# 전력선 통신을 위한 전송 기술 및 채널 특성 분석

## OFDM Receiver Performance with Measured Channel Model in Power Line Communications

김성철 · 김용화 · 임정민 · 오휘명
Seong Cheol Kim · Yonghwa Kim · Jeong Min Lim · Hui Myong Oh

본 논문에서는 홈 네트워크의 중요한 구성 요소인 전력선 통신을 위한 채널 측정 방법을 소개하고 측정된 채널을 기반으로 하는 전력선 시스템의 성능 분석을 수행한다. 먼저 전력선 통신의 표준화 동향을 살펴보고, 다음으로 전력선 채널을 측정하기 위한 방법을 소개한 후, 전력선 채널 모델을 제시한다. 측정된 채널을 기반으로 OFDM 방식의 HomePlug 1.0 표준과 전송 속도 향상을 위해 제안된 전송 기술의 성능을 분석한다. 이러한 기술들은 전력선 통신을 위한 표준에 적용되어 전력선 통신 용량 증대 및 커버리지 확대에 기여할 것으로 예상된다.

주제어: 전력선 통신, 채널 측정, OFDM, 길쌈 부호, Reed-Solomon 부호, 시간 동기, DPSK, QAM

This paper reports the results of wideband channel measurements conducted on in house outlets. Two kinds of channel measurements were performed: impulse response measurements and noise signal measurements. In measure based channel model, preamble assisted orthogonal frequency-division multiplexing access (OFDM) receiver scheme is proposed for differential phase shift keying (DPSK) and quadrature amplitude modulation (QAM). Timing synchronization and channel estimation is performed using the preamble. We provide numerical results to illustrate the performance of OFDM receiver in measure based channel model.

Keywords: Power Line Communication, channel measurement, OFDM, channel coding, synchronization

## I. 서 론

홈 네트워크 시장은 해마다 성장하고 있으며, 현재 본격적으로 시장이 형성되는 단계이다. 또한 향후 10년간 정보 통신 분야에서 가장 큰 성장을 이룰 것으로 예상되고 있다. 홈 네트워크의 포괄적인 개념은 가정의 모든 기기들을 네트워크로 구축해서 현재의 유/무선 망과의 연동이 가능한 하나의 네트워크를 만드는 것이다. 홈 네트워크를 구성하기 위한 방법으로 무선 네트워크, 유선 네트워크, 기존의 선을 이용하는 네트워크들이 고려되고 있다[1].

무선 네트워크들에는 IEEE 802.11 계열의 무선랜, Bluetooth, HomeRF 등이 있다. Bluetooth는 개인용 통신을 지원하고 있으며, 커버리지가 10여m 내외로 제한적인 단점을 가지고 있다. HomeRF는 1Mbps 규격을 제정하고 몇 개의 회사에서 제품을 출시하였지만 아직까지 시장에서 널리 사용되지 않고 있다. 무선랜은 가장 널리 사용되는 무선 네트워크 기술로써 현재 2.4GHz 대역에서 802.11b와 802.11g가 상용화되어 있으며, 각각 최대 11Mbps와 54Mbps까지 전송이 가능한 상황이다.

무선랜을 이용한 네트워크는 무선 접속점(Access

김성철, 김용화, 임정민: 서울대학교
오휘명: 한국전기연구원

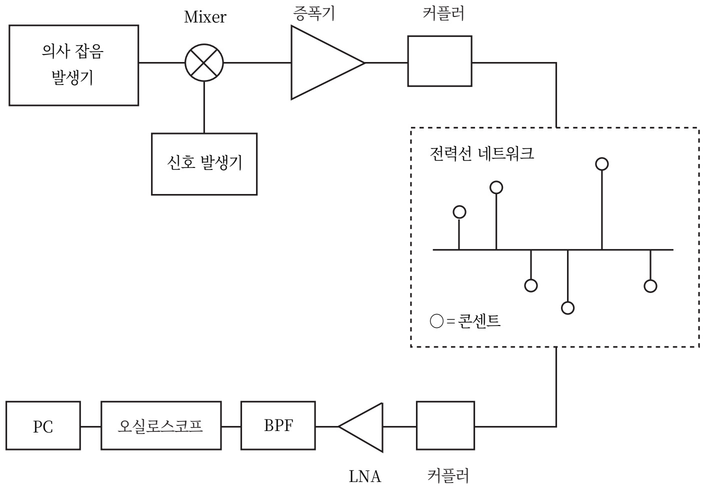



그림 1. 채널 측정 송수신기

Point)과 무선 단말기들로 홈 네트워크를 구축하는 방법이다. 이러한 네트워크는 통신의 이동성을 보장할 수 있다는 가장 큰 장점을 가지고 있지만, 이웃 건물 또는 동일 건물 내의 다른 홈 네트워크 망과의 간섭 문제 등이 제기되고 있다.

유선 네트워크의 이더넷(Ethernet)으로 네트워크를 구축하는 방법이다. 새로운 건물을 건축할 때 네트워크를 위한 선로 공사를 함으로써 고속 데이터 통신을 가능하게 할 수 있다. 그러나 기존의 건물 내에서는 배선이 용이하지 않고 비용이 많이 든다는 단점이 있다.

기존의 선을 이용하는 네트워크에는 전화선을 이용하는 방법, 케이블을 이용하는 방법, 전력선을 이용하는 방법들이 고려되고 있다. 전화선을 이용하는 방법을 위해 HomePNA(Home Phone-Line Networking Alliance)[2] 컨소시엄이 구성되어 있다. 현재 10Mbps급 제품이 출시 되어 있고, 2002년 9월에 100Mbps HomePNA H3.0 표준이 완성 되었다. HomePNA는 유선전화에 사용되고 있는 동선선로를 이용하여 방과 거실에 산재되어 있는 댁내 PC 등의 장비를 상호 연결하여 가입자 망을 공유하는 방법이다. 그러나 옥내에는 전화선 콘센트가 많지 않기 때문에 옥내에 여러 대의 PC가 있을 경우 위치에 제약을 받는다는 단점이 있다. 또한 전화선을 공유하고 있는 다른 기기들(자동 응답기, 팩스 또는 ISDN 기기 등)과의 간섭 문제도 제기되고 있다. 케이블 모뎀을 이용하는 방법으로 HomeCNA 컨소시엄이 구성되어 있으며, 케이블의 사용 역시 위치에 제약을 받는 단점을 가지고 있다.

