

전력선 채널에서 음향신호의 OFDM 변조 전송 특성

허윤석*

요 약

본 연구는 저압 전력선 망을 통한 전력선 통신(PLC: Power Line Communication)에 관한 내용이다. 전력선 통신이 가지는 주요 잇점은 기존의 인프라구조의 사용이다. 전력선 통신 채널은 전형적으로 전력선의 길이와 주파수가 증가함에 의해 신호 감쇠를 나타내는 주파수 선택적 페이딩(Frequency-Selective Fading)을 가지는 다중 경로 반사 전파로 모델링 할 수 있다.

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 다수개의 낮은 데이터 율의 반송파들이 높은 전송율을 이루는 형태로 송신기에서 조합되는 변조 기법이다. 모델링한 다중 경로 반사 전력선 채널에 음향 신호를 입력하여 체계의 성능을 모의 실험을 통해 분석, 검증하였다.

1. 서론

전력선 통신(Power line communication; PLC)은 전력 공급을 목적으로 하는 전력선을 이용하여 인터넷, 음성, 데이터 서비스 통신 등을 하는 것을 말한다. 지금의 고속·광대역 인터넷 서비스의 보급은 유선의 경우 xDSL(Digital Subscriber Line), 케이블망 등이 이용되고 있으며 무선의 경우 B-WLL(Broadband Wireless Local Loop) 등이 이용되고 있으나, 이러한 방법은 새로운 망 구축비용이 적은 대도시 지역을 중심으로 서비스가 치중되어 있는 현실이다. 특히 농어촌 및 산간 오지 등과 같이 동축케이블이나 광케이블의 포설이 용이하지 않은 지역에서는 기존의 완벽한 전력선 인프라를 사용하여 광대역 액세스망을 구축하는 방안이 매우 효과적이며 최적의 솔루션이 될 것으로 예상된다. 전력선을 통

신 매체로 이용하면 매우 경제적인 네트워크를 구축할 수 있는데, 그 이유는 이미 모든 건물이나 시설에 전력선이 설치되어 새로운 통신 회선의 설치가 필요 없으며 집안 어느 전원 콘센트에서도 통신이 가능하기 때문에 편리하다. 또한 무선통신에서는 매우 높은 주파수를 사용하나 전력선을 이용한 통신에서는 수백㎐에서 수십㎞의 반송파를 사용하여 신호를 전송할 수 있는 장점이 있다.

그러나 전력선은 주파수 60Hz의 전력을 공급하는 것을 목적으로 하기 때문에 주파수가 낮은 선로의 특성 임피던스나 감쇠상수, 위상상수 등 선로의 전파상수와 같은 선로정수가 규정되어 있지 않다. 부분적으로 선로정수가 같지 않은 선로를 사용하기 때문에 높은 주파수 신호를 전송하고자 하는 경우에는 이들 모두를 고려해야 한다. 그리고 각 가정 또는 산업 현장마다 전력을 사용하는 모든 곳에서 부하가 다르기 때문에 신호를 전송하고자 할 때는 임피던스 부정합이 생겨 반사파가 발생하고 감쇠가 발생한다. 또한

* 충청대학 전자정보과 조교수

선로상수가 불규칙적으로 변동하게 되어 주파수에 대한 선택적 페이딩이 발생하게 된다. 그리고 각종 전기·전자 기기로부터 발생하는 불필요한 전자파가 전력선에 유입되어 잡음 특성을 가지게 된다.[1,2,3]

그러므로 전력선을 이용한 통신에서는 이러한 장애를 극복할 수 있는 통신 기법이 요구된다. 즉 잡음에 대한 영향이 적고 협대역으로 이웃간 간섭이 적으며 다른 기기에 대한 고주파의 영향을 최소화할 수 있는 통신 기술이 요구된다. 그중 병렬 대역 확산기법인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)에 관심이 집중되었다.

