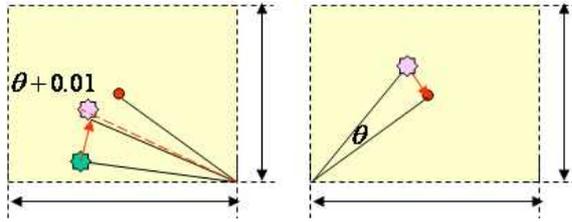


그림 6. 누적 위상오차에 대한 트래킹 알고리즘  
Fig. 6. Tracking algorithm for accumulated phase error.

IV. 성능분석

5.8GHz, HyperLAN 채널 A 모델, Eb/No=30[dB], payload 길이 2048[bytes], 40ppm의 주파수 오차 조건에서 샘플 duration 15MHz, LMS 등화기를 적용하여 제안한 알고리즘의 성능을 분석하였다. 그림 7은 coarse와 fine 주파수 오프셋 보상 과정을 거친 후 트래킹을 적용하지 않은 경우의 신호 성상도이다.

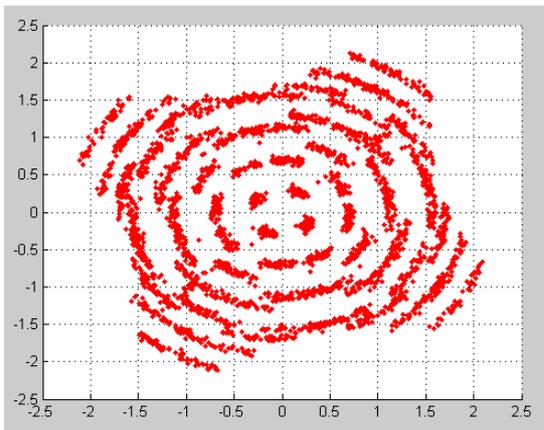


그림 7. 주파수 오프셋 보상 후 트래킹을 적용하지 않은 경우의 신호 성상도 (64QAM)  
Fig. 7. Signal constellation after compensation of frequency offset without tracking (64QAM).

송수신기 간의 반송파 주파수 오프셋 차이에 따른 위상오차  $\theta$ 을 보상하기 위해 CAZAC sequence의 3번째와 4번째 심벌을 이용하여 coarse 주파수 오프셋 보상 후 5번째와 6번째 심벌을 통해 fine 주파수 오프셋을 보충했다. 그러나 coarse와 fine 주파수 오프셋을 보충했지만 payload 구간에 pilot이 없기 때문에 미소 위상오차의 누적이 발생하고, 이 같은 누적오차는 결국 payload의 길이가 길어질수록 점차 누적되어 그림 7과 같이 성상도가 회전하게 된다. 따라

서 이 같은 누적 위상오차를 제거하기 위해 트래킹 알고리즘을 적용하여 미소 위상오차를 보상해야만 한다. 그림 8은 coarse와 fine 주파수 오프셋 보상 후 트래킹 알고리즘을 적용했을 경우의 신호 성상도를 나타낸다. 누적된 위상오차에 대해 일정 영역의 payload 데이터의 위치를 보상해 줌으로써 그림과 같은 정확한 성상도를 얻을 수 있었다.

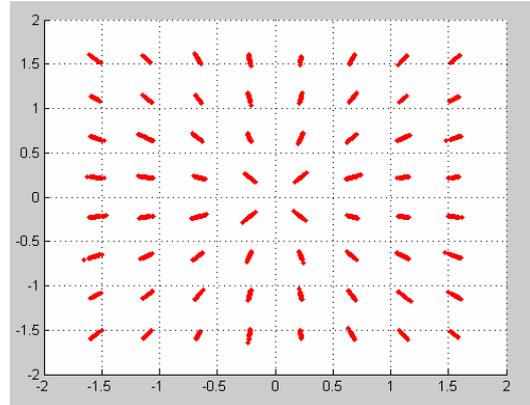


그림 8. 주파수 오프셋 보상과 트래킹 적용후의 신호 성상도 (64QAM)  
Fig. 8. Signal constellation after compensation of frequency offset and tracking (64QAM).

그림 9는 같은 환경에서 전송속도 향상을 위해 128QAM으로 전송하였을 경우의 성상도를 나타낸다. 64QAM과 마찬가지로 payload내 데이터간의 누적된 위상오차로 성상도가 회전하게 된다.

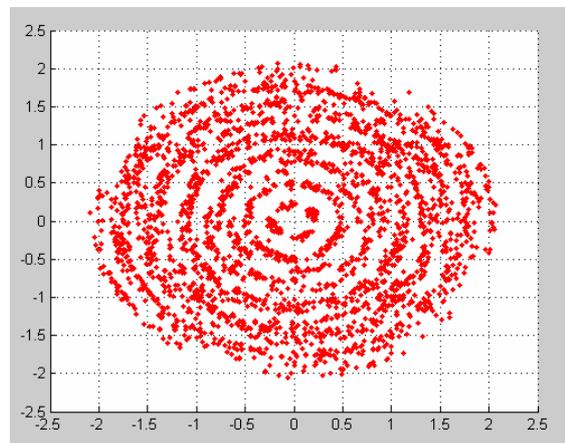


그림 9. 주파수 오프셋 보상 후 트래킹을 적용하지 않은 경우의 신호 성상도 (128QAM)  
Fig. 9. Signal constellation after compensation of frequency offset without tracking (128QAM).

그림 10은 그림 8과 같이 주파수 오프셋을 보상한 후 트래킹 알고리즘을 적용하였을 경우의 정상도로서 payload 데이터의 위치를 보상해 줌으로써 정확한 정상도를 얻을 수 있었다.