전력선을 이용한 통신은 HomePlug 컨소시엄이 구성되어 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 기반으로 하는 14Mbps의 전송속도를 지원하는 HomePlug 1.0[3] 표준이 나와 있고, 이 표준을 기초로 한 상용화 제품이 이미 출시 되어 있다. 또한 곧 100Mbps HomePlug A/V 표준이 나올 예정이다.

전력선 통신은 1930년대부터 제안되어 왔으나, 통신 매질로써 큰 각광을 받지 못하여 왔다. 그러나 최근에 제안된 새로운 전송 기술들로 인해서 실용 가능한 통신 매질로써 인정 받고 있다. 전력선은 현재 가정 환경에서 별도의 망 확충을 필요로 하지 않고 실내의 모든 곳에서 이용가능 한 장점들이 있다. 단점으로 전력선 통신(PLC: Power-Line Communication)은 기본적으로 데이터 전송용이 아닌 전력 전달을 목적으로 설계된 전력선을 매체로 이루어지기 때문에 상당한 잡음과 다양한 감쇄 특성을 보이며 전력선 배선 선로와 부하의 변화에 따라 채널 전달 함수(transfer function)의 변화가 심하다는 점이다. 이로 인해, 전력선 통신에 사용할 변복조 방식, 채널 코딩(coding), 커플링(coupling), 필터링(filtering) 등을 적용함에 있어서 상당한 어려움과 문제점이 발생할 뿐 만 아니라, 하나의 시스템이 채널 특성에 따라 적절히 구성되어도 환경 변화에 따른 채널 특성 변화로 인해 제대로 성능을 나타내지 못하는 문제점이 발생하기도 한다.

이러한 문제점을 갖고 있는 전력선 채널의 특성을 분석하기 위해서 II장에서는 전력선 통신을 위한 채널 모델에 대해서 설명하고, III장에서는 II장에서 제시된 채널 모델을 이용하여 HomePlug 1.0 표준을 기반으로 하는 송수신기의 성능을 분석하며, IV장에서는 전력선 채널에서 QAM 전송 방식의 성능을 분석한다. V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

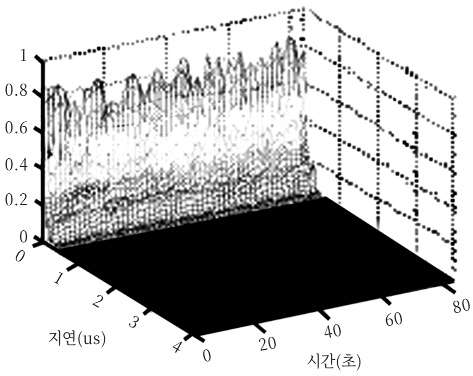



그림 2. 전력선 채널 충격 응답 예시

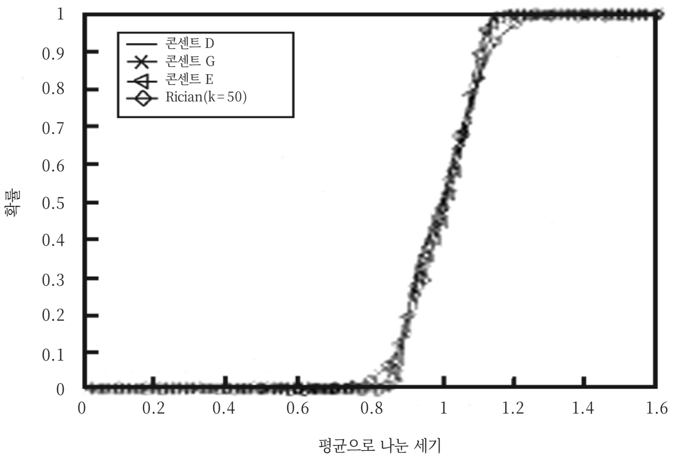



그림 3. 첫번째 경로의 CDF

# II. 전력선 채널 모델

## 1. 다중경로 모델

실내 전력선 채널은 통신을 목적으로 설계되지 않았기 때문에 채널 특성이 주파수, 시간, 위치에 따라서 다양하게 나타나며 이에 따라 전력선 채널을 시간에 따라 변하는 주파수 선택적인 채널로 모델링 한다[4]~[7]. 그러므로 고속 전력선 통신 설계를 위해서는 실내 전력선 채널의 광대역 채널 충격 응답을 얻어야 한다. 채널 충격 응답을 얻기 위해서 본 논문에서는 의사잡음(Pseudo-random Noise) 시퀀스의 자기상관함수 특성을 이용한다[8]. 그림 1은 의사잡음 시퀀스를 이용한 광대역 채널 충격 응답을 얻기 위한 시스템을 나타낸다.

먼저, 의사잡음 시퀀스를 발생 시켜 신호 발생기에서 발생된 21MHz 신호에 실은 후 전력 증폭기(Power Amplifier)에서 증폭을 하게 된다.

증폭된 신호는 전력선에 인가되기 위해 커플러(Coupler)를 거치고 이를 수신기가 위치한 콘센트에서 커플러를 통해서 받게 된다. 수신된 신호를 LNA(Low Noise Amplifier)를 통하여 증폭된 수신 신호를 디지털 오실로스코프(Digital Oscilloscope)를 사용해서 획득한다. 수신된 신호는 PC를 통해 저장되며 저장된 신호를 바탕으로 측정 후 신호 처리를 통해 채널 충격 응답을 구한다.

그림 2는 PN 시퀀스의 특징을 이용해서 얻어낸 채널 충격 응답 실험 결과의 한 예이다. 각 다중경로의 수신 신호 세기는 시간에 따라 변화하며, 식 (1)과 같이 모델링 된다.

