

전력선 통신에 적합한 모뎀의 설계 및 성능평가

안병록, 송준호, 이해기, 이춘모
(주)우신전기기술사사무소, (주)선엔지니어링, 충청대학

Design and Performance Analysis Of the Modem for the Adaptive communication in the power line

Byung-Rok Ahn, Joon-Ho Song, Hea-Ki Lee, Chan-Mo Lee
Woo Shin Electric Eng., Seon Eng., Chung Cheong College

Abstract

In recent years, data transmission using power lines has been much highlighted. Power line is known to be cost-effective communication medium because the entire cable infrastructure has been already established and it is entirely connected with any home. Recently, the target of researches is to communicate data reliably over power lines at the speed of at least 1Mbits/s over the frequency range from 1MHz to 10MHz.

OFDM communication system has been used for the high speed data transmission.

Next, the conventional and adaptive OFDM systems for high speed data transmission over power line channel are investigated. The performance of AOFDM(adaptive OFDM) over the frequency selective channel with impulsive and narrow-band noise are studied to be a nice solution for high speed data transmission over power lines. The simulation results show that data the rates of the AOFDM are improved about 47% more than the ones of the conventional OFDM over the frequency response of case 4. In the results, the data rate has been much improved by the proposed adaptive algorithm in the frequency selective channel.

1. 서론

최근에 건물 내 또는 작은 범위 지역에서 통신을 위한 매체로서 전력선이 많은 관심을 받고 있다. 전력통신은 별도의 설치 없이 기존 전력선을 통신망으로 활용하여 다양한 고부가가치 통신서비스를 제공할 수 있다는 측면에서 차세대 통신망으로 각광받고 있는 기술이다. 전력선을 이용해 인터넷을 사용할 수 있는 개념으로 새로운 접속선의 설치가 불필요하고 기존의 서비스에 의해 비용이 저렴하며 콘센트만 있으면 통신이 가능하다는 점에서 사용자들의 접근이 용이한, 대안적인 통신망이다. 그러나 전력선 채널의 특징은 일반적인 통신 채널 환경보다 잡음의 강도 매우 높고 거리가 증가함에 따라 신호의 감쇄가 심하다. 또한 임피던스의 변화가 심하여 송신기와 수신기 사이에 최적의 송신 전력 조절이 어렵다. 2001년 3월 독일의 경우 기존 다른 주파수 이용자들에게 방해를 주지 않는 범위에서 고속데이터 전송이 이루어지도록 시행령을 통과시키고 7월부터 시행에 들어갔다. 미국도 가정내 전력선 통신 기술에 대해 제한적으로 허용하고 있으며, 일본 등 다른 국가에서도 법규개정을 추진하고 있다. 이에 대해 정통부도 고주파 대역 허용에 대해 신중한 입장을 취하고 있다. 이에 따라 최근에 고속의 데이터 통신 구현을 위해서 1MHz에서 30MHz의 대역을 사용하는 전력선 통신 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다.

고속의 데이터 통신 시스템을 위한 방식으로 다중 반송파를 이용하는 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 방법이 논의되고 있다. 다음으로 일반적인 OFDM에 채널의 변화에 따라 비트 할당을 달리하는 적응 OFDM(adaptive OFDM) 시스템에 대해 분석한다. 이 적응 알고리즘은 채널의 환경이 양호한 경우에는 고효율 성상도(constellation)를 이용하고, 채널의 환경이 열악한 경우에는 저효율 성상도를 이용하는 방법이다. 일반적으로 고조파 잡음이 전력이 증가할수록 적응 OFDM 통신 시스템의 성능이 저하된다. 또한 적응 OFDM 통신 시스템과 일반 OFDM 통신 시스템의 최대 전송량을 분석하여 동일한 BER과 SNR 조건에서 적응 OFDM 통신 시스템의 최대 전송량이 일반 OFDM 통신 시스템보다 증가함을 알 수 있다. 따라서, 적응 OFDM 통신 시스템은 여러 가지 전력선 채널 환경에서 BER, 전송량, 비트 할당에 따른 성능 분석을 하여, 일반 OFDM 통신 시스템보다 신뢰할 수 있는 데이터의 송수신이 가능할 뿐만 아니라 고속의 데이터 전송에도 적합한 방식임을 알 수 있다.

