

최대비 합성법을 이용한 SISO/MIMO-OFDM 기반 전력선 통신 방식 구현 및 성능분석

준회원 유정화*, 종신회원 최상호**

Implementation and Performance Analysis of PLC Scheme based on SISO/MIMO-OFDM using MRC

Jeong-hwa Yoo* Associate Member, Sangho Choe** Lifelong Member

요약

본 논문은 스마트 그리드를 비롯한 각종 미래 전력망 내 고속 데이터 전송을 타깃으로 한 SISO/MIMO-OFDM 기반 전력선통신 (PLC: power line communication) 방식의 구현 및 성능분석에 목적이 있다. 전력선통신 환경은 유선임에도 무선과 같은 다중경로 페이딩, 임펄스 잡음 등 매우 열악한 채널 특성을 갖는다. 다중경로 전력선 페이딩 채널은 Zimmermann 주파수 모델을 이용하며 임펄스 잡음 채널은 Middleton class A 모델을 이용한다. 본 논문에서는 주파수 선택적 다중경로 페이딩 특성을 갖는 전력선 채널 조건하에 공간 다이버시티 이득을 부가한 공간주파수 부호화 SISO/MIMO-OFDM 방식을 고려한다. 특별히 다중 안테나 경로와 다중 경로 페이딩의 다이버시티 이득을 효과적으로 결합한 최대비 합성 방식인 a&f-MRC를 이용한 기존 삼상 혹은 단상 PLC 시스템의 성능 개선 방안을 제시한다. 시뮬레이션을 통해 기존의 SISO/MIMO-OFDM 방식에 비한 성능우위를 입증하며 등비 합성법, 선택적 합성법과의 복잡도 대비 성능 비교로 시스템 설계상의 트레이드오프를 또한 제시한다. 임펄스 잡음지수 등 실제 PLC 채널 조건하에 체계적인 성능분석 및 시뮬레이션을 통해 적정 시스템 설계 파라미터를 도출한다.

Key Words : Power line communication (PLC), MIMO, SISO, OFDM, maximum ratio combining (MRC)

ABSTRACT

In this paper, we propose the implementation and performance analysis of power line communication based on SISO/MIMO-OFDM which focuses on high speed data transmission in smart grid and future power line grid. We employ Zimmerman frequency model and Middleton Class A model as the multipath power line fading channel and impulse noise channel, respectively. In this paper, in order to improve the three-phase or single-phase PLC performance, we introduce a new MRC (called a&f-MRC) which effectively sums up multiple antenna diversity gain and multipath fading diversity gain. Via simulation, we prove the performance advantage over existing SISO/MIMO systems. In addition, we offer the tradeoff on system design through comparing with MRC, EGC and SC.

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0010130).

* 가톨릭대학교 일반대학원 정보통신전자공학과 석사과정 무선통신 연구실 (mundade@hanmail.net)

** 가톨릭대학교 정보통신전자공학과 (schoe@catholic.ac.kr)

논문번호: KICS2010-10-506, 접수일자: 2010년 10월 22일, 최종논문접수일자: 2011년 1월 18일

I. 서론

스마트 그리드 (Smart Grid)란 전력선 망에 정보기술 (IT)을 접목하여 전력공급자, 전력시장 및 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 에너지 효율을 최적화가 가능한 차세대 전력선망이다. 이를 위해 전력망 내 각종 고속 데이터 전송 서비스가 요구됨에 따라 전력선 통신 (PLC : Power Line Communication)에 대한 관심도 점차 증가하고 있다. PLC는 기존 전력선을 그대로 이용하므로 셀룰러, WiFi 등 이동통신과는 달리 스마트 그리드 내 추가적인 인프라 설비비용이 요구되지 않으며, 일반 댁내 전원 콘센트에 연결만으로 손쉽게 이용 가능 등 여러 장점을 갖는다. 일반적으로 전력전송은 60Hz의 저주파 대역을 사용하므로 PLC 데이터전송은 고주파 대역 (2~25MHz)을 사용한다. 하지만 전력케이블은 전력공급용 선로로 전송채널 내에 다중경로 페이딩, 임펄스 잡음 등이 발생되어 매우 열악하다. 본 논문에서는 다중경로 전력선 페이딩 채널로는 Zimmermann 주파수 모델^[1]을 이용하여 임펄스 잡음 채널로는 Middleton class A 모델^[2]을 이용한다.