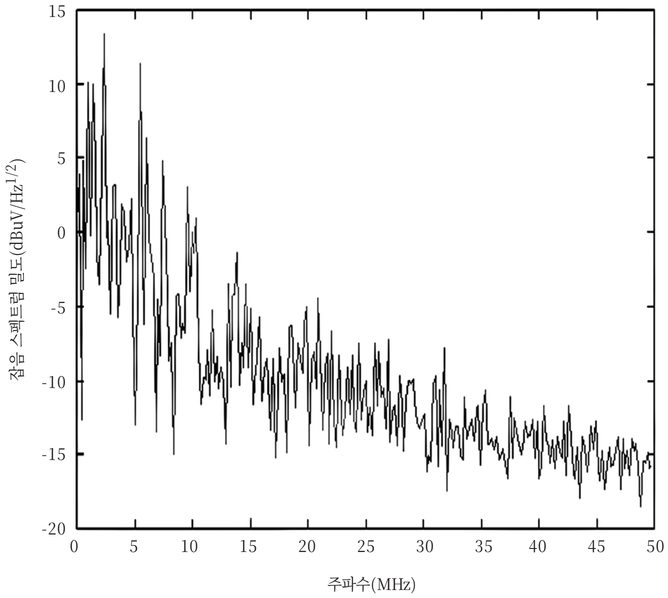



그림 4. 컬러드 잡음 스펙트럼 밀도

표 1. 시뮬레이션을 위한 다중 경로 모델

| 4경로 모델 | | | | 8경로 모델 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 경로 | 평균세기 | 지연(us) | K | 경로 | 평균세기 | 지연 | K | 경로 | 평균세기 | 지연(us) | K |
| 1 | 11.13 | 0 | 50 | 1 | 19.46 | 0 | 50 | 5 | 1.62 | 0.58 | 10 |
| 2 | 1.18 | 0.2 | 30 | 2 | 6.85 | 0.18 | 30 | 6 | 1.82 | 0.72 | 5 |
| 3 | 3.43 | 0.34 | 10 | 3 | 4.03 | 0.32 | 10 | 7 | 1.75 | 0.88 | 5 |
| 4 | 0.8 | 0.58 | 5 | 4 | 2.46 | 0.46 | 10 | 8 | 0.97 | 1.18 | 5 |

$$h(\tau;t) = \sum_{l=1}^{N_p} \alpha_l(t) \cdot \delta(\tau - d_l(t)) \tag{1}$$

이 때, $\tau$는 채널 충격 응답의 지연을 $t$는 채널 충격 응답의 시간을 나타낸다. 또한 $\alpha_l$은 $l$번째 경로의 경로 손실을 의미하고, $d_l$은 $l$번째 경로의 지연을 나타내며, $N_p$는 다중경로의 수를 나타낸다.

채널 충격 응답 모델을 구하기 위해 $\alpha_l(t)$의 시변 특성을 분석하는 것이 필요하다. 이를 위해서 각 다중경로에서 수신 전력의 시간에 따른 변화를 누적 확률 분포 함수(CDF: Cumulative Distribution Function)로 나타내며 이 함수에 가장 유사한 수학적 확률 분포 모델을 찾아내는 방법으로 모델링을 수행한다. 방이 4개인 단독 주택 환경에서 실험이 수행되었으며, 그림 3과 같이 첫번째 경로의 시간적 변화는 $K=50$인 Rician 분포를 따르며, Rician 분포의 K팩터는 경로 마다 다르게 모델링 된다[9].

실험을 진행한 실내 환경의 9개 콘센트 중에서 다중경로가 5개 이하로 나타낼 수 있는 콘센트가 6개이며, 3개의 콘센트에서는 다중경로가 6개 이상으로 나타났다. 실내 환경에서의 성능 분석을 위해서 표 1에서 주어진 예와 같이 4개의 다중경로를 가지거나 8개의 다중경로를 가지는 채널 충격 응답을 사용하였다. 한편 $\alpha_l$은 전체 평균 수신 신호를 1로 제한하기 위해 식 (2)에 따라 표준화를 거친다.

$$E\left[\frac{1}{N_p}\sum_{t=0}^{N_p-1} |\alpha_l|^2\right] = 1 \tag{2}$$

## 2. 잡음 모델

잡음 모델의 경우 무선 시뮬레이션 환경에서는 AWGN을 가정하고, 송수신기의 성능을 분석한다. 그러나 전력선 채널의 경우 전력선을 이용해서 가전기기