2. 전력선의 채널 환경과 통신기술

최근 전력선의 동향은 전력전자 소자의 광범위한 응용으로 복잡화, 첨단화, 자동화, 고정밀화 되고 있는 추세이다. 이러한 추세는 비선형부하(nonlinear load)의 지속적인 증가를 초래하고 있으며 1990년도에 이르러 부하 설비의 30%, 2000년 초에는 60%로 급격하게 증가될 것으로 보고 있다. 따라서, 전력 품질 <Power Quality>의 중요성은 더욱더 요구되어 지고 있는 실정이다. 전력 품질은 산업현장에서 제품의 생산품질에 크게 영향을 미치게 될 것이다. 임펄스 잡음(impulse noise), 고조파 잡음(harmonic noise), surge 등의 현상들이 매우 복잡하며 동시에 다발적으로 전력계통에서 발생하고, 잡음원으로 작용하여 자동화 설비 및 전원 안정화 장치에 영향을 주어 특성의 열화, 손상, 오동작, 소자파괴 및 기관손실 등을 일으켜 신뢰도가 저하되고 있으며, 시스템 다운 등으로 막대한 지장을 초래하고 있다.

2-1. 전력선 통신 기술의 현황

(1) 전력선 통신의 장·단점

전력선 통신은 별도의 설치 없이 기존 전력선을 통신망으로 활용하여 다양한 고부가가치 통신서비스를 제공할 수 있다는 측면에서 차세대 통신망으로 각광받고 있는 기술이다. 전력선을 이용해 인터넷을 사용할 수 있는 개념으로 새로운 접속선의 설치가 불필요하고 기존의 서비스에 의해 비용이 저렴하며 콘센트만 있으면 통신이 가능하다는 점에서 사용자들의 접근이 용이한, 대안적인 통신망이다. 그러나 전력선통신은 아직 해결되지 못한 난제들이 많은 기술이다. 전력선은 전력운반을 목적으로 하기 때문에 통신용으로 제작된 동축선이나 광섬유 링크와는 달리

제한된 전송전력, 높은 부하 간섭과 잡음, 가변하는 감쇄 및 임피던스 레벨 등의 문제를 안고 있다. 이는 전력선의 특성이 연결된 기기들에 의해 영향을 받고 반송파 주파수의 선택을 어렵게 하기 때문이다. 즉 이 기술이 상용화되어도 빌딩 내 근거리통신망 등을 한정적으로 잠식할 뿐 현재 수백만 회선이 깔려 있는 ADSL이나 케이블TV 등의 고속가입자망을 대체하기는 어려울 것이라는 예측이다. 국내에는 초고속통신망을 위한 인프라가 다른 나라에 비해 갈라져져 있는 편이고 ADSL이나 케이블 모뎀 등은 지금도 10Mbps 속도의 초고속인터넷서비스가 가능한데 전력통신은 현재 2Mbps 급의 기술이 나와 있을 뿐이며, 또한 전파 감쇄 현상 등의 문제점과 짧은 전송거리도 한계점이 된다. 다시 말하면, 전력통신의 기술의 핵심적인 문제는 흔히 잡음, 신호감쇠, 임피던스의 특성으로 압축된다. 즉 전력주파수와 연계되어 사용하기는 기기들 간에 상호 간섭현상으로 소음이 발생하는 문제점이 있고, 변압기 등 여러 구간을 거치면서 데이터가 손실될 수 있으며, 임피던스가 전기제품 등의 온, 오프 등으로 순간적으로 변하는 불안정성이 있는 것이다. 그리고 이를 해결하기 위해 출력을 낮추면 전송거리가 크게 짧아져 실용성이 떨어지게 된다. 그러나 이러한 서비스가 물리적인 특성상 확산되지 못하는 지역, 예를 들면 산간 벽지나 섬 등의 외지로 인터넷을 확산하는데 의미가 있다. 이러한 지역에서도 전력선은 모두 설치되어 있기 때문에 전력통신은 기존의 서비스의 소외 지역에서 통신망을 활용하는 데 효율성이 높은 방식이다.

