

## OFDM 방식을 이용한 전력선 통신 시스템에 관한 연구

노성호\*, 이동욱, 안도량  
동국대학교 전기공학과

## Power Line Application using OFDM Technique

Sung-Ho Noh\*, Dong-Wook Lee, Do-Rang Ahn  
Dept. of Electrical Engineering, Dongguk Univ.

**Abstract** - Power line communications is a topic which has been studied for many years. However, the technology has not been widely adopted for data networking in homes and small businesses due to low speed, low functionality, and other barriers. Recently, with a proper technology, it is shown that the power line infrastructure can also be served as a high-speed communications medium.

This paper describes a transmission scheme for power lines that is based on orthogonal frequency division multiplex(OFDM) technique. This technique can be used for high-speed data communication over the power line. This paper also presents an adaptive tracking algorithm which allocate bits and power adaptively according to the channel characteristics. The performance of the proposed scheme has been demonstrated by some simulations with taking modeled channel conditions into account.

## 1. 서 론

전력선 통신 시스템이란 상용의 교류 전력선을 이용하여 데이터 통신을 하는 시스템을 말한다. 전력선 통신은 전력선에 고주파의 통신 신호를 커플링하여 신호를 전송하는 방식으로, 전력선의 특징은 기존의 통신 채널과는 달리 매우 열악한 환경을 가지고 있다는 것이다. 이와 같은 열악한 통신 채널 환경을 극복하고 통신을 가능하게 하기 위해서는 기존 통신 방식을 그대로 적용하는 것은 거의 불가능하며, 전력선 채널에 대한 대안기술이 요구된다. 따라서 효과적인 전력선 통신 시스템을 개발하기 위해서는 가장 근본이 되는 전력선 채널에 대한 매우 다양하고 실험적인 고찰이 반드시 필요하다고 하겠다.

전력선을 이용한 통신은 전원선의 임피던스, 신호의 감쇠, 잡음 발생 등에 의해 크게 영향을 받는다. 이와 같은 제약들을 해결하는 방법으로 협대역 방식의 FSK, QPSK 등의 변조 방법과 광대역 주파수 확산 통신 방법을 많이 사용한다. 특히 광대역 확산 방식은 전력선 채널이 주파수 선택적인 페이딩 특성을 가지기 때문에 주로 이용된다. 이러한 광대역 확산 방법에는 직접 순차 변조, 주파수 호핑, 주파수 처프 방법 등이 있다.

본 논문에서는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex)[1] 방식을 전력선에 적용하여 통신 성능을 평가하였다. 열악한 통신 채널 환경을 극복하기 위하여, 전력선 채널의 잡음, 감쇠 특성 등을 효과적으로 분석하여 전력선 통신의 성능을 향상시키는 방법을 소개한다. 기존의 적용적 OFDM[2] 무선 통신방식을 전력선에 응용하여 기존의 통신기법들과 성능을 비교 분석함으로써, 제시한 전력선 통신 기법의 가능성을 보인다.

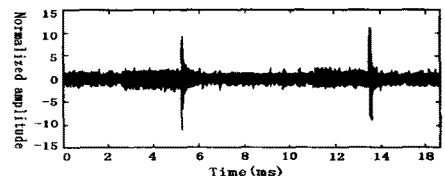
## 2. 채널 모델

## 2.1 채널 특성

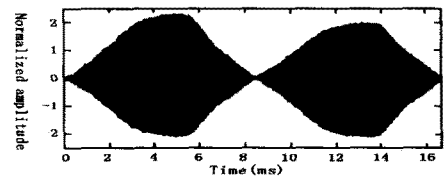
통신 채널로서 전력선은 반드시 고려해야 할 특별한 특징들이 있다. 이러한 특징들은 잡음, 임피던스 변화, 다경로 영향 등으로써 설명될 수 있다. 먼저 잡음원은 전력선에 연결된 각종 전기장치가 되며 잡음원에 의해 발생된 잡음은 60Hz 전원의 고조파 성분과 많은 상관관계를 갖게 된다. 또한 전력선에는 다양한 전기장치들이 연결되어 있기 때문에 채널의 임피던스가 일정하지 않게 된다. 따라서 송신기가 일정한 레벨로 신호를 출력하는 데 있어서 제약을 줄뿐만 아니라 송신 신호의 감쇠의 원인이 된다. 마지막으로 전력선은 RF 채널과 같이 주파수 선택적인 페이딩(fading)과 심별간의 간섭을 야기하는 다경로 영향을 가지고 있다. 이러한 현상들은 시간, 주파수, 소켓의 위치에 따라 변하는 특징이 있다.