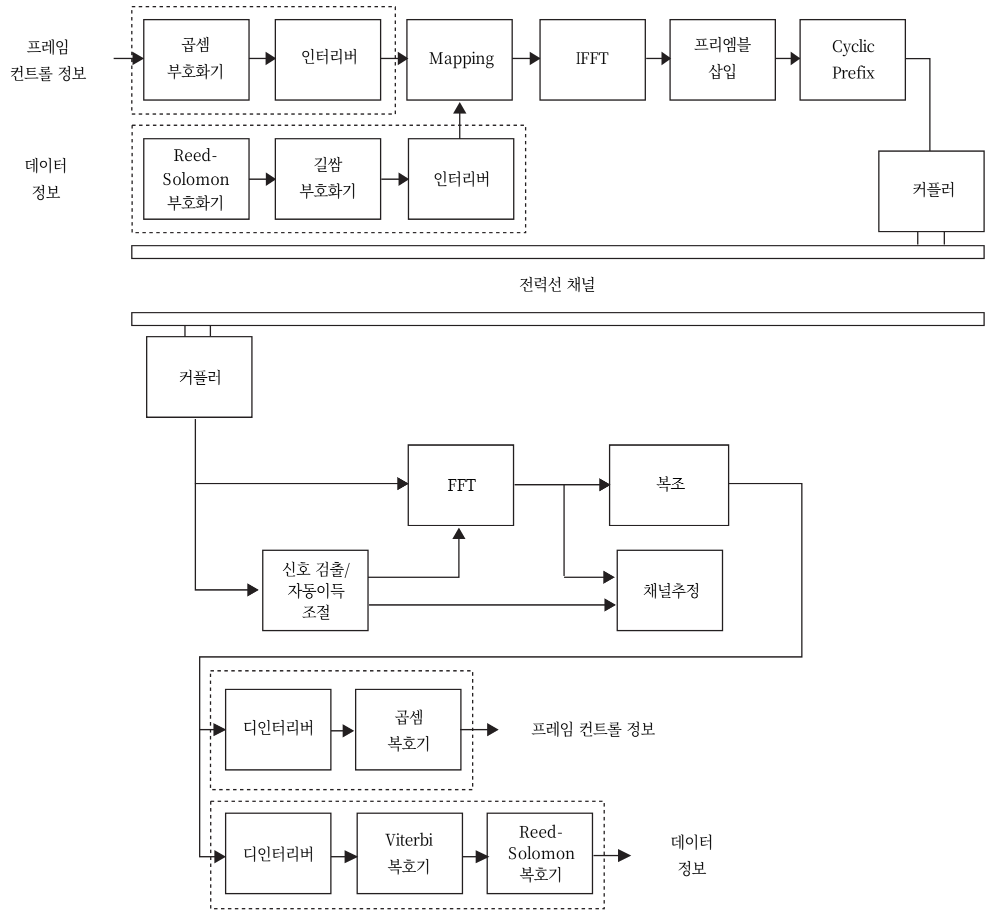



그림 5. HomePlug 1.0 송수신기 구조

에 전력을 공급하므로 다른 여러 가지 잡음들이 존재하게 된다. 전력선 채널에 존재하는 잡음은 다음과 같이 나누어서 생각할 수 있다[10]~[12].

- 컬러드 잡음(Colored noise): 주파수에 따라 다른 잡음 전력을 갖는 특성을 보인다. 일반적으로 사용되는 AWGN과는 달리 주파수에 따라 특성이 다르게 모델링이 가능하다.
- 협대역 잡음: 진폭변조(AM)된 연속적인 전파 신호들로 구성되어 있으며, 0~30MHz 대역을 같이 사용하는 무선 신호로부터 전력선으로 인가된다.
- 전력 주파수에 동기된 주기적 잡음: 동작하는 가전기기로부터 발생되는 전력 주파수에 동기되어 있지만, 전력 주파수 보다 높은 대역에서 이산 스펙트럼 형태로써 발생되는 잡음이다.
- 임펄시브 잡음(Impulsive Noise): 가전 기기의 스위치 작동 시 가전 기기 내부의 요인으로 인해 발생하게 되며, 짧은 시간 동안 방해 신호를 만들어내게 되서 고속 통신을 방해하게 된다. 전력 주파수에 동기된 주기적 임펄시브 잡음과 전력 주파수에 동기되지 않은 비주기적 임펄시브 잡음으로 분류할 수 있다. 고속 전력선 통신을 방해하는 큰 요인이나, 임펄시브 잡음 발생 구간이 하나의 패킷 전송 구간 보다 크고 영향을 주는 형태가 컬러드 잡음 형태로 모델링 되므로[12] 본 논문에서는 컬러드 잡음의 한 부분으로 분석하였다.

본 논문에서는 컬러드 잡음를 주파수 별로 측정 한 후, CPD(Cumulative Probability Distribution) 방식을 이용한 결과를 전력선 채널 잡음으로 사용하였다[10].

그림 4는 시뮬레이션 환경에서 복소 컬러드 잡음 $n_{cl}$의 주파수 스펙트럼 밀도 $N(f)$의 한 예를 보여주고 있다. 분산을 $2\sigma_n^2 = N(f) \cdot W = N_{cl}$로 가정하였으므로 성능 분석을 $E_b/N_{cl}$ 기준으로 수행하였으며, 이때 $W = 50MHz$ 이다.

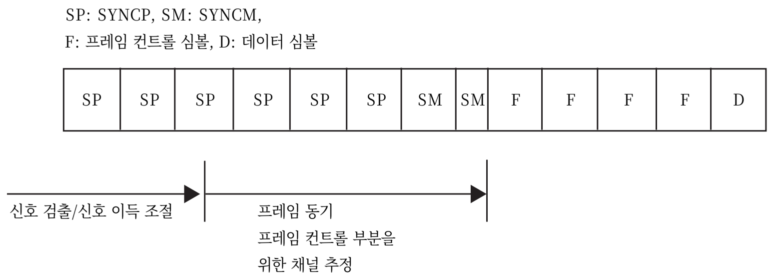



그림 6. HomePlug 1.0 프레임 구조

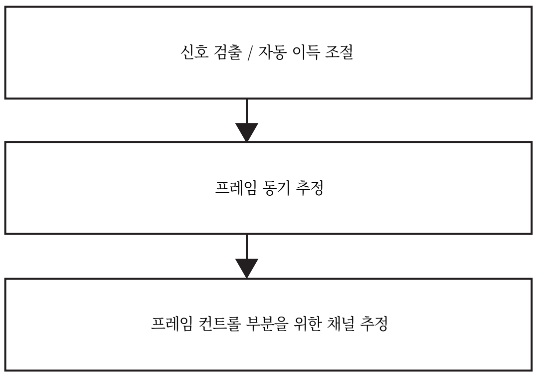



그림 7. 프리엠블 알고리즘

# Ⅲ. HomePlug 표준 기반 송수신기

## 1. 송수신기구조

HomePlug 1.0 표준의 송수신기 구조는 그림 5와 같다[13]. 주파수 선택적인 채널과 컬러드 잡음에 강한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 채택하고 있다. 다중경로 전력선 채널을 고려하여 상대적으로 긴 172 샘플의 cyclic prefix 구간을 사용하고 있다. 변조방식은 BPSK와 차동(Differential) 변조방식인 DBPSK, DQPSK 그리고 ROBO(Robust OFDM) 변조를 사용한다. ROBO 변조방식은 같은 정보를 4번 반복적으로 보내는 형태를 가지고 있으며, ROBO 인터리버에 의해서 시간 및 주파수적으로 재배치된다.

송신기에서 정보원으로부터 발생된 신호는 초기 프레임 컨트롤 부분과 페이로드 부분으로 나눠어 각각 곱셈 부호기(product encoder)를 갖는 전방오류정정(Forward Error Correction) 부호화기와 Reed-Solomon(RS) 부호와 길쌈 부호(Convolutional code)를 연결한 전방오류정정 부호화기를 거친다. 그 다음 각각에 해당되는 인터리버를 거치게 되고 변조방식에 따라 신호가 생성된다. 생성된 신호는 IFFT를 통하여 시간 영역으로 변환되고 cyclic prefix가 첨가된다. 이렇게 생성된 OFDM 신호는 커플러를 거쳐서 전력선 채널에 인가된다.

