

저압 전력선 통신 변조 기법 및 전력선 채널 특성

강덕하* · 허운석** · 조기형*** · 이대영****

요 약

본 연구는 저압 전력선에서의 데이터 통신에 적합한 변조 방식으로 주목받고 있는 다중 반송 변조의 일종인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)의 변조를 실험하고, 이들 데이터를 전달 할 매체인 전력선을 채널 모델링 하였다. 전력선은 각종 전자기기에 의해 분기 연결되어 지연 전파의 경우와 임펄스성 잡음원이 존재하는 것으로 알려져 있다. 반송 주파수와 전력선의 길이에 의해 주파수 선택적 페이딩이 발생함을 알 수 있다.

1. 서론

전력선 통신(power line communication: PLC)은 전기를 공급하고 있는 전력선을 이용하여 신호를 전송시키고 통신을 하는 것을 말하며, 차별화된 전송기술로 가입자 망 시장이나 홈 네트워크 시장에서 충분한 가치를 인식하고 있다. 전력선을 이용하면 모든 건물에는 이미 전력선이 설치되어 새로운 통신 회선의 설치가 필요하지 않는 경제성과 집안 어느 전원 콘센트에서도 고속 데이터 서비스를 받을 수 있는 편의성으로 경쟁력을 확보할 수 있다. 또한 무선통신에서는 매우 높은 주파수 신호를 사용하나 전력선을 이용한 통신에서는 수백 kHz에서 수십 MHz의 반송파를 사용하여 신호를 전송 할 수 있는 장점이 있다.

그러나 전력선은 주파수가 60Hz인 전력의 공

급을 목적으로 하기 때문에 주파수가 낮아 선로의 특성 임피던스나 감쇄상수, 위상상수 등 선로의 전파상수와 같은 선로정수가 규정되어 있지 않다. 부분적으로 선로정수가 같지 않은 선로를 사용하기 때문에 높은 주파수 신호를 전송하고자 하는 경우는 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 감쇄가 발생한다. 또한 선로상수가 불규칙적으로 변동하게 되어 주파수에 대한 선택적 페이딩이 발생하게 된다. 그리고 각종 전기·전자 기기로부터 발생하는 불요 전자파가 전력선에 유입되어 잡음 특성을 갖게 된다.[1,2,5]

그러므로 전력선을 이용한 통신에서는 이러한 장애를 극복할 수 있는 통신 방법이 요구, 즉 잡음에 대한 영향이 적고 협대역으로 이웃간의 간섭이 적으며 다른 기기에 대한 고주파의 영향을 최소화 할 수 있는 통신방식 기술이 요구된

* 충북대학교 정보통신공학과
** 충청대학 전자공학과 조교수
*** 충북대학교 정보통신공학과 교수
**** 경희대학교 전자정보학부 교수

다. 그러나 불행히도 PLC에 적합한 다양하게 제공되는 변조기법이나 표준이 없다. 다음의 변조 기법들이 고려되고 있다.[1]

1. Spread Spectrum modulation
2. Single Carrier modulation
3. Multi Carrier modulation

하지만 대역 확산방식을 기반으로 한 전력선 통신 시스템의 가장 큰 문제점은 전력선의 제한된 대역폭이다. 대역 확산 시스템의 잡음 및 간섭에 대한 강인성은 확산 후 데이터의 대역폭과 원 데이터의 대역폭 사이의 비율인 처리이득 (processing gain)에 의해 결정되며, 전력선과 같이 대역폭이 한정되어 있는 경우 충분한 확산이 불가능하여 일정 기준이상의 처리 이득을 얻기가 힘들어지게 되고, 따라서 잡음 및 간섭에 대하여 열악함을 보인다. 이러한 이유로 병렬 대역 확산기법 이중에서도 OFDM의 관심을 집중되었다.

<표 1>은 PLC에 적용될 수 있는 변조 기법의 중요 특성을 항목별 간략히 비교하였다.