## 2.2 잡음 모델

전력선에 있는 잡음은 Stationary AWGN으로 간주될 수 없기 때문에, 본 논문에서는 잡음 모델로서 Cyclostationary Process[3]를 이용하였다. 즉, 잡음을 세 범주(cyclic continuous noise, cyclic impulsive noise, time invariant continuous noise)의 합으로 나타내었다. 이 중에서 처음 두 성분이 더 지배적인 영향을 나타내며, 이들은 Cyclostationary Gaussian으로 모델링하였으며, 다른 하나의 성분은 stationary Gaussian으로 모델링하였다. 실측 자료[3]에 의하면, 잡음이 주기적인 성향을 가지고 있다는 것을 보여주며 특히,  $2f_{AC}$ 의 주기성 잡음으로 구성된다는 것을 보여준다.



(a) Noise waveform emitted by a television



(b) Noise waveform emitted by an induction heater

그림 1 전기장치에서 방출된 잡음의 예

그림 1은 실측한 잡음 파형의 예로서 그 크기는 시간 평균전력이 1이 되도록 일반화하였다. 이와 같은 실측 사실로부터 간단한 잡음 모델을 제시하였다. 먼저,

Cyclic impulsive noise에 대해서 나타내면, 식 (1)과 같다.

$$n(t) = A \sin(2\pi ft) e^{-bt} \quad (1)$$

여기에서,  $A = 100 \text{ volt}$ ,  $f = 120 \text{ kHz}$ ,  $b = 1.5 \times 10^{-5}$ 이며, 식 (1)과 같은 파형이 120Hz마다 반복적으로 일어난다. Cyclic continuous noise는 instantaneous variance  $v(t)$ 가 식 (2)로 나타나는 time variant Gaussian process로 모델링하였다.

$$v(t) = C(1 + \gamma |\sin 2\pi f_{AC}(t - \delta)|^n) \quad (2)$$

여기에서,

$\gamma$ : cyclic continuous noise와 time invariant continuous noise의 전력비

$\delta$ : cyclic continuous noise와 AC의 상대적인 위상 차이를 나타내는 상수

C: 잡음의 시간 평균 전력의 1이 되게 하기 위한 비례 상수. 즉,

$$\frac{1}{T_{AC}} \int_0^{T_{AC}} v(t) dt = 1 \quad (3)$$

n: 실험적으로 결정되는 값으로 잡음 전력의 집중도를 나타낸다.

또한, Time invariant continuous noise는 일반적인 AWGN으로 모델링하였다.

### 2.3 신호감쇠 및 지연 모델

라인 감쇠, 분로 감쇠, 부하로 인한 손실, 연결 손실, 다경로 영향 등을 고려하면 시간과 주파수에 따라 선형적으로 감쇠가 일어난다. 그림 2는 임의의 소켓 쌍을 대상으로 실측한 감쇠 결과의 한 예(4)로써 전력선 채널의 전송 방정식을 주파수에 관해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 신호 감쇠 레벨은 가변적이며 또한 예측할 수 없는 랜덤성을 가지고 있다. 하지만 본 논문은 변조방식을 적응적 비트할당의 관점에서 다루기 때문에 각각의 서브채널 이득계평균  $E(|H_n|^2)$ 이 1이라는 가정을 통해 신호감쇠 모델을 세웠다.

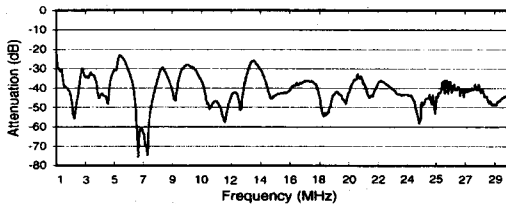


그림 2 채널 전송 방정식의 예

또한, 전력선에서는 다경로 지연으로 인하여 심벌간의 간섭이 일어난다. 다경로 지연 특성으로 인해 야기되는 심벌간의 간섭을 모델링하는 방법은 FIR 필터를 통해 하나의 방사된 신호가 direct path 신호보다 3dB 작다는 것으로 하였다.

## 3. OFDM 변조방식

### 3.1 OFDM 변조방식

OFDM의 송신 신호는 그림 3에서 보는 바와 같이 다수의 디지털 변조파를 더한 것과 같다. OFDM에 의한 데이터의 전송은 전송 심볼을 단위로 하고 있으며 각 전송 심볼은 유효 심볼 구간과 가드 인터벌 구간으로 구성된다. 가드 인터벌은 다경로의 영향을 줄이기 위한 역할을 한다. OFDM의 변·복조는 이산 푸리에 변환을 이용하여 모든 반송파에 대해 일괄적으로 처리할 수 있기 때문에 개별 반송파 각각에 대한 변·복조기를 설계할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다.