수신기에서는 프리엠블(Preamble)을 이용해서 신호 검출, 자동이득조정, 프레임 동기, 채널 추정을 수행하며 이 결과를 이용해서 프레임 컨트롤 정보와 데이터 정보를 복조하게 된다. 본 논문에서는 신호 검출과 자동 이득 조정이 완료된 신호에서 cyclic prefix가 첨가되지 않은 동일하게 반복되는 임의의 프레임을 이용하여 상관 값을 구해 프레임 동기를 얻는 방식을 사용하였으며, 채널에서의 신호 위상의 변화를 측정해서 보상하는 주파수 영역에서의 단일 탭 등화기를 위한 채널 추정 방식을 사용한다.

OFDM 전송방식은 다수의 반송파를 사용하여 송신하려는 데이터를 병렬로 구성하여 심벌의 주기가 긴 신호로 변환하여 전송함으로써 채널 충격 응답의 길이가 긴 채널에서 고속의 데이터 전송이 가능하며, 부반송파의 채널 상황을 이용하여 효율적인 데이터 전송을 할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 프레임 동기와 채널 상

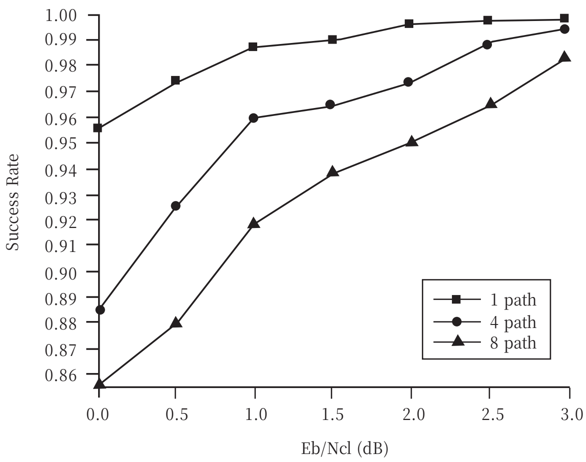



그림 8. 프리엠블 성능 분석(성공률)

태에 따라 성능의 변화가 민감하므로 정확한 프레임 동기와 채널 추정 및 채널 보상 장치가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 채널 추정과 프레임 동기를 위하여 그림 6과 같은 프리엠블을 사용한다[13].

수신 프리엠블 알고리즘은 그림 7과 같은 순서로 진행된다. 프리엠블은 6개의 SYNCP와 1.5개의 SYNCM으로 구성되며 SYNCP는 +1 신호 함수를 곱한 형태이고, SYNCM은 -1 신호 함수를 곱한 형태이다. 신호 검출과 자동 이득 조절(AGC)이 끝나는 시점을 수신기에서 판단할 수 없으므로 임의의 지점에서 신호 검출과 자동 이득 조절이 이루어졌다고 가정하고, 그 이후의 수신된 데이터, 알고 있는 SYNCP, SYNCM을 이용해서 수신기의 프레임 동기를 수행한다. 먼저, 각각의 프리엠블의 시작점을 SYNCP로 정의되는 파일롯 신호(pilot data)와 수신된 신호의 상관도를 이용해서 구할 수 있다[17]. 먼저, 식 (3)과 같이 256개로 구성된 파일롯 데이터의 공액 값을 곱해서 만든 결과를 얻은 후, 256개의 $|R_n|^2$ 중에서 최대값을 찾는다.

$$R_n = \sum_{m=1}^{N_s} r(n-256+m)PS^*(m) \qquad (3)$$

$N_s$의 값은 256, $r$은 수신 신호, 파일롯 신호 $PS$는 수신기에서 알고 있는 SYNCP 신호이다. 이 후, 다음 256개의 상관도 결과들 중에서 가장 큰 값을 최대값과 비교해서 더 크면 그 값을 최대값으로 바꿔준다. 이렇게 찾은 최대값 $\mu_i = \max_{n<i}|R_n|^2$와 최대값이 존재하는 위치 $n_i$를 지속적으로 구한다. 만약, $n$-$n_i$가 256의 배수이고 식 (4)를 만족하면 상관도를 구하는 것을 멈추고, 프리엠블의 끝점을 $\hat{N}_{frame} = n-256+128$로 정의한다.

$$0.5\mu_i > |R_n|^2 \qquad (4)$$

이 때, 채널 추정에 필요한 이용 가능한 SYNC 숫자 $\hat{N}$은 다음의 식 (5)을 이용해서 구한다.

$$\hat{N} = (\hat{N}_{frame}-128)/256 \qquad (5)$$

프레임 컨트롤 정보의 전송을 위하여 위상동조 BPSK 방식을 사용함으로 이 구간에서는 채널 등화를 위하여 식 (6)과 같이 $k$번째 부 반송파에 대한 추정된 채널정보 $\hat{H}(k)$가 필요하게 되며, $S(k)$는 프리엠블의 $k$번째 부 반송파에 대한 파일롯 신호이다.

$$\hat{H}(k) = \frac{\frac{1}{\hat{N}} \cdot \sum_{n=0}^{\hat{N}-1} \left( \frac{1}{\sqrt{256}} \sum_{i=\hat{N}_{preamble}-128-256(n+1)}^{\hat{N}_{preamble}-128-256n} x(i) e^{j2\pi ik/256} \right)}{S(k)} \qquad (6)$$

한편, 데이터 전송을 위한 구간에서는 DBPSK, DQPSK 방식을 사용함으로 데이터 심볼 시작점을 추정하는 타이밍 옵셋은 사용하지만, 채널 추정을 필요로