OFDM이란 다중 반송파를 사용하여 신호의 이산 데이터를 전송하는 방법으로, 다수의 직교 반송파를 사용함으로써 주파수 효율적인 전송이 가능하다. 최근 차세대 이동통신을 위한 후보 기술로서 적극 검토, 연구되고 있으며 현재 DAB, DVB등의 방송 시스템과 WLAN등의 고속데이터 통신시스템에 사용되고 있다.[4,5]

본 논문에서는 전력 분배 선로상의 다중 노드에 의한 다중경로를 고려한 전력선 채널에 대한 특성을 II장에서 살펴보고, III장에서는 전력선 채널에 적용할 OFDM 변·복조 시스템의 특성에 대해서 알아본다. IV장에서는 II장에서 모델링한 전력선 채널 환경에 III장의 OFDM 시스템에서의 BER 성능을 비교하고, M진 QAM 부호화된 음향신호를 입력 신호한 모의 실험을 통하여 전력선 채널 환경에 OFDM 변조 기법을 적용하였을 때의 출력 성능을 확인하고, V장에서 결과를 논한다.

II. 전력선 채널 모델

전력선 통신에서 사용되는 전송 매체는 전력선이다. 이 전력선은 기본적으로 데이터 전송용으로 설계된 것이 아니며 단순히 전력 전달에 대해 최적화되어 설계된 것이기 때문에 데이터 통신용으로 사용될 경우 다양한 잡음 특성과 감쇠 현상 등이 나타난다. 또 전력선 접속 형태(topology)와 부하의 변화에 따라 전달 특성의 변화도 심하다.[1,2,3]

전력선 네트워크는 꼬임선, 동축케이블, 광케이블 등과 같은 기존 통신 매체의 구성, 구조와 물리적 특성과는 달리 고려하여야 한다. 그러므로 전력선 채널의 열악한 특성을 고려한 적절한 통신 시스템의 설계와 계획을 위한 저전압 전력선 네트워크의 전달함수의 모델링이 요구된다. 저전압의 주된 네트워크의 구조는 전자 기기들의 접속에 의한 신호 전파가 발생한다. 신호 전파는 송신부와 수신부의 눈에 보이는 경로뿐만 아니라 추가적인 전파 경로(echoes)도 고려되어야 한다. 이는 주파수 선택적 페이딩을 가지는 다중 경로 신호 전파이다. 그림 1은 본 연구에서 고려하는 다중 경로 반사 기반 전달함수(multi-path echo-based transfer function) 모델이다.[1]

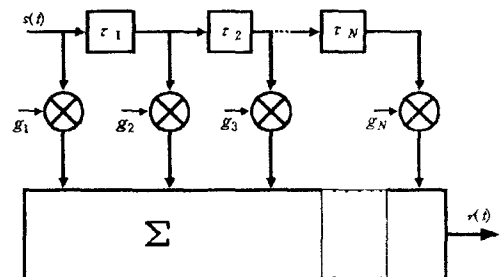


그림 1. 반사 지연 모델 정의를 위한 기본 구조
Fig 1. Basic structure for the echo-model definition

N번의 반사들을 포함하는 전송 채널의 기본 함수는 식(1)과 같이 임펄스 응답으로 표현할 수 있다.

$$h(t) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

이를 주파수영역의 전달 함수로 변환하면

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (2)$$

이고, 여기서 계수 τ_i 는 반사 지연을 표시하고 g_i 는 반사 감쇠를 의미한다.

다중 경로 전파와 주파수, 전력선 길이에 의존하는 감쇠를 고려한 일반화된 전달함수는 식(3)과 같다.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (3)$$

표 1은 식(3)에서 사용한 파라미터에 대한 설명이다.