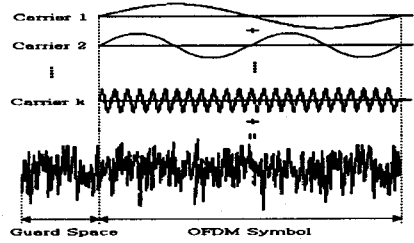


그림 3 OFDM의 신호파형

### 3.2 적응적 비트 할당

만약 송신기가 채널의 전달 함수를 알고 있다면, Information theory of the water pouring interpretation은 각각의 서브채널에 최적의 비트와 전력 레벨을 할당함으로써 그 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 전력선 채널은 시변이라는 특성을 가지고 있기 때문에 비트 할당과 전력 레벨이 채널의 전달함수에 따라 변해야 한다. 일단 새로운 채널의 전달함수가 추정되면 비트와 전력 레벨의 할당은 Optimal Solution으로 풀 수 있다. 즉, 이러한 Optimal Solution을 구하기 위해서 정해진 전송율과 비트에러율에 대한 최소의 전송 전력을 얻을 수 있는 목표함수를 세워야 한다. 여러 계수들과 Optimization Problem을 나타내면 아래와 같다.

N: 서브채널의 총수

M: 심벌당 할당할 수 있는 최대의 비트수

Hn: n번째 서브채널 이득

bn: n번째 서브채널에 할당된 비트수

Rb: OFDM 심벌 당 총 비트수

BER: 정해진 비트에러율

$f(b_n)$ : n번째 서브채널에서  $b_n$ 비트를 비트에러율

BER을 만족하면서 전송하기 위해 필요한 수신전력

$$\min_{b_n \in D} \sum_{n=1}^N \frac{f(b_n)}{H_n^2} \quad (4)$$

$$\text{subject to } \sum_{n=1}^N b_n = R_b \quad (5)$$

$\{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ 이 새로운 서브채널의 이득이라고 하고  $\{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ 이 이전의 비트 할당이라고 하면, Greedy Approach는 n과 1로 나타낸 식 (6)을 만족하는  $\{n, 1\}$ 쌍을 찾아 n 서브채널의 한 비트를 1 서브채널로 이동하는 것이다.

$$\frac{f(b_n) - f(b_n - 1)}{H_n^2} > \frac{f(b_l + 1) - f(b_l)}{H_l^2} \quad (6)$$

수렴성을 보이기 위해서  $f(b_n)$ 을 convex 함수로 제한할 필요가 있다. MQAM과 MPSK를 포함하는 일반적인 변조방식은  $f(0) = 0$ ,  $b_n$ 이 증가함에 따라 단조증가함으로 convex 함수 조건을 만족한다. 따라서 초기 조건에 관계없이 항상 Optimal Solution을 얻을 수 있다.

## 4. 모의실험 방법 및 결과

채널의 주파수 선택적인 페이딩을 극복하기 위해 적응적 OFDM 변조방식을 채택하였다. 사용한 변조방식에 대한 시스템의 블록도는 그림 5로 나타내었으며, 모의실험을 위한 OFDM 시스템 계수들은 표 1로 나타내었다. OFDM의 중요한 장점은 심벌간의 간섭을 줄일 수 있게 하며, 각각의 서브채널에서 일어나는 페이딩을 flat 페이딩이라고 가정할 수 있게 한다. 즉, 이러한 가정으로

부터 각각의 서브채널 이득을 스킵라 값으로 간단히 할 수 있다.

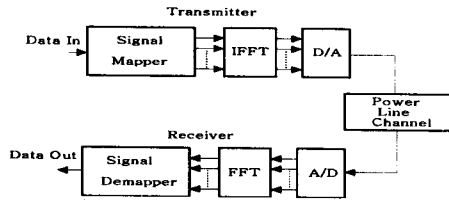


그림 4 OFDM의 블록도

표 1 OFDM 시스템 인자

Parameter	Value
Carrier Modulation used	(2,4,8,16)-ary DPSK
FFT size	64
Number of Carrier	30
Guard time	16(25%) samples

이 장에서는 적용한 잡음 모델 중 cyclic impulsive noise는 인터리버를 갖는 길잡부호기 등을 통해 영향을 줄일 수 있기 때문에 이 잡음의 영향은 제외하였으며 cyclic continuous noise와 time invariant continuous noise의 합을 통해 적응적 비트 할당 방식과 비 적응적 비트 할당 방식을 비교한다. 채택한 변조방식은 그레이 코드를 사용한 M-ary DPSK로 0부터 4비트까지의 정보를 포함한다. 정해진 BER  $P_b$ 를 만족하면서 b bits/symbol을 보내기 위하여 필요한 M-ary PSK의 수신 전력  $f(b)$ 는 식 (7)과 같이 근사화 될 수 있다.

$$f(b) = \frac{N_0}{2} \left[ Q^{-1} \left( \frac{P_b}{2} \right) \right]^2 / \sin^2 \frac{\pi}{2b} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (8)$$