최근 PLC 채널의 단점을 보완하고 전송 성능 및 용량 개선을 위해 무선채널에서 널리 활용되는 안테나 공간 다이버시티 기법을 적용하는 여러 연구가 시도되고 있다. 이 경우 주로 3상 4선식 선로에서 이루어지는데 이들 전력선을 적절히 연결하여 형성된 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 안테나 채널^[1]을 이용 한다^[3]. 여기에는 I_x, J (I_x : 송신안테나 수, J : 수신안테나 수) 공간 채널 상에 최적가중치 벡터를 곱하여 성능을 개선하는 다중 안테나 경로 최대비 합성법 (Multiple Antenna Path Maximum Ratio Combining : a-MRC) 방안, LDPC (Low Density Parity Check)과 같은 고급 채널 코딩 방식을 사용하는 방안^[4] 등이 있다. 최근 심볼 간 간섭 (Intersymbol Interference : ISI)에 강인하고, FFT (Fast Fourier Transform)를 이용 광대역 전송이 가능한 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술 위에 MIMO 기술을 접목한 MIMO-OFDM 기반 PLC 방안^[5]에 대한 연구가 활발하다.

본 논문에서는 기존의 a-MRC 기법에 다중경로 페이딩 MRC (Multi-path Fading MRC: f-MRC)를 결

합한 다중안테나 및 다중경로 페이딩 최대비 합성법 (Multiple Antenna and Multipath Fading MRC : a&f-MRC)을 제안하고 이를 삼상 전력선 채널에 적용하여 기존의 MIMO-OFDM 시스템 성능을 개선시킨다. 더욱이 제안한 방식은 옥외 3상 4선식 전력선을 이용한 MIMO PLC 시스템 뿐 아니라 단일 안테나 경로 (1x1)를 갖는 옥내 단상 전력선을 이용한 SISO (Single Input Single Output) PLC 시스템 하에서도 f-MRC의 이용으로 성능을 향상시키는 장점을 갖는다. 이는 전력망의 종단간의 전력선을 이용한 통신 (End-to-End PLC)은 물론 댁내 PLC 통신 응용 (홈 네트워크, 원격 검침 등)에서 기존 PLC 시스템 성능을 개선시킬 수 있다는 점에서 의미가 있다고 볼 수 있다.

a&f-MRC 수신 기법을 사용 시 다중경로 페이딩 채널에 대한 이상적인 채널 추정을 가정하고 있다. 이는 실제 전력선 페이딩 채널은 셀룰러의 무선 페이딩 채널과는 달리 간단한 측정 (프리앰블 이용 등)만으로 다중 경로 파라미터 추정이 용이하다는 점에 근거한다^[1]. 다중 안테나 채널 외에 다중 페이딩 채널의 각 경로상의 신호크기에 비례하는 가중치 벡터를 곱해주는 a&f-MRC 수신 기법을 사용할 경우 기존방식에 비해 개선된 성능을 갖는다. 단, 다중 페이딩 경로의 개수 L 만큼 수신기 개수가 늘어나 시스템 복잡도가 증가하게 된다. 본 논문에서는 각종 채널 조건하에 SISO/MIMO-OFDM의 종합적인 성능 분석을 실시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 a&f-MRC 수신 기법을 사용 시 기존의 a-MRC 방식에 비해 비트 오류 확률 (Bit Error Rate : BER) 성능 면에서 우수함을 검증한다. 특별히 임펄스 잡음 채널의 임펄스 잡음 지수에 따른 BER 성능의 비교로 적절한 시스템 파라미터 값을 추출한다.

이하 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장 본문에서는 먼저 MIMO-OFDM 기반 PLC 시스템 개요에 대한 설명을 하고, 다음으로 다중경로 페이딩 및 임펄스 잡음 등의 PLC 채널 특성과 함께 제안한 수신 기법인 f-MRC 및 a&f-MRC 기법에 대하여 설명한다. III장에서는 각종 채널 조건하에 성능 분석과 제안된 시스템에 대한 컴퓨터 모의 실험한 결과를 보여주고, 마지막으로 IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 본론

2.1 MIMO-OFDM 기반 PLC 시스템

본 논문에서는 I (송신안테나수)x J (수신안테나수)

1) 여기서 '안테나 채널'이란 무선의 MIMO와 같은 실제 안테나 채널이 아닌 이를 모의 유선 (전력선) MIMO를 형성하는 전력선 연결상 경로를 가리킨다.

MIMO 전송 채널에 OFDM 송수신방식을 결합한 MIMO-OFDM 시스템을 설계한다.

OFDM은 기본적으로 직교주파수 분할 다중으로 사용대역을 N 개의 직교화 된 부반송파로 분할한 후 하나의 정보데이터를 다중화 하여 전송하는 방법이다. OFDM은 ISI를 갖는 다중경로 페이딩 환경 하에서 상대적으로 우수한 성능을 갖는다. OFDM 송신기는 아래 식 (1)과 같이 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)를 이용하여 구현된다.

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) e^{j2\pi nk/N}, \quad (n=0,1,\dots,N-1) \quad (1)$$

여기서 k 는 주파수 인덱스, n 은 시간 인덱스를 가리킨다. $S(k)$ 는 k 번째 부반송파 변조신호로 여기서는 QPSK를 가정하며, $s(n)$ 은 IFFT 연산 후 시간 축의 n 번째 샘플을 가리킨다.