(2) 전력선 통신에서 해결할 사항

잡음이 발생하는 주파수를 피해서 반송파 주파수를 배정하는 방식, 시간적으로 잡음이 없는 구간에 신호를 보내는 방식 등으로 기술을 개발하는 것이며, 시간과 위치에 따라 변화가 심해지는 신호 왜곡과 감쇄를 해결하고 각각의 신호가 서로에게 영향을 미치지 않도록 하는 필터를 개발하며, 전압이 커질수록 다른 기기에 대한 영향이 커져 신호 전송에 제한이 생기는 문제 등을 극복하는 일이 필요하다. 위치, 시간마다 신호가 달라지므로 통신거리나 여러 장애 요인에 따른 충분한 테스트 데이터를 확보하고 전력선통신의 시스템과 관련된 측정장치와 전력선통신용의 게이트웨이, 라우터 등을 지속적으로 개발하는 것도 전력통신이 기술적 난제를 해결하기 위해 중요하다. 현재 채널의 잡음의 영향을 피하기 위하여 모뎀에 대해 두 가지 방향으로 아이디어가 제안되고 있다. 그 중 하나는 신호를 넓은 대역에 분산 시켜서 수신단에서는 특정 주파수에 나타나는 잡음을 상대적으로 감소시킬 수 있게 하는 방식이고 다른 하나는 전체 주파수 대역에서 잡음이나 임피던스의 사용이 불가능한 대역이 존재할 때 그 대역을 피해서 신호를 전송하도록 사용 주파수 대역을 변화시키는 방식이다.

(3) 표준화 문제와 전파법 시행령

유럽과 미국에서는 PLC(Power Line Communication) 포럼이 형성되어 표준화 문제에 대한 논의가 진행되고 있는 데 비해 국내 업체들은 아직 이러한 움직임에 능동적으로 진행시키지 못하고 있는 형편이다. 또 하나의 문제로 주파수 규제라는 사항을 들 수 있다. 현재 전 세계적으로 전력통신을 이용할 수 있는 주파수 대역이 정해져 있는데 대체로 450kHz 이하이고 국내 전파법시행령은 9~450kHz 대역으로 정해놓고 있다. 그러나 초고속인터넷 등 대용량의 데이터를 전송하기 위해서는 수백kHz 에서 수십MHz 의 고주파 대역이 필요하다. 문제는 법개정이 용이하지 않고 많은 시간이 걸린다는 것이다.정보통신부는 경쟁력을 갖춘 새로운 전력선 통신 산업을 활성화하기 위해 전력선 통신용 주파수 대역을 확대하고 관련 제도를

개선하는 방안을 적극 추진기로 했다. 이는 최근 전력선 통신 관련 기술이 발달하면서 혼신 우려가 줄어들고 전력선 통신이 홈네트워킹 등 통신망을 구축하는데 경제성이 있는 것으로 밝혀지면서 세계 여러 나라가 제한된 주파수 대역을 점차 확대하고 있는 추세에 따른 것이다. 주파수 대역을 확대하기 앞서 방송 아마추어 설비에 영향이 미치지 않도록 전자파방사, 간섭 혼신 등 적절한 전력선 통신용 기술기준을 마련할 계획이다. 전력선 통신은 지금까지 우리나라를 포함한 대부분 나라가 방송 아마추어 무선 등에 따른 혼신을 우려해 주파수를 450kHz이하의 저주파 대역으로 엄격히 제한해 왔다. 그러나 독일이 2001년 3월 전력선 통신용으로 고주파대역을 허용하는 법령을 공포한데 이어, 일본도 2002년 6월께 법령을 개정하였다.

Table 2.1. Frequency band and output of power.

CENELEC (Europe)	주파수 대역: 9kHz ~ 148.5kHz 송출 레벨: 116dBμV(631mV)
JAPAN	주파수 대역: 450kHz 이하 출력: 10mW이하
North American Regulation	주파수 대역: 9kHz ~ 450kHz 송출 레벨: 110dBμV(316mV)
한 국	주파수 대역: 10kHz ~ 450kHz 출력: 10W이하

(2) 전력선 통신 응용분야

최근 정보처리 시장의 증대와 전력선통신의 경제적 효율성과 사용이 편리하여 다양한 분야에 응용이 가능하다. 인터넷 확산과 함께 가정용 PC의 보급은 두드러진 추세이고 복수의 컴퓨터를 연결시켜 줌으로써 인터넷을 공동으로 사용하며 프린터 및 파일을 공유하는 서비스의 필요성이 중요해지고 있고 전력선 통신은 이러한 홈네트워킹에 응용될 수 있다. 또한 디지털 가전제품들을 인터넷을 통해 통제할 수 있고 전기, 가스, 수도 등의 미터 자료를 자동으로 읽고 통제하는 원격 검침과 공장 자동화, 빌딩 내 근거리 통신망구축 등에도 전력선 통신은 유용하게 활용될 것으로 전망된다. 전력선 통신이 현 디지털 산업기반의 대안적인 통신망으로 급격히 부상하고 있다.