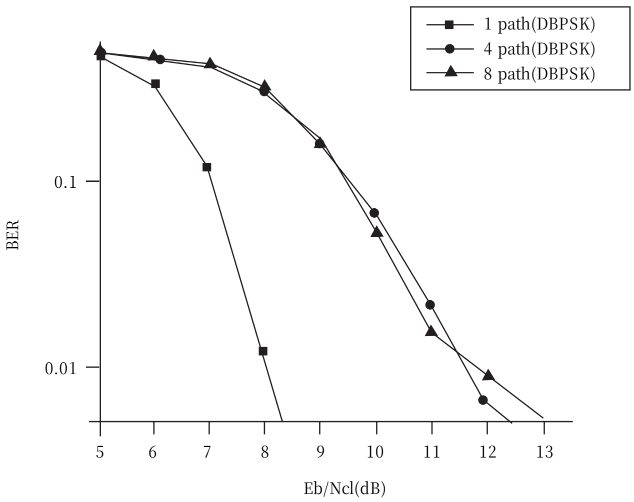



그림 9. 데이터 정보 BER

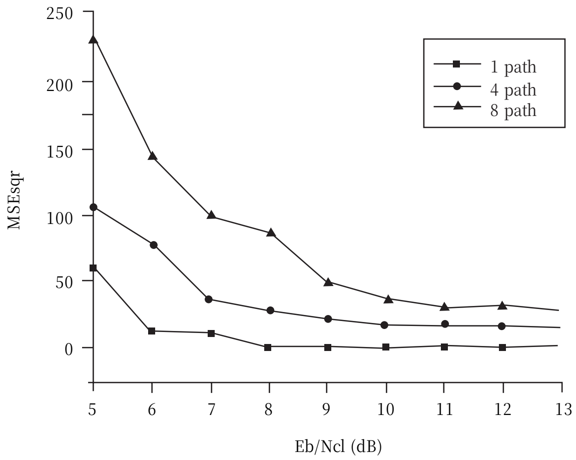



그림 10. 프리엠블 성능 분석 ($MSE_{sqr}$)

하지 않는다.

데이터를 전송할 때, 채널 부호로 에러 정정 능력 ($t=8$)은 고정되어 있고, RS(209,193) 부호를 사용하였으며, 부호율 1/2 길쌈 부호화기(생성 다항식: $g_1$:$171_8$, $g_2$:$133_8$)를 사용하였다.

프레임 컨트롤 정보와 데이터 정보는 각각 위상동기(coherent) 복조와 차동 복조 후, 심볼을 검출한다. 검출된 심볼을 이용해서 경판정(Hard-Decision) 기반의 Viterbi 알고리즘에 의해 복호 과정을 수행한 후[14], RS 부호를 Euclidean 방법을 이용하여 복호를 수행한다[15].

## 2. 성능 분석

프리엠블의 성능분석은 성공률(Success Rate)을 통해서 이루어졌다. 성공률은 다음의 식 (7)과 같이 구하는 $\hat{N}$의 값이 실제 값 $N$과 같은 확률로 정의되며 다음의 식 (8)과 같이 실제 프리엠블이 끝나는 점과 추정된 프리엠블이 끝나는 점의 차이를 이용해서 $MSE_{sqr}$를 정의한다.

$$성공률 = \frac{(N = \hat{N})인\ 프레임\ 수}{총\ 송신\ 프레임\ 수} \quad (7)$$

$$MSE_{sqr} = \sqrt{(E[\,|N_{frame} - \hat{N}_{frame}|^2\,])} \quad (8)$$

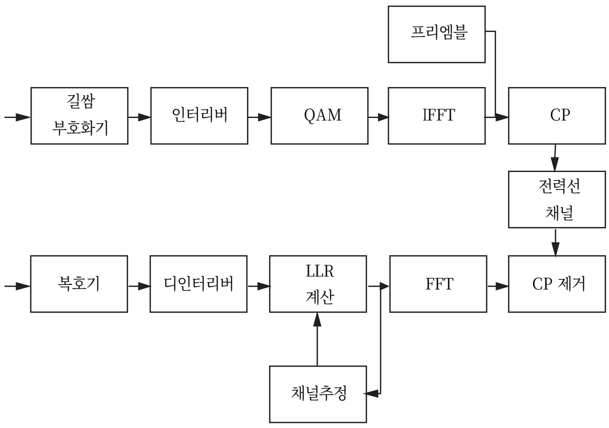



그림 11. QAM OFDM 시스템 구조

성공률의 경우, 그림 8과 같이 다중경로가 8개인 경우에 가장 낮게 나타났다. 이때, 성공하지 못한 경우에는 가드 구간(Guard Interval)이 172개의 샘플로 주어졌으므로 타이밍 옵셋과 다중경로 지연의 합이 가드 구간보다 커질 수 있는 다중경로 신호는 ISI(Inter Symbol Interference)로 작용하게 된다. 이에 따라, 프레임 컨트롤 정보와 데이터 정보의 복조, 복호 과정에서 동기 잡음으로 영향을 주게 된다. 성공한 경우에는 타이밍 옵셋과 다중경로 지연의 합이 가드구간보다 작아서 다중경로 신호가 ISI로 작용하지 않게 된다.

그림 9는 DBPSK로 전송 하였을 때, 프리엠블을 포함하며 경판정 검출을 기반으로 길쌈 복호기와 RS 복호기를 거친 데이터 부분의 BER(Bit Error Probability)을 나타낸 그림이다. 프리엠블에서 생긴 동기 오류와 다중경로에 의한 영향을 받아, 4경로와 8경로 모델에서 BER 성능이 단일 경로에서 컬러드 잡음만 존재하는 경우보다 BER이 $5.0^{*}10^{-3}$ 기준으로 4dB 이상 나빠짐을 볼 수 있다.

그림 10은 DBPSK로 전송 하였을 때, 프리엠블의 $MSE_{sqr}$를 나타내었다. 1경로 모델의 경우 8dB에서 0으로 수렴하는 값을 보였다. 4경로와 8경로 모델에서는 $MSE_{sqr}$가 존재하며, 그 값은 8경로 모델일 때 더 크게 나타남을 볼 수 있었다.