무선통신에서 MIMO는 송신 안테나 L 개 수신안테나 J 개 만 있으면 되지만 PLC에서는 전력선 케이블을 통해 통신하기 때문에 한정된 송신 안테나와 수신 안테나의 개수를 갖는다. 더욱이 전선이 하나뿐인 옥내 단상 전력선에서는 MIMO-OFDM 시스템의 사용이 제한된다. 그러므로 MIMO-OFDM은 3상4선인 옥외 전력선에서 주로 사용되며 단상인 옥내의 경우에는 SISO-OFDM을 주로 사용한다. 그림 1은 3상4선식 전력선을 이용하여 형성된 2x2 MIMO-OFDM PLC 시스템의 블록도를 보여주고 있다.

그림 2(a)에서는 3상 4선의 전력선 케이블 구조를 보여주며 그림 2(b)에서는 3상 4선식 전력선을 이용하여 구성된 2x2 MIMO 시스템을 보여준다. C_1 과 C_2 가 하나의 안테나 경로를 이루고, C_3 와 C_4 가 하나의 안테나 경로를 이루어 두 개의 안테나 경로를 사용한다. 이때 C_0 는 접지 역할을 하게 된다. MIMO 채널 상에는 주파수간 간섭이 발생할 수 있는데 이 간섭으로 인한 오류 확률을 줄여주기 위해 SF (Space Frequency) 부호기를 사용한다. 이 부호기를 통해 식

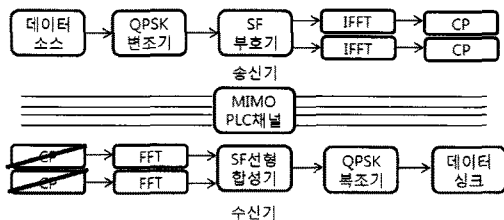
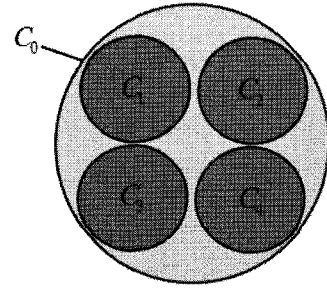
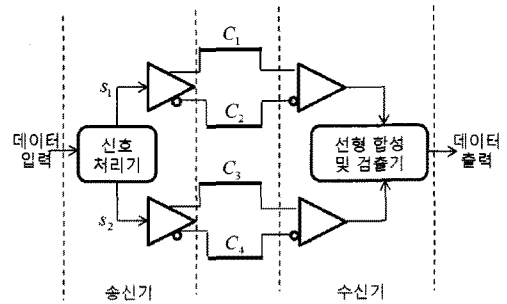


그림 1. 2x2 MIMO-OFDM PLC 시스템 블록도



(a)



(b)

그림 2. (a) 3상 4선의 전력선 내부 구조, (b) 3상 4선식 전력선을 이용한 2x2 MIMO 전송 과정

(2)와 같이 부반송파 신호의 순서를 적절히 바꿔주어 벡터 S_1, S_2 를 형성 한다⁶⁾.

$$\begin{aligned} S_1 &= [S_1(0), \dots, S_1(\frac{N}{2}-1), S_1(\frac{N}{2}), \dots, S_1(N-1)]^T \\ S_2 &= [S_2(\frac{N}{2}), \dots, S_2(N-1), S_2(0), \dots, S_2(\frac{N}{2}-1)]^T \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $S_1[k] = S_2[k], (k=0,1,\dots,N-1)$ 이며 X^T 는 벡터 X 의 전치를 가리킨다. S_1, S_2 는 IFFT 과정 (식 (1) 참조)을 통해 대응되는 시간 축 벡터 $s_1 = \text{IFFT}\{S_1\}$ 과 $s_2 = \text{IFFT}\{S_2\}$ 를 얻은 후 이들 벡터를 각 안테나 경로로 전송한다. 이러한 전송과정은 그림 2(b)의 신호처리기에서 이루어지며 대응되는 수신과정은 그림 2(b)의 선형합성 및 검출기에서 이루어지게 된다.

그림 1의 송신기 부분에서와 같이 페이딩 채널 지연으로 인한 ISI를 방지하기 위해 IFFT 과정을 통해 OFDM 부반송파에 실린 변조된 신호 샘플에 CP (Cyclic Prefix) 샘플을 추가하여 전송한다. 이렇게 부반송파에 실린 수신신호는 채널을 거쳐 수신기로 들어가고, 수신 신호는 추가된 CP 샘플을 제거한 후

FFT(Fast Fourier Transform) 복조과정을 통해 복호된 신호를 얻게 된다.