(5) 전력선 통신 기술동향

전력선 통신은 전송 속도에 따라 60bps~10Kbps의 저속 전력선 통신, 10Kbps~1Mbps 중속 전력선 통신 1Mbps~10Mbps 이상의 고속 전력선 통신 등 크게 3가지로 분류한다. 중저속 전력선 통신의 반송파 주파수는 주로 10kHz~450kHz 대역을, 고속 전력선 통신은 450kHz~30MHz 대역을 주로 이용하며, 주요 용도는 중저속의 경우 인터넷 정보가전을 포함한 방법, 방재 등의 홈네트워킹에 이용되며, 고속의 경우 인터넷 접속 망에 주로 이용된다. 전력선통신 기술 개발현황을 살펴보면 저속 전력선 통신 기술의 경우 외국에서는 이미 전력선통신 모뎀의 상용화를 하고 있는 미국의 X10(60bps)을 비롯해서 Echelon(1.8kbps), ITRAN, Intellon(9.6kbps), AlcaTel, Data-Link Group, Adaptive Network 등이 개발에 성공하였으며, 국내에서는 플래넷(360bps, 9.6kbps)이 유일하게 전력선통신 모뎀을 1998년도에 개발하여 상용화하고 있다.

Table. 2.2. A power line communication system

회사명 구분	X10	CEBus	Lonworks	I2256
통신속도	60Kbps	1Mbps	2Kbps- 1.25Mbps	9.6Kbps
변조방식	ASK (120KHz)	SS	DSSS	SS
제어기기수	256	64	32,258	65,536
통신방식	단방향	양방향	양방향	양방향
MAC	-	CSMA/CDCR	LonTalk (CSMA/CA)	CSMA/CDCR

전력선의 채널 특성을 살펴보면 고주파대역의 잡음 레벨은 저주파 대역보다 줄어들지만 감쇄가 크며, 이러한 감쇄나 임피던스 및 잡음은 시간에 따라 변하고 주파수 선택적인 특성을 보인다. 이는 전력선의 채널 특성이 연결된 기기들에 의해 영향을 받기 때문이며, 이에 따라 반송파 주파수의 선택을 어렵게 한다. 따라서 전력선 통신 모델을 개발함에 있어 이러한 전력선의 특성을 고려하여 이를 극복할 수 있는 전송 방식을 선택하여야 한다. 이와 관련된 전력선 통신 기술을 Front End Skill, Channel Coding, Modem, MAC 등 4가지로 분류할 수 있다.

i) Front End Skill

전력선에 신호를 실어준다든가 전력선으로부터 신호만을 분리해내는 기술로서 크게 대역 통과 필터링(bandpass filtering)과 임피던스 매칭(impedance matching)의 기술이 있다. 대역 통과 필터링 기술은 원하는 신호만을 받아들이고 전력이나 각종 잡음 신호는 제거하는 기술이다. 임피던스 매칭 기술은 선로의 임피던스와 관계된 것으로 주어진 환경에서 최대의 신호전력을 상대측에 전달되도록 하는 것이다. 초기에는 트랜스포머와 간단한 L, R, C회로로 두 가지 기능을 동시에 행하였지만 변화가 심한 채널의 상황에 대한 대응이 어렵고 두 기능을 완벽하게 구현하기가 쉽지 않아 이를 개선하기 위해 여러 가지 방식이 제안되었다. 트랜스포머의 권선에 변화를 주어 커플러(coupler)의 특성을 가변할 수 있도록 하는 방식, 대역 통과 필터링과 임피던스 매칭 기능을 별도의 기능 블록으로 구현하여 설계를 용이하게 하고 각각의 성능을 향상시키는 방식, 송신과 수신 모드별로 서로 다른 임피던스를 갖도록 모드를 채널하는 방식, 저역 통과 필터(lowpass filter)와 고역 통과 필터(highpass filter)를 직렬로 연결하여 각각을 제어하므로 필터의 특성을 가변할 수 있도록 하는 방식 등이 제안되었다.

ii) Channel Coding

전력선에 올려지거나 올려질 신호를 어떻게 코드화(Encode)하거나 부호화(Decode)하는가와 관련된 기술로 전력선의 잡음 특성과 감쇄 특성으로 인해 이 부분의 기술 또한 전력통신에 있어서 중요한 기술 분야이며, 고속 전력선 통신의 경우 저속 전력선 통신보다 잡음에 보다 민감하기 때문에 각별한 노력이 요구된다. 전력선통신 모델 개발 회사들은 주로 Reed Solomon Code(iAd), Carrier Chip, CRC(Intellon Echelon), Optimized FEC(ITR-AN), Zero cross clocked carrier(X10, ZCCC), Carrier Chirp, Convolution, Viterbi(Planet) Code를 사용하고 있다.