# IV. 16-QAM OFDM 송수신기

## 1. 송수신기 구조

본 논문에서는 전력선 통신의 전송 속도 향상을 위해서, 주파수 효율이 높은 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 신호의 성능을 그림 11과 같은 송수신기를 통해서 분석한다. 부호율 1/2 길쌈 부호화기(생성 다항식: $g_1$:$171_8$, $g_2$:$133_8$)를 사용하였으며, 1680 블록 인터리버를 사용하였다.

프리엠블을 통해 수신기에서 프레임 동기와 수신된 신호의 분산 $\sigma_s^2$와 잡음의 분산 $\sigma_n{}^2$을 알고 있다고 가정하였으며 두개의 OFDM 심볼을 채널 추정을 위해 사용하였다. HomePlug 1.0 표준과 같이 256개의 부반송파를 사용하였으며, cyclic prefix 샘플 수는 172개로 정의 하였다. 전방오류정정 부호로써 길쌈 부호를 사용하였으며, 전송되는 16-QAM 심볼 $s$는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$s \in \{s_1, s_2, \ldots, s_{16}\} \text{ where } \frac{1}{16}\sum_{k=1}^{16} |s_k|^2 = 1 \tag{9}$$

QAM으로 복조된 심볼 벡터 $X$는 IFFT 블록을 통과해서 전력선 채널에 인가된다. 전력선 채널을 통과한 수신 신호가 FFT 블록을 통과해서 얻은 신호 벡터를 $R$이라고 하면, $R = HX + N_{cn}$로 표현할 수 있으며, $H$는 다중경로 전력선 채널의 주파수 응답 벡터를 나타내고 $N_{cn}$은 전력선 채널의 컬러드 잡음을 수신기에서 FFT를 한 후의 벡터를 나타낸다. 파일롯 데이터로 보낸 두개의 OFDM 심볼을 통해서 $\hat{H}$를 얻을 수 있고, 이를 이용해서 연판정(soft-decision)을 위한 부호화된 정보 $c$의 LLR(Log Likelihood Ratio)을 다음 식 (10)와 같이 얻을 수 있다[16].

$$\Lambda(c) = \frac{1}{\sigma_n^2}\left( \min_{x^- \in \{xc=-1\}} |R - \hat{H}X^-|^2 - \min_{x^+ \in \{xc=+1\}} |R - \hat{H}X^+|^2 \right) \tag{10}$$

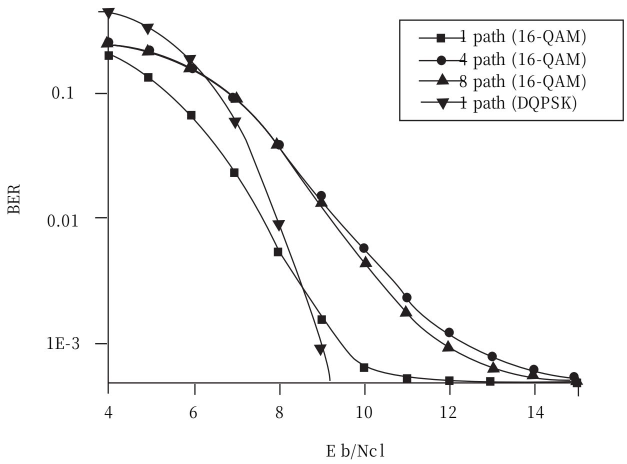



그림 12. 16QAM OFDM BER

LLR 값을 이용하여 Viterbi 알고리즘을 수행하며, 이를 통해 전력선 채널에서의 16QAM OFDM 시스템의 성능을 분석한다.

### 2. 성능 분석

그림 12는 16-QAM과 HomePlug 1.0 표준을 따르는 DQPSK로 전송 하였을 때, 데이터 부분의 BER을 나타낸 그림이다.

그림 8에서와 같이 프리엠블의 동기 오류 확률은 16QAM 수신기 작동 범위에서 매우 작게 나타난다. 그러므로 프리엠블의 동기 오류는 없다고 가정하였으며 단일 경로에 컬러드 잡음만 존재 하는 경우 16QAM 신호는 BER이 $10^{-3}$ 일 때 다중경로가 존재하는 경우 보다 3dB의 성능 향상이 되었고 DQPSK 전송 신호보다 0.5dB 성능 손실이 나타났다. 또한 경로의 수와 관계없이 16 QAM으로 전송한 신호는 컬러드 잡음의 영향으로 $5^{*}10^{-4}$에 수렴하는 결과를 나타내었다. 이 때, 경로 8인 경우가 성능이 좋게 나타났는데, 이는 8경로인 경우가 첫번째 신호가 4경로인 경우보다 상대적으로 더 컸기 때문에 성능이 더 좋게 나타났다고 생각된다. OFDM 수신기에서 컬러드 잡음이 강한 주파수 대역을 부 반송파 데이터로 사용하지 않는 방법을 사용한다면, 16QAM과 같은 보다 높은 전송 속도를 갖는 전송 방식을 사용할 수 있을 것이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 홈 네트워크 시장에서 전력선 통신이 갖고 있는 장단점을 요약한 후, 전력선 통신의 채널과 OFDM 시스템의 성능 분석을 수행하였다. 전력선 통신의 다중경로 채널 환경을 의사잡음 시퀀스 측정 방식을 통해 모델링 하였으며 전력선 통신의 잡음은 컬러드 잡음 형태로 모델링 하였다. 모델링 된 채널은 성능 비교를 위해 컬러드 잡음 채널, 4경로 Rician 채널과 8경로 Rician 채널로 분류 하였으며, 각각의 채널 환경에 대해서 성능을 분석하였다. 송수신 방식은 HomePlug 1.0 표준의 OFDM DPSK 방식과 보다 주파수 효율이 높은 OFDM 16-QAM 전송 방식의 성능을 분석하였다.

III장에서 프리엠블의 시간 동기에 관한 성능 분석은 성공률을 통해서 이루어졌다. 성공률의 경우 관심 $E_b/N_{cl}$에서 8경로 모델에서 가장 크게 나타났다. 성공하지 못한 경우에는 ISI가 존재하였으나, 성공한 경우에는 가드구간의 효과로 ISI가 존재하지 않았다. 프리엠블, 프레임 콘트롤, 데이터를 모두 포함한 HomePlug 1.0 표준 DBPSK 성능 분석을 수행하였다. 다중경로가 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우보다 $5.0^{*}10^{-3}$에서 4dB 이상 차이를 볼 수 있었다.