본 논문에서는 시스템 간단화를 고려 C_1, C_2 안테나 경로와 C_3, C_4 안테나 경로 간에 커플링이 발생하지 않음을 가정 한다^[3]. 이때 송신기에서 s_1 과 s_2 는 각각 C_1 과 C_3 에 변화 없이 원래의 값이 흘러가게 되고, C_2 와 C_4 에는 반전된 값이 흘러가게 된다. 수신기에서는 C_1 과 C_3 에서 들어온 값은 그대로 받아들이고, C_2 와 C_4 에서 들어온 값은 다시 반전하여 받아들이는다.

두 안테나 경로를 거쳐 수신된 각 신호는 그림 1에서 보여주듯이 FFT 후 선형 합성기를 이용해 두 신호는 합성되고 복조기를 통해 복호된 데이터를 얻는다. 본 논문에서는 다중 안테나 경로 외에 다중 페이딩 경로에 대한 MRC (a&f-MRC로 칭함)를 이용한 선형합성방안을 제안 한다 (상세 설명은 II.3절 참조).

2.2 전력선 통신 페이딩 채널 및 잡음 특성

전력선을 통한 통신은 전력선 망 토폴로지, 구조, 케이블 물리적 특성에 따라 달라진다. 이러한 특성을 감안하여 PLC 채널은 임펄스 잡음 등의 잡음채널 모델과 다중경로로 인한 감쇠, 지연 특성의 다중경로 페이딩 채널 모델로 구분한다. 다중경로 페이딩 채널의 경우 L 개의 신호 경로를 가정하였을 때 페이딩 채널 모델의 전달 함수는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_i(k) = \sum_{l=1}^L H_{i,l}(k) \quad (3)$$

$$H_{i,l}(k) = g_{i,l} \cdot e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot k^2) \cdot d_{i,l}} \cdot e^{-j2\pi k \cdot (d_{i,l}/v_p)}$$

여기서 $H_i(k)$ 는 i 번째 안테나 경로를 통한 k 번째 부반송파 채널함수로 식 (3)에서 보여주듯이 모든 다중 페이딩 경로의 전달함수 $H_{i,l}(k)$ 의 합으로 나타내진다. α_0, α_1, u 는 케이블 변수들이고, $d_{i,l}/v_p$ (여기서 $d_{i,l}$ 은 i 번째 안테나, l 번째 페이딩 경로의 길이를 나타냄)는 식 (4)에서 볼 수 있듯이 대응되는 경로의 지연 $\tau_{i,l}$ 에 해당한다. $|g_{i,l}| \leq 1$ 은 i 번째 안테나, l 번째의 페이딩 경로의 가중치이다.

$$\tau_{i,l} = \frac{d_{i,l} \cdot \sqrt{\epsilon_0}}{c_0} = \frac{d_{i,l}}{v_p} \quad (4)$$

식 (4)에서 ϵ_0 는 케이블의 비 절연체 유전상수이고, c_0 는 빛의 속도이다 (페이딩 경로상의 각 변수 지정의 예시는 III장 표 1 참조).

본 논문에서는 PLC의 주요 잡음인 바닥 잡음과 함께 임펄스 잡음을 고려하는 데 임펄스 잡음은 식 (5)의 Middleton's class A 모델을 사용 한다^[2].

$$p(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\alpha_m}{2\pi\sigma_m^2} e^{-\frac{|x|^2}{2\sigma_m^2}} \quad (5)$$

$$\text{여기서 } \alpha_m = e^{-A} \frac{A^m}{m!}$$

식 (5)에서 보여주듯이 class A 모델의 확률 밀도 함수 (pdf)는 포아송과 가우시안의 확률 밀도 함수의 곱으로 표현할 수 있다. 이때 가우시안의 분산인 σ_m^2 은 다음과 같이 정의되어 진다.

$$\sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{m/A + \tau}{1 + \tau} \quad (6)$$

식 (6)에서 m 은 채널의 상태를 나타내주는 변수로 $P(m) = \alpha_m$ 인 포아송 분포의 확률 특성을 갖으며, 각 잡음 샘플마다 독립적인 값을 갖게 된다. $\tau = \sigma_g^2/\sigma_i^2$ 으로 여기서 σ_g^2 는 백색 가우시안 잡음의 분산이고, σ_i^2 는 임펄스 잡음의 분산을 나타낸다. σ^2 은 Class A 잡음의 분산으로 백색 가우시안 잡음의 분산과 임펄스 잡음의 분산의 합으로 표현 (즉, $\sigma^2 = \sigma_g^2 + \sigma_i^2$)되며 이는 E_b (비트에너지)/ N_0 (잡음스펙트럼밀도)에서 N_0 값을 가리킨다. 임펄스 잡음은 포아송 분포의 평균 (혹은 분산)인 A 값에 따라 다른 특성을 갖는다.