iii) Modem

신호 변복조 기술로 열악한 전력선채널 특성을 극복하고, 전송 속도의 향상을 도모하기 위한 통신방식으로 FSK, Chirped-SS, DS-CDMA, OFDM 등을 주로 이용하고 있다. FSK 방식의 경우 채널특성이 전송에 충분할 만큼 평탄하지가 못하며, 따라서 전송속

도가 증가할수록 FSK 방식의 사용이 힘들어지는 단점이 있으며, DSSS 방식의 경우 신호 지연이 커서 전력선통신에 적합한 DS방식을 선택하는 것이 중요하며, 주로 2Mbps 이하의 용도에 적합한 방식이다. Narrow-band OFDM 의 경우 FSK와는 달리 채널 왜곡에 강하므로 성능은 SNR에 따라 달라진다. 사용대역에서 감쇄량 변동 등의 특성이 있으므로 FH와 결합한 OFDM이 적합하다. 즉 몇 개의 좋은 주파수를 적응(adaptive)적으로 사용하는 방식이 선택된다.

iv) MAC

신호 패킷의 충돌로 인해 낭비되는 시간과 대역폭을 줄여 신호를 안정적이며 빠르게 보내기 위한 기술로 대부분의 회사가 주로 Ethernet의 액세스 방식인 CSMA/CD방식을 이용하며 일부에서 Token Passing 방식을 이용하고 있다.

이처럼 전력선 통신은 채널의 열악한 환경과 채널 특성을 파악하고 이를 해결하기 위해서는 아래와 같은 다양한 기술을 적용하는 과정이 필요하다.

3. 적응 OFDM 통신 시스템

3-1. OFDM 통신 시스템의 기본 개요

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)은 MC(multi carrier)의 일종으로, OFDM 방식을 사용하게 되는 기본적인 이유는 OFDM 방식이 주파수를 효율적으로 사용하며, 다중경로 전파를 효율적으로 감소시킬 수 있다는 것이다.

기존의 MC 방식에서는 채널간 간섭을 피하기 위하여 전체 신호 주파수 대역을 중첩되지 않은 N개의 주파수 부채널로 분할하고, 데이터는 N 개의 심벌로 변조된 후, N개의 부채널을 통하여 주파수 다중화 되어 전송된다. 이때 주파수 부채널이 중첩되지 않도록 부반송파의 위치가 결정되므로 사용할 수 있는 주파수 대역폭 대하여 스펙트럼 효율이 저하된다. 이러한 비효율성을 해결하기 위하여, 병렬 데이터와 함께 중첩된 부채널을 갖는 OFDM 방식이 제안되었다. 이 방식은 각 부채널에서 동일한 신호율로 데이터를 전송하고, 각 부채널은 위의 신호를 만큼의 주파수 간격이 떨어져 있는 부반송파를 사용하는 것이다. 따라서 다중경로 왜곡을 극복하면서, 최대의 주파수 효율을 나타낸다. 인접채널이 서로 중첩되지만, 부반송파들 사이에는 직교성이 성립하므로, 각각의 부반송파는 인접 부반송파의 간섭을 받지 않고 수신할 수 있다.

또한 OFDM 방식은 고속 전송률을 갖는 데이터 열을 낮은 전송률을 갖는 많은 수의 데이터 열로 나누고 이들을 다수의 부반송파를 사용하여 동시에 전송하므로, 낮은 전송률을 갖는 부반송파의 심벌 구간(symbol duration)은 증가하게 되고, 따라서 다중경로 지연확산에 의해 발생하는 시간축 상에서의 상대적인 신호의 분산이 감소하므로 다중경로에 대하여 강건하게 된다. 그리고 DFT 기반의 MC 기술을 사용하여 기저대역에서 변복조를 처리할 수 있으므로 송, 수신기의 효과적인 디지털 구성이 가능하다. 또한 모든 OFDM 심벌사이에 채널의 지연확산보다 긴 보호구간(guard interval)을 삽입하여 심벌간 간섭을 제거할 수 있으며, 또한 보호구간을 순환적으로 확장함으로써 부반송파간 간섭을 피할 수 있는 장점이 있다. 또한 현재 유럽 디지털 방송의 전송과 IEEE 802.11a 및 IEEE 802.16a 와 b 등 대용량 무선 통신 시스템의 규격으로 채택되어 있는 고속의 데이터 전송에

효과적인 기술이다.