PLC에 적합한 변조기법은 OFDM 변조라는 것이 결론이다.[1,2,5]

<표 1> PLC 변조 기법의 비교

<Table 1> Comparison of PLC modulation schemes

(++ excellent; + good; 0 fair; - bad; -- very bad)

| | Spectral efficiency [bits/s/Hz] | Max. data rate [Mbits/s] | Robust against channel distortion | Robust against impulsive noise |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Spread Spectrum | < 0.1 | ≈0.5 | - | 0 |
| Single Carrier | 1~2 | <1 | -- | + |
| Multi Carrier | 1~4 | ≈3 | + | 0 |
| OFDM | >>1 | >10 | ++ | 0 |

II. OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)

OFDM 전송방식의 기본 개념은 직렬로 입력되는 데이터 열을 N개의 병렬 데이터 열로 변환하여 각각 분리된 부반송파(sub-carrier)에 실어 전송함으로써 데이터 유효성을 높이는 기법이다. 이때 부반송파는 직교성을 유지할 수 있도록 적절히 선택되어야 한다. 이러한 직교성으로 인하여 각 부반송파는 스펙트럼 상에서 중첩이 허용된다. 또한 수신기에서는 간단한 신호처리 기법으로 부반송파를 분리해 낼 수 있다. 이로 인하여 하나의 반송파를 사용하여 데이터를 순차적으로 전송하는 경우보다 전송되는 심볼의 간격이 길어져 채널의 지연시간 영향과 임펄스 잡음의 영향을 덜 받게 된다.[1] 또한 연속된 심볼간의 간섭을 줄일 수 있어 다중 경로 채널에 대해 강하며 채널 등화의 복잡도를 줄일 수 있고 일반적인 주파수 분할방식에 비하여 스펙트럼의

효율을 높일 수 있다. 즉, 채널의 스펙트럼 효율을 극대화하기 위하여 부채널간 간섭이 발생하

지 않도록 부채널간 직교성을 유지하여 전송하는 점이 핵심적 사항이다.[4]

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

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

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

$$\psi_{n,k}(t) = g_k(t - nT_s) \quad (2)$$

이때 $g_k(t)$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있으며

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t}, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$\{f_k\}$ 는 다음 조건을 만족하는 부반송파의 주파수 집합이다.

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

또한 n 번째 OFDM 심볼에서의 신호를 $F_n(t)$ 라 표시하면 다음과 같다.

$$F_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \psi_{n,k}(t) \quad (5)$$

식(5)를 식(1)에 대입하면

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n(t) \quad (6)$$

한편 요소신호 $\psi_{n,k}(t)$ 는 직교성이 유지되어야 하므로 다음의 관계가 성립된다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{n,k}(t) \cdot \psi_{n',k'}(t) dt = \begin{cases} 0, & \text{for } n \neq n' \text{ or } k \neq k' \\ \int_{-\infty}^{\infty} \|\psi_{n,k}(t)\|^2 dt = T_s, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

일반적인 통신 시스템에서와 같이 OFDM의 개념적 측면에서는 매우 많은 이상적인 변복조 블록이 필요 하지만 이와 같은 블록의 필요 없이 이산푸리에변환 방법(Discrete Fourier Transform)으로 이를 대신한다.[1,4]

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

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \psi_{n,k}(t) \Big|_{t=(n+m/N)T_s}, \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

즉,

$$\begin{aligned} F_n(m) &= \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot \psi_{n,k}(t) \Big|_{t=(n+\frac{m}{N})T_s} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})(n+\frac{m}{N})T_s} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})(n+\frac{m}{N})T_s} \\ F_n(m) &= \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi(f_0 + \frac{k}{T_s})\frac{m}{N}T_s} \\ &= e^{j2\pi f_0 T_s \frac{m}{N}} \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서 $f_0=0$ 이므로 식(9)은

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} \quad (10)$$

과 같으며, 결과적으로 식(10)는 역이산푸리에 변환의 정의식과 같아서 다음과 같은 식을 얻는다.