식 (5)의 분포함수를 이용해 발생한 시간 축 잡음 신호 $n_i(n)$ 을 FFT한 후의 주파수 축 잡음 신호 $N_i(k)$ 는 다음 식과 같다.

$$N_i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} n_i(n) e^{-j2\pi nk/N}, (k=0,1,\dots,N-1) \quad (7)$$

식 (3)에서 보여주듯이 i 번째 안테나 경로의 페이딩 채널은 $H_i(k)$ 로 주파수 축 상에 표현 가능하므로 해석의 편리성을 위해 전송신호를 FFT한 후 얻어지는 k 번째 부반송파 신호 $S_i(k)$ 와 곱하여 주고 여기에 잡음 채널의 주파수 축 모델인 식 (7)의 $N_i(k)$ 를 더하여 주는 데 그 결과는 시간 축에서의 결과와 동일하다. 결과적으로 i 번째 안테나 경로에 k 번째 부반송파 수신신호 $Y_i(k)$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다^[3].

$$\begin{aligned}
 Y_i(k) &= \sqrt{\frac{E_s}{2}} H_i(k) S_i(k) + N_i(k) \\
 &= \sum_{l=1}^L Y_{i,l}(k) = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{E_s}{2}} H_{i,l}(k) S_i(k) + N_i(k)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서 E_s 는 송신기에서 사용가능한 평균 에너지를 나타낸다. 식 (8)에서 l 번째 다중페이딩 경로에서 k 번째 부반송파의 수신신호 $Y_{i,l}(k) = H_{i,l}(k) S_i(k) + N_i(k)$ 과 같이 표현된다. 여기부터는 간단한 표현을 위하여 주파수 인덱스 k 를 생략한다.

2.3 수신 기법

수신 단에서 신호를 합성하는 기법에는 대표적으로 MRC, EGC (Equal Gain Combining : 동이득 합성법), SC (Selection Combining : 선택적 합성법) 등이 있다. 이 세 가지 기법 중 MRC 수신 기법은 시간 지연, 위상 변위, 페이딩 진폭을 고려한 최적의 가중치를 도출하고 이를 이용 신호를 합성 및 검출함으로써 성능 면에서 여타 방식에 비해 가장 우수하다. 반면에 채널에 대한 정확한 정보를 필요로 하기 때문에 상대적으로 EGC, SC에 비해 높은 복잡도를 갖는다. 본 논문에서는 간단한 모의실험을 위해 모든 경로에 대한 이상적인 채널 추정을 가정한다.

기존의 다중 안테나 경로를 이용한 MRC 기법인 a-MRC 수신 기법은 L 개의 안테나 경로를 통해 전송된 신호들에 대해 수신 단에서 수신신호에 각 경로별 대응되는 채널합수의 켈레 복소수를 곱해준다. 그 결과 신호에서는 채널의 허수 부분이 사라지게 되고 실수 부분이 그 채널 크기만큼 다시 곱해짐으로 인해 채널 신호 크기에 따라 비트 오류 성능이 좌우됨을 알 수 있다. 즉 MRC에서는 채널의 크기의 비중이 커짐에 따라 신호 성능이 개선됨을 알 수 있다. 다음 식 (9)는 다중 안테나 경로를 이용한 기존의 a-MRC 수신기법을 보여준다.

$$\tilde{Y} = \sum_{i=1}^L Y_i H_i^* \tag{9}$$

여기서 Y_i 은 i 번째 안테나 경로 채널을 통과하여 수신된 (FFT 처리 후) 수신신호이고, H_i^* 는 식 (8)의 채널합수의 켈레 복소수를 나타낸다. L 는 전송 안테나 경로의 개수로 본 논문에서는 3상 4선식 전력선을 감안하여 $L=2$ 를 가정한다. 단, 안테나 경로 간 커플링 효과는 무시한다.

본 논문에서 제안한 a&f-MRC 수신 기법을 삼상

MIMO PLC 채널에 적용할 경우 수신되는 신호는 다음 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tilde{Y} = \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L Y_{i,l} H_{i,l}^* \tag{10}$$

여기서 $Y_{i,l}$ 은 i 번째 안테나, l 번째 다중페이딩 경로 채널을 통과하여 수신된 (FFT 처리 후) 수신신호를 나타낸다. L 은 페이딩 채널 경로의 개수이다. a&f-MRC는 기존의 a-MRC위에 각 안테나 채널에 발생하는 다중 페이딩 경로에 MRC기법을 적용한 f-MRC를 추가한 방식으로 기존 방식에 비해 성능을 개선시킨다. 더욱이 제안한 수신 기법은 MIMO는 물론 SISO 시스템에 적용으로 기존 방식보다 성능을 개선시켜 준다. 단, 식 (10)과 같은 f-MRC의 추가는 수신 단에 수신기 개수를 L 배 증가시켜 주어 복잡도가 높아진다.