그러나 다수의 반송파를 사용하여 신호를 변조하므로, 신호들의 위상이 동일하다면, 시간축상 높은 값의 신호가 나타나게 되며, PAPR이 증가하고, 이로 인하여 HPA(high power amplifier)의 성능을 저하시키고, 전력 효율을 떨어뜨리게 된다. 부반송파 신호는 이산 또는 고속 푸리에변환에 의하여 변조되므로 부반송파의 수가 증가됨에 따라 변조된 신호의 진폭은 중앙극한정리에 의하여 가우시안 확률분포로 나타나며 전송신호열의 첨두 전력이 매우 커질 수 있다. 전송신호의 첨두 전력이 커지게 되면 HPA 등과 같은 비선형 소자를 거치면서 크게 왜곡될 수 있으며, 이는 시스템의 성능을 저하시키는 주된 원인이 된다. 이에 대한 해결책으로 클리핑, 코딩, 위상 조절 방법 등 다수의 방법이 있다.

OFDM 신호는 PSK(Phase Shift Keying)나 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)에 의해 변조된 부반송파의 합으로 구성된다. 만약 d_i 를 복소수 QAM 심벌, N_s 는 부반송파의 수, T 를 심벌 구간, f_c 는 반송파 주파수라고 하면, 시간 $t=t_s$ 에서 시작하는 OFDM 심벌은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp \left(j2\pi \left(f_c - \frac{i+0.5}{T} \right) (t-t_s) \right) \right\}, t_s \leq t \leq t_s + T \quad (3.1)$$

위 식을 등가의 복소수 기저대역 표기법을 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$s(t) = \left\{ \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp(j2\pi \frac{i}{T} (t-t_s)) \right\}, t_s \leq t \leq t_s + T \quad (3.2)$$

위 식에서 실수부와 허수부는 OFDM 신호의 동위상 신호와 직교위상 신호에 해당하며 이로부터 최종적인 OFDM 신호를 생성하기 위해서는 반송파 주파수에 해당하는 cos파와 sin파를 곱해야 한다. 그림 3.1은 하나의 OFDM 신호에 포함된 4개의 부반송파를 보여준다. 이 그림에서 모든 부반송파는 동일한 위상과 크기를 갖지만 실제로 위상과 크기는 데이터 심벌에 따라 각 부반송파에서 다르게 변조될 수 있다. 각 부반송파는 구간 T 에서 정확히 정수개의 사이클을 가지며 인접 부반송파 사이의 사이클 수의 차이는 정확히 1이다.

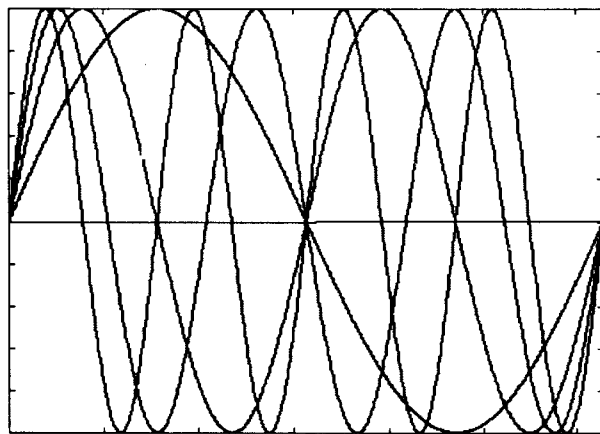


Fig. 3.1. An example of 4-subcarrier FDM symbol.

이 성질을 이용하여 부반송파 사이의 직교성을 설명할 수 있다.