IV장에서 시간 동기 오류가 없다고 가정하고 QAM 전송신호의 성능 분석을 수행하였다. 16QAM 신호의 경우 단일 경로에 잡음만 존재하는 경우 BER이 $10^{-3}$ 일 때 다중경로가 존재하는 환경보다 3dB의 성능 향상을 볼 수 있었지만 DQPSK로 전송 하였을 때 보다 0.5dB 성능 손실이 있었다. 또한 16QAM으로 전송하였을 때, 컬러드 잡음의 영향으로 BER이 $5^{*}10^{-4}$에 수렴하는 결과를 보여주었다. OFDM 수신기에서 컬러드 잡음이 강한 주파수 대역은 부 반송파 데이터로 사용하지 않는 방법을 사용한다면 16QAM 신호를 전력선 통신에서 사용할 수 있을 것이다.

또한, HomePlug 컨소시엄에서 전력선 표준 개선에 힘쓰고 전력선 통신 기기 개발에 관한 노력이 계속 이루어진다면, 전력선 통신이 홈 네트워크 분야에서 커다란 역할을 할 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 대학 IT연구센터 육성, 지원사업의 연구 결과로 수행되었음

**[참고문헌]**

[1] Y-J. Lin, H. A. Latchman, R. E. Newman, S. Katar, "A comparative Performance Study of Wireless and Power Line Networks," *IEEE Comm*. Mag. Vol. 41, issue: 4, Apr. 2003, pp. 54-63.

[2] HomePNA, http://www.homepna.com/

[3] HomePlug, http://www.homeplug.com/

[4] F. J. Canete, J. A. Cortes, L. Diez, J. T. Entrambasaguas, "Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium," *IEEE Comm. Mag*. Vol. 41, issue: 4, April 2003, pp. 41-47.

[5] H. C. Ferreira, H. M. Grove, O.Hooiijen, and A. J. Han Vinck, " Power line communications : an overview", *IEEE AFRICON 4th* ,Vol. 2, 1996, pp. 558-563.

[6] D. Liu, E. Flint, B. Gaucher and Y. Kwark, " Wide band AC power line characterization", *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 45, No. 4, Nov. 1999, pp. 1087-1097.

[7] O. G. Hooijen,"A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No.4, Nov. 1998, pp. 331-336.

[8] D. C. Cox, "Delay doppler characteristics of multipath propagation at 910MHz in a suburban mobile radio environment", *IEEE Trans. Antennas Propagat*., Vol. AP-20, No.5, Sep. 1972, pp. 625-635.

[9] Y. H. Kim, H. H. Song, J. H. Lee, S. C. Kim, "Wideband Channel Measurements and Modeling for In-House Power Line Communication", Proc ISPLC2002, Mar. 2002, pp 189-193.

[10] L. T. Tang, P. L. So, E. Gunawan, Y. L. Guan, S. Chen, T. T. Lie, "Characterization and modeling of in-building power lines for high-speed data transmission," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 18, Jan. 2003, pp. 69-77.

[11] J. Abad, A. Badenes, J. Blasco, J. Carreras, V. Dominguez, C. Gomez, "Extending the Power Line LAN Up to the Neighborhood Transformer," *IEEE Comm. Mag*. Vol. 41, issue: 4, Apr. 2003, pp. 64-70.

[12] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Powerline communications", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, Issue : 1, Feb. 2002, pp. 249-258.

[13] HomePlug Powerline Appliance 1.0.1. Specification, 2001.

[14] R. Blahut, *Algebraic Codes for Data Transmission*, Cambridge University Press, 2003.

[15] S. B. Wicker, and V. K. Bhargava, *Reed-Solomon Codes and Their Applications.* New Jersey, 1983

[16] T. May, H. Rohling, V. Engels, "Performance analysis of Viterbi decoding for 64-DAPSK and 64-QAM modulated OFDM signals," IEEE Trans. Comm., Vol. 46, issue : 2, Feb. 1998, pp. 182-190.

[17] K. W. Yip, T. S. Ng and Y. C. Wu, "Impacts of Multipath Fading on the Timing Synchronization of IEEE 802.11a Wireless LANs," *IEEE ICC 2002*, Vol. 1, No. 28, May 2002, pp. 517-521.

**김 성 철**
**(Seong Cheol Kim)**

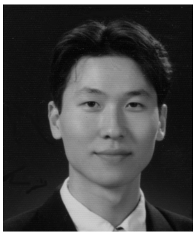
1984: 서울대학교 전기공학과 학사
1987: 서울대학교 전기공학과 석사
1995: Polytech University 박사
1995 ~ 1999: AT&T 연구소
1999 ~ 현재: 서울대학교 조교수, 부교수
관심분야: 무선 통신, 이동 통신, 유무선 채널 모델링, MIMO-OFDM, 전력선 통신, 위성 통신, 전파전파, 전파환경
E-mail: sckim@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-1822
Fax: +82-2-888-3633

**김 용 화**
**(Yonghwa Kim)**

2001: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사
2003: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2003 ~ 현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정
관심분야: 디지털 통신, 채널 추정 알고리즘, 채널 코딩 알고리즘, MIMO-OFDM
E-mail: yhkim@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-1775
Fax: +82-2-888-3633

**임 정 민**
**(Jeong Min Lim)**

2001: 육군사관학교 전자공학과 학사
2003 ~ 현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정
관심분야: 디지털 통신, 전력선 통신, 채널 모델링
E-mail: teemy@maxwell.snu.ac.kr
Tel: +82-2-880-1775
Fax: +82-2-888-3633



**오 휘 명**
**(Hui Myong Oh)**

1998: 연세대학교 전기공학과 학사
2000: 연세대학교 전기공학과 석사
2000 ~ 현재: 연세대학교 전기공학과 박사과정
2001 ~ 현재: 한국전기연구원 연구원
관심분야: 디지털 통신, 전력선 통신, OFDM
E-mail: hmoh@keri.re.kr
Tel: +82-31-420-6178
Fax: +82-31-420-6199