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} = N \cdot \text{IDFT}(C_{n,k}) \quad (11)$$

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

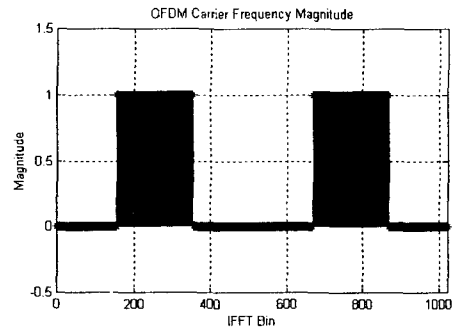
OFDM의 전송방식은 송신측에서 전송 데이터 열 $C_{n,k}$ 에 대하여 IDFT한 신호를 전송하면 수신측에서는 식(12)과 같이 수신신호에 대하여 DFT함으로써 원래 전송신호 $C_{n,k}$ 를 얻을 수 있다.

$$C_{n,k} = \frac{1}{N} \text{DFT}(F_n(m)) \quad (12)$$

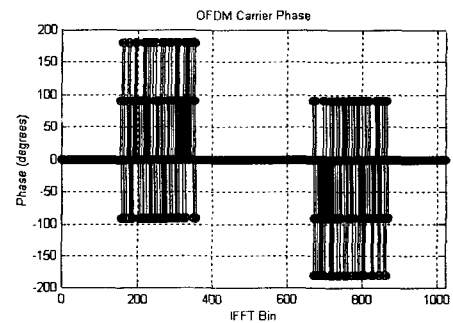
이들 식을 가지고 OFDM의 변조 및 전송부분을 모의실험 하여 보았다. 심볼당 비트는 2bits로 하였고, 베이스밴드 변조 방식은 DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)를 사용하였으며, 캐리어의 수는 50개를 사용하였고, 캐리어당 50개의 심볼을 실었다.

(그림 1)은 IDFT 이전의 캐리어 진폭을 보인 것으로 수열의 요소간에 복소 대칭성이 있게 한 것은 다음 단계에서의 IDFT 처리하여 신호가 실수 값을 갖도록 하기 위함이다.[4] (그림 2)에서는 이들 신호의 위상 분포를 확인하는 그림으로 0, 90, 180, 270의 위상 분포를 보여 준다. 그림 3은 1 심볼 주기에 대한 OFDM의

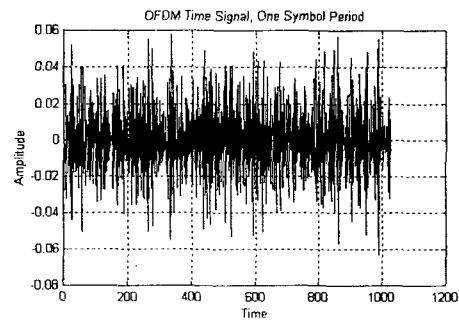
신호 파형을 보였다.[1,3,4]



(그림 1) IDFT 수행전의 OFDM 캐리어 진폭
(Fig. 1) OFDM carrier magnitude prior to IDFT



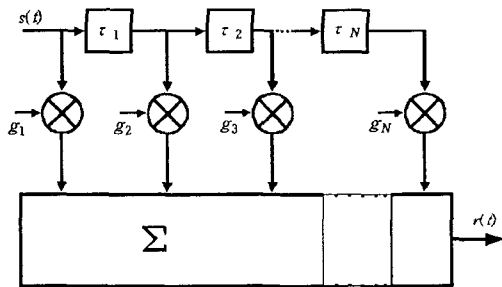
(그림 2) IDFT 수행전의 OFDM 캐리어의 위상
(Fig. 2) OFDM carrier phase prior to IDFT