다시 말해 기존 방식의 경우 옥내 단상 SISO 채널에서는 별도의 MRC를 이용한 성능개선방안이 없는데 반해 제안방식에서는 다중페이딩 경로에 대한 MRC 방식인 f-MRC (식 (10)에서 $I=1$ 인 경우) 기법을 적용함으로써 시스템 성능개선이 가능하여진다.

III. 실험 결과

본 장에서는 II장에서 언급한 각종 전력선채널특성과 잡음을 나타내는 채널조건하에 제안한 시스템 모델을 모의실험을 실시하며, 기존방식과 비트 오류 확률 (Bit Error Rate : BER) 성능을 비교 한다.

본 모의실험에서는 $L=6$ 개의 다중경로 페이딩을 갖는 전력선 채널을 가정하며 각 페이딩 경로별 채널 파라미터를 표 1에서 보여주고 있다⁶⁾. 모의실험에서는 간단화를 위해 두 개의 안테나 경로에 페이딩 채널 파라미터 값은 동일함을 가정²⁾한다.

표 1. 전력선 다중 페이딩 경로 채널 파라미터

감쇄 파라미터					
$u=1$	$\alpha_0=0$	$\alpha_1=7.8 \cdot 10^{-10} \text{ s/m}$			
다중 경로 파라미터					
경로번호 l	g_l	$d_l(m)$	경로번호 l	g_l	$d_l(m)$
1	0.760	200	4	0.098	272
2	0.369	224	5	-0.050	296
3	-0.189	248	6	0.026	320

2) 3상4선식 PLC 채널의 경우 안테나 경로간 채널 파라미터의 변화는 실제로도 거의 무시할 수 있는 정도이다⁷⁾.

모의 실험시 SISO/MIMO-OFDM에서 MRC 수신 방식 성능 비교에 초점을 맞추고 실험 시간을 줄여주기 위해 채널부호기는 생략한다. 본 실험을 위해 사용된 SISO/MIMO-OFDM 시스템 실험 파라미터들은 표 2와 같다. 본 논문에서는 $N=1024$ 를 가정한다.

그림 3은 잡음 중 임펄스 잡음 변수 중 하나인 A 값에 따른 BER을 비교하고 있다. 본 실험에서는 $\tau=0.1$ 로 두고 A 의 값의 변경에 따른 BER 결과를 보여주고 있다.

A 값은 임펄스 잡음지수로 A 값이 클수록 가우시안 잡음과 유사한 특성을 가지며 작을수록 임펄스 잡음의 특성을 가지게 된다. 그 결과 그림 3에서 특정 E_b/N_0 값 (약 $27dB$) 이상의 경우 A 값이 커짐에 따라 BER이 감소함을 알 수 있다. 예를 들어 10^{-5} 비트 오류율 기준으로 $A=10$ 의 경우 $A=1$ 에 비해서는 약 $1dB$, $A=0.3$ 에 비해서는 약 $4dB$, $A=0.1$ 에 비해서는 약 $5.5dB$ 성능이득이 얻어짐을 확인할 수 있다. 하지만 신호 대 잡음비 (E_b/N_0)가 특정 값 (약 $27dB$) 이하인 경우, A 값이 클수록 오히려 BER이 증가함을 관찰 할 수 있게 되는데 이는 큰 A 값으로 인해 변위가 큰 노이즈가 신호 대 잡음비의 효과를 상쇄시키기 때문이다. 실제적인 PLC 채널 환경을 감안 시 포아송 분포의 기대치 A 는 0.001에서 0.35 정도가 적정하며, 본 장의 이하 실험 결과에서는 실험 시간을 고려 A 는 0.3을 가정한다⁸⁾.

II장 1절에서 설명한 것과 같이 옥외의 3상 4선 전력선을 이용한 PLC 구현을 가정 시 전력케이블 내부 전선이 4개이므로 전선 2개를 한 쌍으로 하여 2x2 MIMO 시스템을 구현할 수 있다³⁾. 그림 4는 이렇게 구현된 2x2 MIMO 시스템과 단상 전력선 사용을 가정한 SISO 시스템의 BER을 비교하여 보여주고 있다.