표 1. 전달함수의 반사 모델 파라미터
Table 1. Parameters of the echo model of the transfer function

N	신호 경로의 경우 수
i	경로의 수
a_0, a_1	감쇠 요소
g_i	경로 i 의 가중 요소
k	감쇠 요소의 지수
d_i	경로 i 의 길이
τ_i	경로 i 의 지연

식(3)은 세 부분의 요소 항이 존재함을 알 수 있다. 전력선 길이와 사용 주파수 의존 항인 지연 감쇠요소 항 (g_i)과 사용 전력선의 종류에 따른 $R'(\Omega/m), L'(H/m), G'(\sigma/m), C'(F/m)$ 로 구성되는 감쇠계수의 항 ($e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i}$), 신호 경로의 길이와 위상 속도로 구성되는 지연 항 ($e^{-j2\pi f \tau_i}$)으로 구분할 수 있다.

그림 2는 샘플 네트워크의 체계를 보여 주고 있다. 이는 모의 실험에서도 사용하는 구성 체계이다. ㉠단이 신호 송신부이고, ㉡단은 수신부이며, ㉢지점에서 분기가 일어났다. ㉠와 ㉡의 특성 임피던스는 매칭 된 것으로 가정하며, ㉢점은 반사 계수가 $r=1$ 로 오픈 상태를 유지하게 하였다.[2]

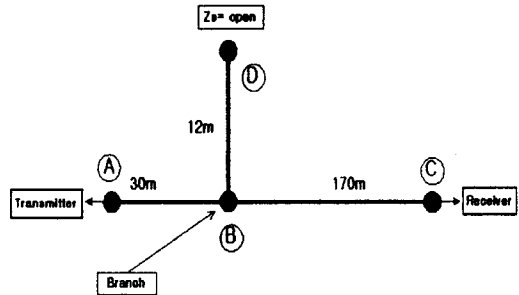
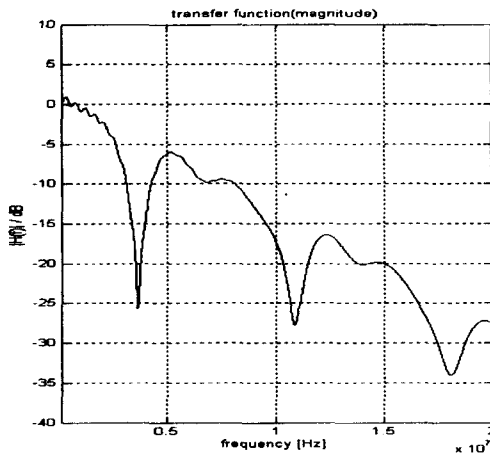


그림 2. 샘플 네트워크 체계
Fig 2. Topology of the sample network

흥미로운 점은 일반적으로 단지 반사의 작은 수만이 고려된다는 점으로 대부분의 경우 3~5개의 경로 수는 케이블에서 40여 개의 반사 탭을 이루는 경우를 고려하기에 충분하다는 것이다. 이는 먼 거리의 반사는 보통 감쇠에 의해 소멸되고 수신측에 가까운 이웃 반사만이 반드시 고려되어야 한다는 것을 의미한다.

그림 3은 6개의 경로를 가지는 식(3)에 근거한 전력선 채널 모델의 주파수와 위상의 전달 특성을 모의 실험 한 결과이다. 주파수 대역은

전력선 통신에 사용이 고려되고 표준화가 진행되고 있는 DC~20MHz에서 행하였다. 전달함수의 특성은 3.6MHz(≈ 280 ns)대역, 10.9MHz(≈ 93 ns) 및 18MHz(≈ 56 ns)대역에서 주기적인 심한 노치가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이는 측정구간의 반복적인 첫 번째 주기의 홀수배 다중에서 나타나고 있음을 의미한다. 위상 특성은 선형적 변화를 보이며 심한 노치의 주파수 대역에서 위상 왜곡의 변화를 보인다.



III. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

OFDM은 주파수 선택적 페이딩(Frequency Selective Fading)에 강인한 주파수 효율적인 변조방식으로써 고속 전송률의 직렬 신호를 낮은

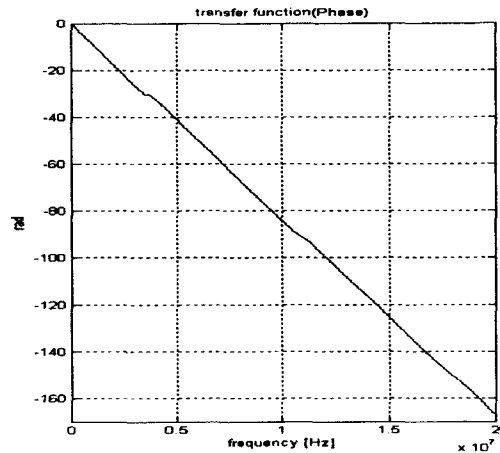


그림 3. 반사 지연 모델의 전달함수와 위상 특성

Fig 3. Transfer function and phase characteristics of echo model

표 2. 샘플 네트워크의 반사 모델 파라미터

Table 2. Parameters of the echo model of the sample network

Path No.	1	2	3	4	5	6
Length(m)	200	221	242	259	266	530
Weighting factor	0.54	0.275	-0.15	0.08	-0.03	-0.02
	$a_0 = -2.1E-3$		$a_1 = 8.1E(-10)$			

모의 실험에 사용한 샘플 선로의 파라미터는 표 2에 정리하였다.[2] 이는 사용 모델의 모든 실질적인 효과를 포함하는 요소들이다.

전송률의 여러 병렬 신호로 분리한 후 이를 각각의 직교 부반송파(sub-carrier)에 실어 송·수신하여 데이터 전송률을 높이는 방식으로 낮은 전송률을 갖는 부반송파의 심벌구간(symbol duration)이 증가하게 되므로 다중경로 지연확산에 의해 발생하는 시간상에서의 상대적인 신호 분산(dispersion)이 감소한다. 모든 OFDM 심벌 사이에 채널의 지연확산보다 긴 보호구간(Guard Interval)을 삽입하여 심벌간 간섭(Inter-Symbol Interference; ISI)을 제거할 수 있으며, 보호구간에 OFDM신호의 일부를 복사하여 심벌의 시작

부분에 배치하면 OFDM 심벌은 순환적으로 확장(cyclically extended)되어 부반송파간 간섭(Inter-Carrier Interference; ICI)을 피할 수 있다. 또한 주파수 분할방식에 비하여 스펙트럼의 효율을 높일 수 있는데 그 이유는 채널의 효율을 극대화하기 위하여 부반송파간 간섭이 발생하지 않도록 직교성(Orthogonality)을 유지하여 부반송파간 중첩을 허용하기 때문이다.[5]

일반적으로 저역통과 등가 OFDM신호를 다음과 같은 변조된 부반송파의 병렬 전송신호로 볼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \Psi_{n,k}(t) \quad (4)$$

여기에서 $s(t)$ 는 저역통과 등가 OFDM 신호를 나타내며, $C_{n,k}$ 는 n 번째 심벌(1-FFT 신호 구간)에서 k 번째 부반송파에 실려지는 실제 정보신호이고, $\Psi_{n,k}$ 는 기본신호의 요소이다.

일반적인 통신 시스템에서와 같이 OFDM의 개념적 측면에서는 매우 많은 이상적인 변복조 블록이 필요 하지만 이와 같은 블록의 필요 없이 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform) 방법으로 이를 대신한다.[4,5]

식(4)을 부반송파의 심벌을 $1/T_s$ 보다 높은 샘플링율로 샘플링 한다면 가장 낮은 부반송파 주파수에 대하여 $f_0=0$ 을 가정하면, n 번째 OFDM 심벌에서의 전송 신호 $F_n(t)$ 의 이산신호 $F_n(m)$ 은 다음과 같다.