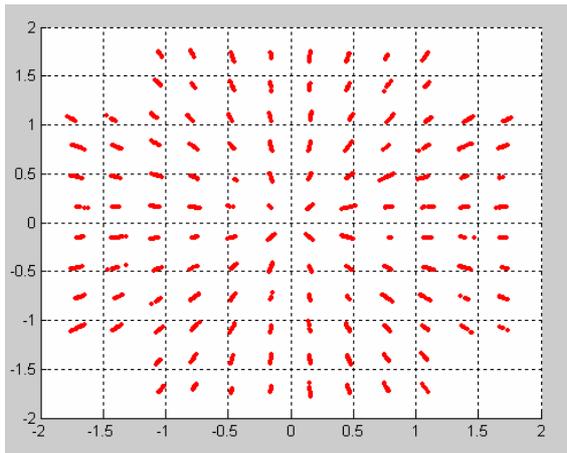


그림 10. 주파수 오프셋 보상과 트래킹 적용후의 신호 정상도 (128QAM)

Fig. 10. Signal constellation after compensation of frequency offset and tracking (128QAM).

그림 11은 주파수 오프셋에 대한 보상과 트래킹 알고리즘 적용 후 각 변조방식(전송속도)에 대한 BER 성능을 나타낸다. 주파수 오프셋에 대해 coarse와 fine 주파수 오프셋을 보상하고 트래킹 알고리즘을 적용하였을 경우  $10^{-5}$  기준 64QAM은 약 23[dB], 128QAM의 경우 27[dB]의 Eb/No 값을 필요로 하였다.

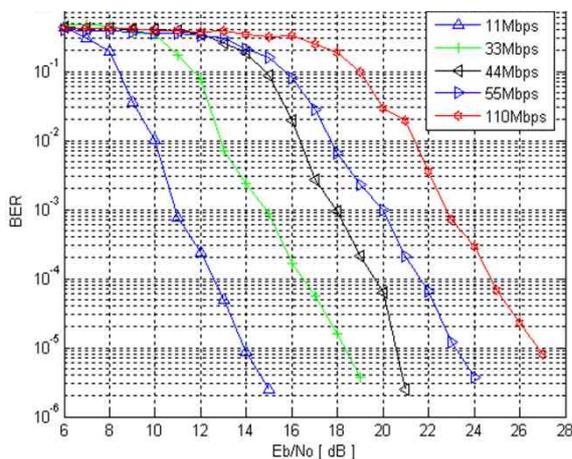


그림 11. 주파수 오프셋 보상과 트래킹 적용후의 BER 성능

Fig. 11. BER performance after compensation of frequency offset and tracking.

## V. 결 론

본 논문에서는 HDR-WPAN 시스템에 적합한 주파수 오프셋 보상과 누적 위상오차를 개선할 수 있는 트래킹 알고리즘을 제안하고 이에 대해 분석하였다.

HDR-WPAN 시스템은 CAZAC sequence의 3번과 4번 심벌 내 샘플 간 위상차를 이용하여 coarse 주파수 오프셋을 보상하고, 같은 방식으로 5번과 6번 심벌의 위상차를 이용하여 fine 주파수 오프셋을 보상한다. 그러나 HDR-WPAN 시스템은 WLAN 시스템과는 달리 payload 구간 내 pilot 심벌이 없기 때문에 payload의 길이가 길어지게 되면 payload 구간 내 미소 위상오차가 누적되어 발생하게 된다. 결국, 수신된 정상점은 누적된 위상오차의 영향으로 회전하는 형태가 되어 수신이 불가능하게 된다. 따라서 coarse와 fine 주파수 오프셋 보상 후에도 payload 구간에 트래킹 알고리즘을 적용하여 각 정상점의 영역에서 발생하는 미소 위상오차  $\theta$  값과 잡음의 영향으로 인한  $\alpha$  값을 보상해 주어야 한다. 트래킹은 수신단이 송신단이 보내는 변조정보에 맞춰 정상점을 셋팅한 후 수신된 데이터의 정상점과 매핑하면서 데이터가 일정영역을 벗어나게 되면 벗어난 만큼의 위상오차를 보상해 준다. 제안하는 알고리즘 적용 후 BER 성능은  $10^{-5}$  기준 64QAM, 128QAM의 경우 각각 23[dB], 27[dB]의 Eb/No 값을 필요로 하여 HDR-WPAN 시스템에 적용 가능한 성능을 보였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박봉혁, 이재호, "무선 홈 네트워크 기술," 주간기술동향, 2004. 4.
- [2] 박선욱, 하정락, 김성희, "고속률 WPAN의 기술 동향," 주간기술동향, 2003. 2.
- [3] IEEE Std 802.15.3, Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless personal Area networks(WPANs), 2003.
- [4] John Terry and Juha Heiskala, OFDM LANs: A Theoretical and Practical Guide. SAMS, 2002.

박 지 우 (朴祉雨)



2003년 2월 : 한국기술교육대학교  
통신공학과(공학사)  
2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기  
전자공학과(공학석사)  
2005년3월~현재 : 아이엔씨테크놀로지  
근무  
관심분야 : 무선통신, 주파수동기  
T-BDM분야

오 창 헌 (吳昌憲)



1988년 2월 : 한국항공대학교  
항공통신공학과(공학사)  
1990년 2월 : 한국항공대학교 대학원  
항공통신정보공학과  
(공학석사)  
1996년 2월 : 한국항공대학교  
대학원 항공전자공학과(공학박사)  
1990년 2월~1993년 9월 : 한진전자(주) 기술연구소 근무  
1993년 10월~1999년 2월 : 삼성전자(주) CDMA 개발팀  
근무  
1999년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 정보기술공학  
부교수  
관심분야 : 이동통신, 멀티미디어 무선통신, SDR,  
RFID/USN