(그림 3) OFDM 신호 파형 (1 심볼 주기)
(Fig. 3) OFDM signal (1 symbol period)

III. 전력선 채널 모델링

전력선 네트워크는 꼬임선, 동축 케이블, 광 케이블 등과 같은 기존 통신 매체의 구성, 구조와 물리적 특성과는 달리 고려하여야 한다. 그러므로 전력선 채널의 열악한 특성을 고려한 특별한 통신 시스템을 요구한다. 적절한 통신시스템의 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(echos)도 고려되어야 한다. 이는 주파수 선택적 페이딩을 가지는 다중 경로 신호 전파이다. (그림 4)는 본 연구에서 고려하는 일시지연 기반 전달함수(echo-based transfer function) 모델이다.[1]



(그림 4) 일시지연 모델 정의를 위한 기본 구조
(Fig. 4) Basic structure for the echo-model definition

다중 경로 전파와 주파수와 길이에 의존하는 감쇄를 고려한 일반화된 전달함수는 식(13)과 같다.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0+a_1 f^k)d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (13)$$

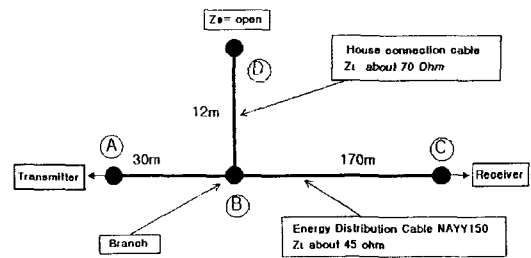
<표 2>는 식(13)에서 사용한 파라미터에 대한 설명이다.

<표 2> 전달함수의 모델 파라미터

<Table 2> Parameter of the model of the transfer function

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

식(13)은 세 부분의 요소 항이 존재함을 알 수 있다. 전력선 길이와 사용 주파수 의존 항인 지연 감쇄 요소항 (g_i)와 사용 전력선의 종류에 따른 C, R, L, G 로 구성되는 감쇄 계수의 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 5) 샘플 네트워크 체계
(Fig. 5) Topology of the sample network

(그림 5)는 샘플 네트워크의 체계를 보여 주고 있다. 이는 모의 실험에서도 사용하는 구성 체계이다. ㉠단이 신호 송신부이고, ㉢단은 수신

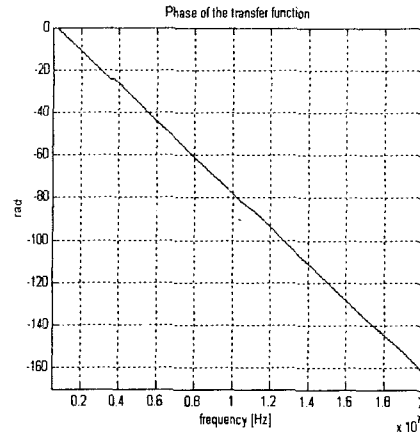
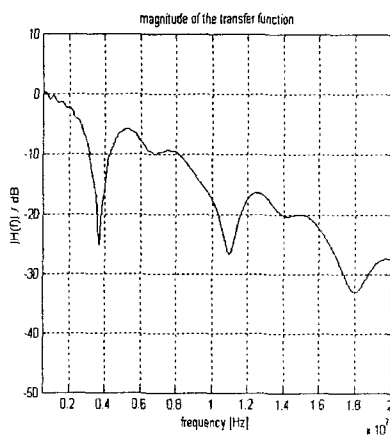
부이며, ㉑지점에서 분기가 일어났다. ㉒와 ㉓의 특성 임피던스는 매칭 된 것으로 가정하며, ㉔점은 반사 계수가 $r=1$ 로 오픈 상태를 유지하게 하였다.[2]

(그림 6)은 $N=6$ 의 경로를 가지는 식 13에 근거한 전력선 채널 모델의 주파수와 위상의 전달 특성을 모의 실험한 결과이다. 전력선 통신에 사용하는 주파수 범위를 표준화가 진행되고 있는 500kHz에서 20MHz에서 행하였다. 모의 실험에 사용한 샘플 선로의 파라미터는 표 3에 정리하였다. 이는 사용 모델의 모든 실질적인 효과를 포함하는 요소들이다.