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \Psi_{n,k}(t) \Big|_{t=(n+m/N)}, \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

즉,

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} = N \cdot IDFT(C_{n,k}) \quad (6)$$

여기에서 $IDFT(C_{n,k})$ 는 $C_{n,k}$ 에 대한 역이산푸리에 변환(Inverse Discrete Fourier Transform)이다.

OFDM의 전송방식은 송신측에서 전송 데이터 열 $C_{n,k}$ 에 대하여 IDFT한 신호를 전송하면 수신측에서는 식(7)과 같이 수신신호에 대하여 DFT함으로써 원래 전송신호 $C_{n,k}$ 를 얻을 수 있다.

$$C_{n,k} = \frac{1}{N} DFT(F_n(m)) \quad (7)$$

입력 음향신호 비트 스트림을 QAM방식으로 부호화하고 이것은 부반송파의 수만큼 병렬로 변환된다. 이 데이터들을 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 거쳐 시간영역으로 변환된다. 이때 각 데이터들은 적당한 부반송파 주파수 값을 갖게 되고, 변환된 데이터는 다시 직렬로 변환되어 송신된다. 수신부에서는 수신된 신호의 부반송파 수만큼 병렬로 변환 후 FFT(Fast Fourier Transform)처리 후 직렬로 변화하고 디코딩 하여 원 데이터를 복원하게 된다.

IV. 모의 실험

본 장에서는 전력선 채널 특성에 OFDM을 적

용하여 음향 신호를 입력신호로 한 모의실험을

수행하고, 그 결과를 분석하였다. 모의 실험에 이용된 전력선 채널은 II장에서 검토한 다중 경로 반사 지연 전력선 채널 특성을 이용하였다. 6개의 다중 경로를 가지며 노이즈 성분을 포함하는 것으로 주파수범위는 DC~20MHz까지 이다. 채널 특성에는 다중 경로를 고려한 전력선 채널, 분석의 편리성을 위해 AWGN형태의 배경 잡음만을 고려하였으며, 채널의 전달 함수 특성은 완벽히 추정되었다고 가정하였다. 음향 송신 신호에 대한 음향 수신 신호의 잡음 특성을 실험하고, 그에 따른 파라미터를 표 3에 정리하였다. 그림 4는 전체적인 전력선 OFDM 시스템의 블록도이다.

표 3. 모의 실험에 사용된 파라미터
Table 3. Used parameters of the model of the simulation

주파수 대역폭	DC~20MHz
부반송파	256
부반송파 간격	78.125kHz
OFDM 실제 심벌 구간	12.8μs
Cyclic Prefix	20% 샘플
OFDM Symbol	1 × 256 carriers
변조방식	M진 QAM

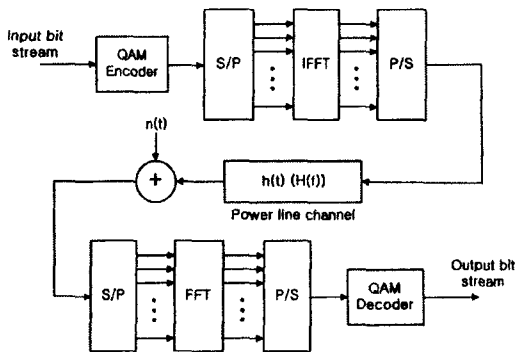


그림 4. 전력선 OFDM 시스템
Fig 4. Powerline OFDM System

그림 5는 디지털 통신의 성능 평가 요소인 신호 대 잡음 전력비(E_b/N_0)와 에러율(BER)을 2, 4, 8, 16, , 32, 64, 128, 256-QAM 변조에서의 비트 할당에 따른 성능을 보여 주고 있다. 결과를 보면 BPSK, QPSK, 8-QAM의 낮은 비트 할당이 에러율이 낮은 결과를 보여 주는 것으로 확인할 수 있다.