예를 들어, 식 (3.2)의 j 번째 부반송파를 하향변환하여 j/T 의 주파수를 갖는 신호로 복조한 후 T 초 동안 적분하면 그 결과는 특정 부반송파에 대한 QAM 심벌 $d_{j+N_s/2}$ 과 상수 T 를 곱한 값이 된다. 다른 모든 부반송파에 대해서는 적분 구간 T 내에서의 사이클의 수가 정수가 되므로 적분 결과가 항상 zero가 되고, 서로 다른 OFDM 부반송파들은 서로 직교성이 성립한다. 따라서 OFDM 심벌의 스펙트럼은 그림 3.2에서 보이는 것처럼 임펄스와 구형펄스의 스펙트럼과의 컨벌루션으로 나타난다. OFDM 수신기는 기본적으로 각 부반송파의 최대값에 해당하는 곳에서 스펙트럼 크기를 계산하므로 다른 부반송파와의 간섭을 최대한 배제한 상태에서 복조할 수 있다. 식 (3.2)으로 정의되는 복소수 기저대역 OFDM 신호는 N_s 개의 입력 QAM 심벌에 대한 역 푸리에 변환(Inverse Fourier Transform : IFT)에 해당한다. 이를 이산시간에서 등가로 표현하면 식 (3.3)에 주어진 역 이산 푸리에 변환(Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT)이 된다.

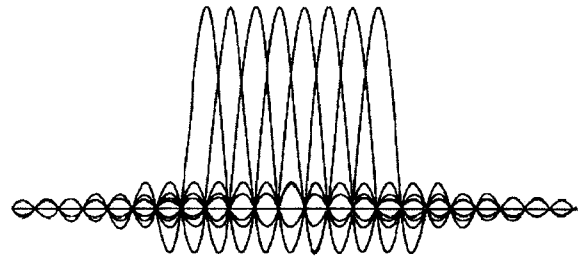


Fig. 3.2 Spectrum of the subcarriers.

여기서 시간 t 는 샘플 수 n 으로 정규화 되었다.

$$s(n) = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \exp(j2\pi \frac{in}{N}) \quad (3.3)$$

역으로 모든 부반송파를 복조하기 위해서는 FFT(fast Fourier transform)를 사용할 수 있다. FFT의 출력은 N_s 개의 QAM값들로 이루어져 있으며, 역맵핑하여 출력 데이터를 얻을 수 있다. 즉 OFDM 변조는 IDFT를 연산을 하고, 복조는 DFT를 사용함으로써 쉽게 디지털 영역에서 구현할 수 있다. 그림 3.3은 IFFT와 FFT를 사용하는 전반적인 OFDM 송수신 시스템의 블록 구성이다.

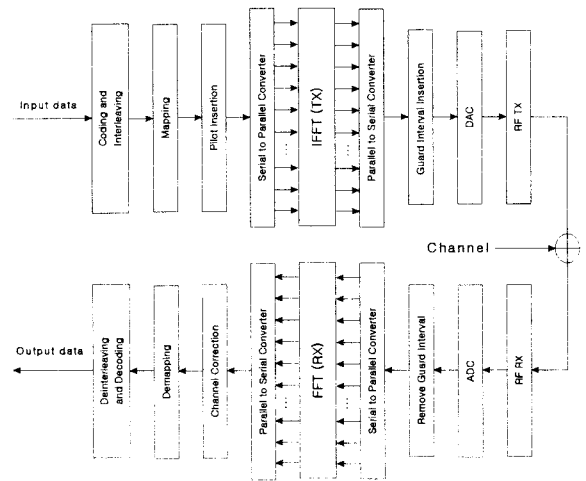


Fig. 3.3. Block diagram of the OFDM system.

3-2. 적응 OFDM 통신 시스템

적응 OFDM 통신 시스템은 위의 그림 3.3의 일반적인 OFDM 송수신기의 구조에 채널 환경에 따라 데이터의 변조 형태가 가변적인 매핑 회로(mapping circuit)가 부가된 시스템이다. 그림 3.4는 적응 OFDM 통신 시스템의 기본 구조이다. 매핑 회로는 파일럿 신호에 의해 채널에 대한 정보를 수집한 후, 채널의 환경이 양호한 경우에는 고효율의 변조 방식(8PSK, 16, 64QAM)을 선택하고 채널의 환경이 열악한 경우에는 저효율 변조 방식(QPSK, BPSK)을 선택한다. 여기서 변조 방식이 서로 다른 부반송파에서 SNR 비는 동일하게 설정해야 한다. 본 논문에서 채널 추정의 과정은 파일럿 신호에 의해 이상(ideal)적으로 완벽하게 추정된 것으로 가정한다. 이러한 적응 알고리즘에서 채널의 추정의 완벽하지 않다고 가정한다면 적응 OFDM 통신 시스템의 BER은 다소 증가할 것이다. 그림 3.5는 coding, interleaving, guard interval 등을 고려하지 않은 간략화된 적응 OFDM 송수신기 모델이다.