표 2. 모의 실험 파라미터

파라미터	값
변조 방식	QPSK
전송 방식	OFDM
부 반송파 개수	1024 개
FFT 크기	1024
CP 크기	120
중심 주파수	25MHz
대역폭	1MHz
Δf	약 1KHz
안테나 개수 (MIMO 경우)	2x2
τ	0.1

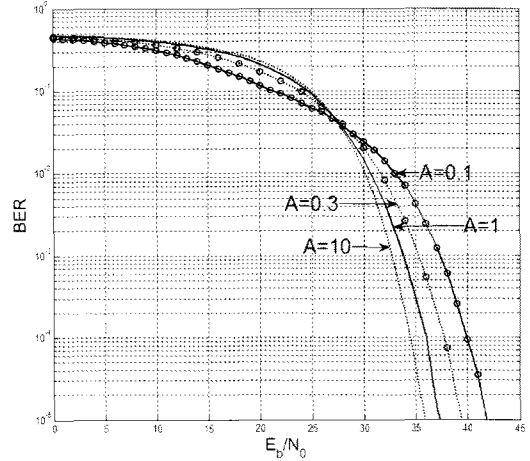


그림 3. A 값에 따른 BER 비교

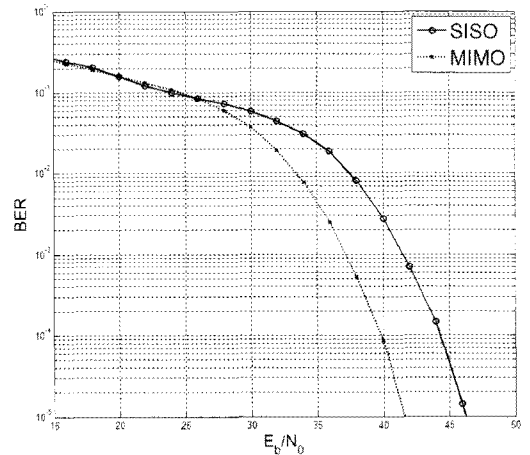


그림 4. PLC 채널 하에 MIMO와 SISO 성능 비교 ($A=0.3$ 가정)

BER 10^{-5} 를 기준 시 MIMO 시스템의 성능이득이 SISO에 비해 약 $4.5dB$ 임을 알 수 있다.

PLC에서 a-MRC 수신 기법을 사용하는 기존 방식의 경우 서로 다른 공간 안테나 경로 상에 적정 가중치를 곱하여 줌으로써 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 다중 안테나 경로 다이버시티를 이용한 a-MRC와 다중 페이딩 경로 다이버시티를 이용한 f-MRC의 하이브리드 방식인 a&f-MRC를 새로이 제안하고 이를 기존 방식과 성능 비교한다. f-MRC 수신 기법은 페이딩 채널을 통한 시간 지연, 위상, 페이딩 진폭을 고려한 최적의 가중치 값을 추정하고 이를 이용하여 주파수 선택적 다중 페이딩 경로 상의 최적 합성 방안을 도출하여 줌으로써 성능을 개선시켜준다. 본 실험에서는 PLC 페이딩 채널에 대해 이상적인 채널

널 추정을 가정하는 데 무선 페이딩 채널과는 달리 간단한 측정 (오버헤드 사용)만으로 채널 파라미터 추정이 가능하다는 점에서 실제적이다^[11].

그림 5에서는 SISO 및 MIMO에 있어 기존 a-MRC 방식을 사용한 경우와 제안 a&f-MRC 방식을 사용한 경우에 성능을 비교하고 있다. 우선 MIMO의 경우를 비교하면, 제안한 수신방식인 a&f-MRC가 기존의 수신방식인 a-MRC에 비해 10^{-5} BER 기준으로 약 2dB 정도의 성능이득이 있음을 알 수 있다. 한편 제안한 a&f-MRC 방식의 경우 기존의 방식에 비해 다중페이딩 경로의 수 L 에 비례하여 복잡도가 증가하게 된다.

그림 5에서는 또한 SISO 방식에 대해 기존의 방식 (MRC 미사용)과 제안한 방식 (f-MRC 사용)의 성능을 비교하고 있는데, 제안한 방식이 10^{-5} BER 기준으로 약 2dB의 성능이득이 있음을 보여준다. 이는 곧 다중 안테나를 사용할 수 없는 중단간의 SISO PLC (End-to-End SISO PLC) 혹은 대내 SISO PLC (홈 네트워크, 원격 검침 등) 옥내 단상 전력선 통신 응용에서 제안 방식이 보다 효과적임을 알 수 있다.