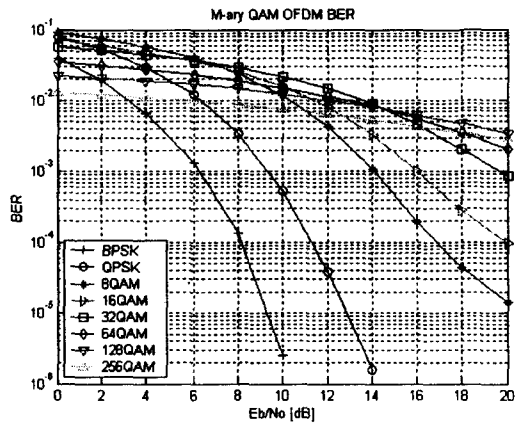
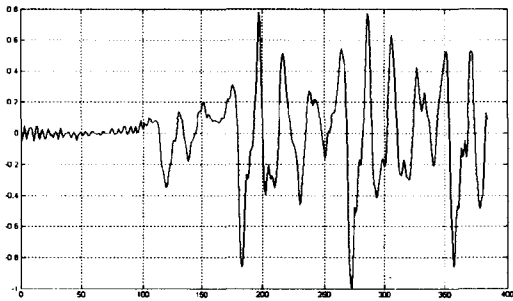
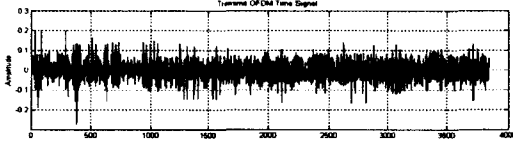


그림 5. M진-QAM OFDM 변조의 성능
Fig 5. Performance of M-ary QAM OFDM Modulation

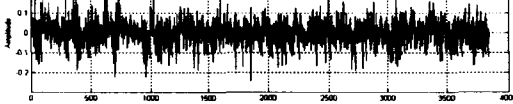
그림 6은 전력선 채널을 통과하는 음향 신호의 OFDM 송·수신 신호로 보호구간이 존재하는 형태이며, 각 심볼당 전송 비트수를 2, 4, 16, 64, 256-QAM으로 부호화하여 OFDM 변조한 입·출력 신호를 보였다. BER 성능 비교에서 확인할 수 있었듯이 BPSK, QPSK 변조가 64-QAM과 256-QAM에 비하여 에러가 적은 우수한 전송 패턴을 보여 준다.



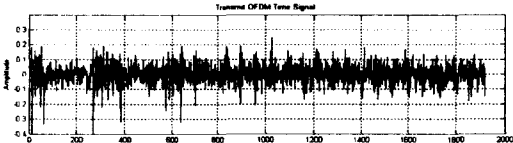
(a) 원 데이터



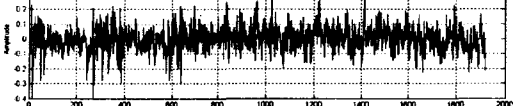
(b) BPSK



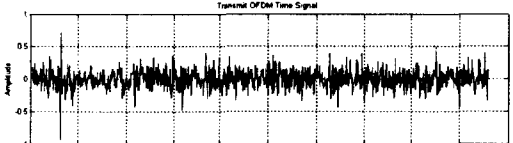
(c) QPSK



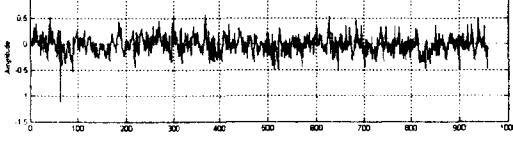
(d) 16-QAM



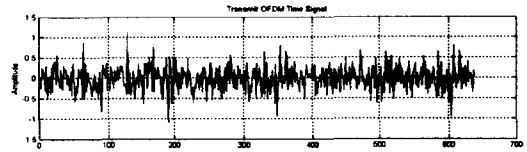
(e) 64-QAM



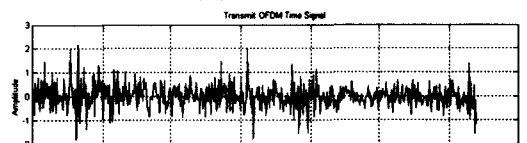
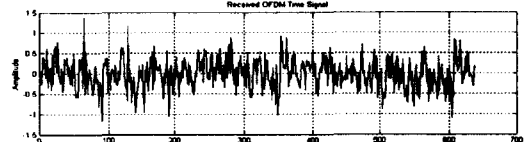
(f) 256-QAM