또한, PSK와 DPSK의 관계를 고려하여 DPSK의  $f(b)$ 를 도출할 수 있다. 본 논문에서 적용한 cyclic continuous noise와 time invariant continuous noise의 합에 관하여 SNR을 구하면 다음과 같다.

$$SNR(k) = \frac{PT_s}{\int_{(k-1)T_s}^{kT_s} v(t+\delta) dt} \quad (9)$$

SNR은 식 (9)에서 알 수 있듯이 구간에 따라 다른 값을 갖는다. 따라서 시간평균 SNR을 구할 필요가 있다. 잡음 모델을 세울 때 잡음 전력의 시간 평균값은 1이라고 가정하였기 때문에 시간평균 SNR은 시간평균 신호전력과 같다. 또한 OFDM에서 비트당 평균 송신 전력은 OFDM 심벌의 전체 전송 전력과 심벌이 포함하는 총 비트수의 비이다. 따라서 평균 비트당 SNR은 비트당 평균 송신 전력과 같다고 할 수 있다. 이렇게 구한 평균 비트당 SNR을 매개로 하여 결과를 나타내었다.

모의실험에서는 비적용적 OFDM과 적응적 OFDM을 비교하였다. 비적용적 OFDM인 경우, 30개의 서브채널에 모두 QPSK ( $b_n=2, 1 \leq n \leq 30$ )의 변조방식을 사용하였으며 적응적 OFDM인 경우, 30개의 서브채널에 비트 수가 총 60비트가 되는 greedy approach의 비트 할당을 통한 변조방식을 사용하였다. 그림 6에서 알 수 있듯이 방식에 따라 약 8dB의 차이가 나는 것을 알 수 있다.

그림 7로부터 delay spread가 약 16샘플 보다 작을 때는 거의 BER에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 즉, 적응·비적용적 방식에 관계없이 견딜 수 있는 delay spread는 cyclic extension의 구간과 같음을 나타낸다. guard 구간 보다 긴 delay spread에 대해서는 BER이 급속히 상승함을 알 수 있다. 이것은 심벌간의

간섭에 의한 영향으로 해석할 수 있다. 실제적인 시스템에서 가드 구간의 길이는 다경로 지연 특성에 따라 가변적으로 조정할 수 있다.

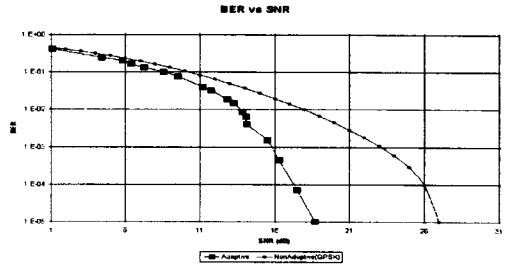


그림 5 Adaptive, Nonadaptive의 결과비교

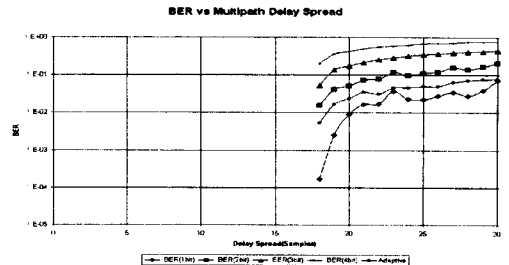


그림 6 다경로 지연에 대한 Tolerance

#### 4. 결론

본 논문에서는 전력선을 매체로 하여 고속의 데이터를 전송하는 통신기법을 소개하였다. 열악한 통신 채널 환경을 극복하기 위하여, 전력선 채널의 잡음, 감쇠 특성 등을 효과적으로 분석하여 전력선통신의 성능을 향상시켰다. 채널의 특성과악을 위하여 간단한 수학적 모델링을 사용하여 잡음 모델과, 채널 감쇠 모델을 설정하였으며, 모의실험을 통해 고려한 채널 특성에서 적응적 OFDM 통신기법의 성능을 평가하였다.

본 연구는 동국대학교 밀리미터와 신기술 연구센터를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다.

#### [참고 문헌]

- [1] L. J. Cimini, Jr. and N. R. Sollenberger, "OFDM with diversity and coding for high-bit-rate mobile data applications", IEEE J. Select. Areas Commun., V. 16, pp. 1367-1375, Oct. 1998.
- [2] Wong CY, Cheng RS, Ben Letaief K, and Murch RD, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation", IEEE J. Select. Areas Commun., V.17 N.10, 1747-1758, 1999.
- [3] Niwa H, Oono O, Katayama M, Yamazato T, Ogawa A, and Isaka N, "A Spread-Spectrum System with Dual Processing Gains Designed for Cyclic Noise in Power Line Communications", IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications & Computer Sciences, V. E80-A N.12, 1997.
- [4] O'Neal(J.B. Jr.), "The residential power circuit as a communication medium", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol CE-36, N.3, pp. 567-577, 1986.