그림 6은 MIMO 시스템에서 제안한 최대비 합성법(a&f-MRC)을 사용한 경우와 등비합성법 (a&f-EGC), 선택적합성법 (a&f-SC)을 사용한 경우의 실험결과를 상호 비교하고 있다. a&f-EGC나 a&f-SC의 경우 a&f-MRC에 비해 복잡도는 줄여주는 반면에 성능이득 (10^{-5} BER 기준으로 약 2dB)을 떨어뜨리는 것을 관찰할 수 있다. 가중치의 평균을 곱해주는 a&f-EGC와 가장 큰 가중치를 선택해 곱해주는 a&f-SC을 비교 시 BER 성능이 유사한데 이는 곧 공간 경로 상에서

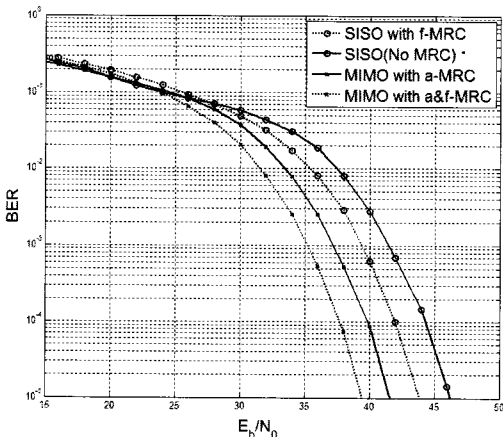


그림 5. MRC 수신 기법 사용에 따른 SISO/MIMO-OFDM BER 성능 비교 ($A=0.3$ 가정)

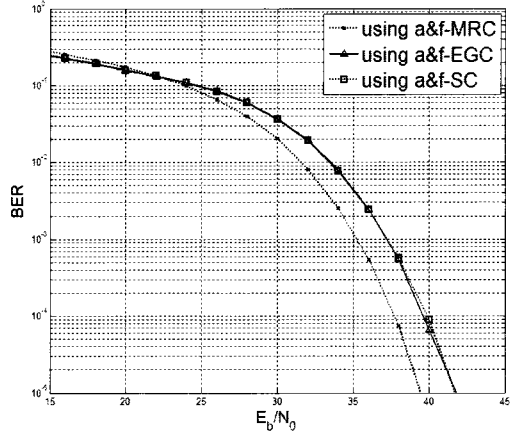


그림 6. MIMO-OFDM의 경우 a&f-MRC, a&f-EGC, a&f-SC BER 성능 비교 ($A=0.3$ 가정)

의 채널특성의 차이가 없기 때문이다^[7].

IV. 결론

본 논문에서는 MRC를 이용한 SISO/MIMO-OFDM 기반 PLC 시스템 개선방안을 제안한다. 기존에 다중 안테나 MRC 기법 (a-MRC)에 다중 경로 페이딩 MRC (f-MRC)를 하이브리드한 a&f-MRC 수신 기법을 사용함으로써 BER 성능이 개선됨을 보여주었다. SISO의 경우에도 성능 우수성을 관찰 할 수 있었는데 이는 삼상 PLC는 물론 단상 PLC의 경우에도 제안한 방식이 효과적임을 보여준다. 임펄스 잡음 및 페이딩 채널 하에 제안한 MIMO 방식의 이용으로 기존의 방식에 비해 10^{-5} BER 기준으로 약 2dB 정도의 성능이득이 있음을 보여주었다.

향후 안테나 링크 상호간 커플링이 있는 MIMO-OFDM 기반 PLC 고속통신에 대한 연구를 계속 진행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 50, No. 4, pp. 553-559, April 2002
- [2] J. Haring and A.J. H. Vinck, "Coding for impulsive noise channels," in *Proc. IEEE ISPLC 2001*, pp.103-108, February 2001
- [3] C. L. Giovaneli, B. Honary, and P. G. Farrell, "Space-frequency coded OFDM system for

multi-wire power line communications,” in *Proc. IEEE ISPLC 2005*, pp.191-195, April 2005

- [4] N. Andreadou and F.-N. Pavlidou, “Mitigation of impulsive noise effect on the PLC channel with QC-LDPC codes as the outer coding scheme,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 25, No.3, pp.1440-1449, July 2010
- [5] L. Hao, and J. Guo, “A MIMO-OFDM scheme over coupled multi-conductor power-line communication channel,” in *Proc. IEEE ISPLC 2007*, pp.198-203, March 2007
- [6] B. Adebisi, S. Ali, and B. Honary, “Space-frequency and Space-Time-Frequency M3FSK for indoor multiwire communications,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.24, No. 4, pp.2361-2367, October 2009
- [7] R. Hashmat, P. Pagani, and T. Chonavel, “MIMO communications for inhome PLC networks: measurements and results up to 100 MHz,” in *Proc. IEEE ISPLC 2010*, pp.120-124, March 2010
- [8] S. W. Lai and G. G. Messier, “The wireless/power-line diversity channel,” in *Proc. IEEE ICC 2010*, pp.1-5, July 2010

유정화 (Jeong-hwa Yoo)

준회원



2010년 2월 가톨릭대학교 정보통신공학과 학사
 2010년 3월~현재 가톨릭대학교 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> OFDM 시스템, 전력선 통신

최상호 (Sangho Choe)

중신회원



2001년 5월 Texas A&M Univ 박사
 2003년 3월~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 부교수
 <관심분야> MIMO-OFDM, Cognitive Radio, 전력선 통신