(g) 256-QAM



(h) 64-QAM



(j) 256-QAM

그림 6. 채널 입출력 OFDM 음향 신호
 (a) 원 데이터 (b) BPSK (c) QPSK (d) 16-QAM (e) 64-QAM (f) 256-QAM
 Fig 6. Acoustic Signal of Channel Input/Output OFDM
 (a) Original Data (b) BPSK (c) QPSK (d) 16-QAM (e) 64-QAM (f) 256-QAM

V. 결론

본 논문에서는 전력 공급이 목적인 전력선을 통신 선로로 이용하고자 하는 필요성과 기술적 가능성을 살펴보았고, 전력선의 전달함수에 대한 모델링을 하여 음향신호를 변·복조 하는 모의 실험을 하였다. 채널 특성으로는 무선 채널

환경과 유사한 지연과 감쇠, 주파수 선택적 페이딩이 존재하는 것을 확인하였다. 이를 극복하기 위한 강건한 변조 방식으로 OFDM 변조의 기본 이론을 알아보았고, 이를 전력선통신에서 사용될 주파수 대역에서의 지연과 감쇠, 위상 지연 등을 파악하고자 채널에 적용하여 전송 특성을 살펴보았다. 이는 모델링된 전력선에 음향 데이터를 변조하고 복조하여 그 비트의 에러 정도를 확인하고자 변복조의 신호와 M진-QAM별 OFDM 변조의 BER 성능 평가 실험을 하였다.

전력선 채널에 강인한 변조 비트 할당은 BPSK와 같은 낮은 비트 할당이 전력선 채널 잡음에 적용 가능한 것으로 확인되었다.

향후 연구 과제로는 다중 경로 채널 특성으로 인한 주파수 선택적 페이딩 및 잡음 환경에 적합한 적응적 비트 할당 변조 방법과 보상 기법 및 등화 방법, 주파수 영역에서의 채널 추정 방법 등에 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. K. Dostert, "Powerline Communications", Prentice Hall, 2001, pp.229~269
2. M. Zimmermann, K. Dostert, "A MultiPath Model for the Powerline Channel", *IEEE Trans. Communications*, Vol. 50 No. 4, April, 2002, pp.553~559.
3. H. Philipps, "Modeling of Powerline Communication Channels", in *Proc. ISPLC 1999*, pp.14~21, 1999.
4. S. Nomura, T. Nishiyama, M. Itami, K. Itoh, "A Study on Adaptive Carrier Modulation and Transmission Power Control Scheme for OFDM", in *Proc. ISPLC 2002*, pp.130~134, 2002.
5. 조용수 역, "무선 멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초", 대영사, 2000, pp.55~100
6. J. G. Proakis, M. Salehi, "Contemporary Communication Systems using MATLAB", Books/Cole, 2000, pp.286~339.

OFDM Modulation Transmission Characteristic of Acoustic Signal on Power Line Channel

Yoon-Seok Heo*

Abstract

This paper is about power line communication(PLC) over the low power voltage grid. The main advantage with power line communication is the use of an existing infrastructure.

The PLC channel can be modeled as having multi-path propagation with frequency-selective fading, typical power lines exhibit signal attenuation increasing with length and frequency.

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a modulation technique where multiple low data rate carriers are combined by a transmitter to form a composite high data rate transmission. The performance in consideration of the multi-path(echoes) powerline scheme is analyzed and verified by computer simulation.

* Dept. of Electronic Eng., ChungCheong Colledge