<표 3> 샘플 네트워크의 모델 파라미터

<Table 3> Parameter of the 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 | -0.1 5 | 0.08 | -0.0 3 | -0.0 2 |
| $k=1$ | $a_0 = -2.1E-3$ | | $a_1 = 8.1E(-10)$ | | $\tau_i = 6.67E(-9)$ | |



(그림 6) $N=6$ 경로를 가지는 샘플 네트워크의 모의실험

(Fig. 6) Simulation of the sample network with $N=6$ paths

IV. 결론

본 논문에서는 전력 공급이 목적인 전력선에 통신의 기능을 부여하는 기술의 필요성과 당위성 등을 살펴보고, 대상인 전력선 통신 채널의 전달 함수는 왜곡과 감쇄 등이 심한 채널로 알려져 있다. 이를 극복하는 강건한 변조 방식으로 사용될 다중 반송 방식인 OFDM 변조의 특성을 알아보았다. 많은 협대역 부반송파 채널로 구성된 OFDM 변조는 각 신호의 직교성 유지가 가장 핵심적 사항으로 전력선에서의 고속 통신(10Mbps)을 위한 변조 신호를 크기와 위상, 1 심볼에 대한 OFDM 신호의 파형 등을 모의 실험 하였다.

또한 전력선 채널의 특성을 파악하기 위해 통신에서 사용될 주파수 대역에서의 지연과 감쇄, 위상 지연 등을 파악하는 일시 지연 기반 네트

위크 모델을 분석하여 이를 사용 주파수 대역에서의 페이딩과 위상 반응을 살펴보았다.

계속적인 연구방향은 본 실험을 바탕으로 변조 신호를 채널에 입력하여 복조된 출력 신호와의 차이를 확인하는 연구와 전력선 채널에 더욱 적합한 변조 기법의 연구를 진행 하고자 한다.

참고 문헌

- [1] K. Dostert, "Powerline Communications", Prentice Hall, 2001.
- [2] M. Zimmermann, K. Dostert, "A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range", Proceedings of 3rd International Symposium on Power-Line Communications and its Applications, pp45~51, 1999.
- [3] E. Lawrey, "The Suitability of OFDM as a modulation technique for wireless Telecommunications, with a CDMA Comparison", BSEE Thesis, James Cook Univ., 1997.
- [4] 조용수, "무선 멀티미디어 통신을 위한 OFDM 기초", 대영사, 2000.
- [5] 신요안, "전력선 통신 시스템에 멀티코드 CDMA 방식의 적용 방안에 관한 연구", 기초전력공학공동연구소, 1999.

A Study on the Low Power Line Modulation and Power Line Channel Modeling

Duk-Ha, Kang* · Yoon-Seok, Heo** · Ki-Hyung, Cho* · Dae-Young, Lee***

Abstract

This thesis is about power line communication(PLC) over the low 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.

To implement the multiple carrier scheme using a bank of parallel modulators would not be very efficient in analog hardware. Each carrier in an OFDM is a sinusoid with a frequency that is an integer multiple of a base or fundamental sinusoid frequency. Therefore, each carrier is a like a Fourier series component of the composite signal. In fact, it will be shown later that an OFDM signal is created in the frequency domain, and then transformed into the time domain via the Discrete Fourier Transform(DFT).

* Dept. of Computer and communication Eng., ChungBuk Nat'l Univ.

** Dept. of Electronic Eng., ChungCheong Colledge

*** Colledge of Electronic Information, KyungHee Univ.