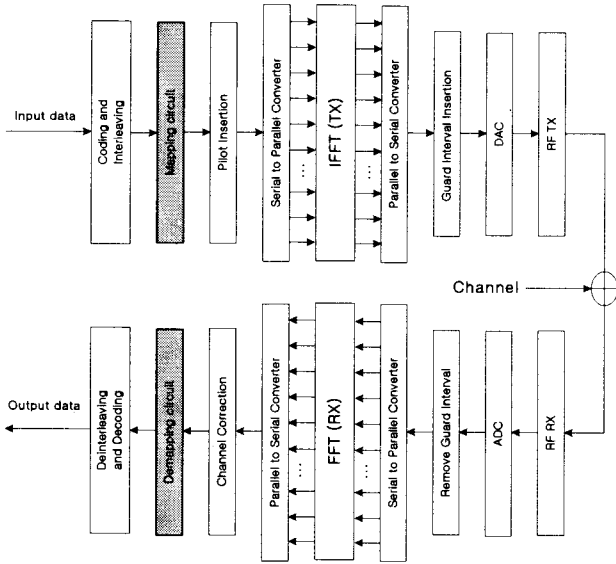


Fig. 3.4. Block diagram of the adaptive OFDM system.

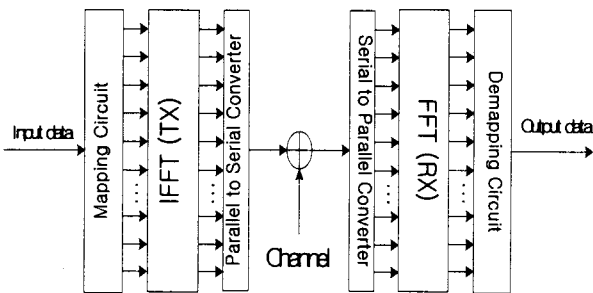


Fig. 3.5. Simple model of the adaptive OFDM system.

본 논문의 적응 알고리즘은 각 부반송파에 비트 할당을 달리하는 방식이다. 먼저 시스템은 파일럿 신호를 이용하여 채널의 특성을 분석하고 이를 바탕으로 적응 알고리즘을 수행하게 된다. 채널을 추정하기 위해서는 미리 알고 있는 하나 이상의 OFDM 심볼로 구성된 파일럿 신호를 사용하는 것이 가장 적합하다. 그림 3.6은 채널 추정을 위한 파일럿 신호 구성을 보여준다. 이 그림은 시간-주파수 구조를 나타내는데 세로축은 부반송파를 나타내고 가로축은 OFDM 심볼(데이터)를 나타낸다. 전송 신호는 두 OFDM 심볼로 시작하는데 두 심볼의 모든 데이터값은 미리 알고 있는 파일럿이다. 이 두 심볼을 훈련 심볼(training symbol)이라 하는데, 훈련 심볼은 채널 추정을 위해 사용된다.

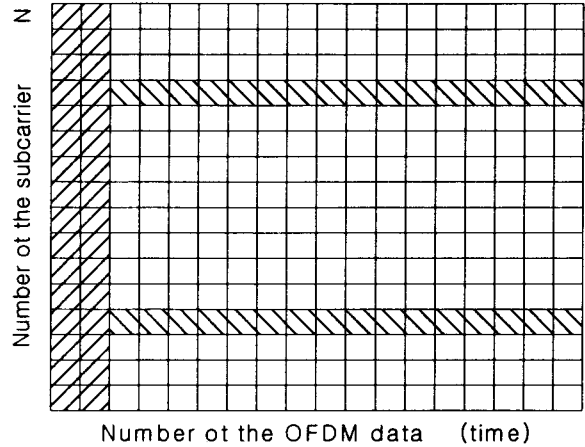


Fig. 3.6. An example of the pilot signal.

비트 할당 적응 알고리즘은 처리 과정은 다음과 같다.
 ① 각 부반송파의 $SNR(i)$ (신호 대 잡음 전력의 비)를 계산한다. 여기서 모든 부반송파의 에너지는 $\epsilon(i)=1$ 으로 설정한다.

② 다음으로 $\gamma_{margin}=0(dB)$, $IterateCount=0$ 와 $UsedCarriers=N$ 으로 설정한다. 여기서 γ_{margin} 은 시스템의 성능 margin이고, N 은 사용되는 부반송파의 수이다.

③ $i=1$ 부터 N 까지 인 경우, $b(i)$, $\tilde{b}(i)$, $diff(i)$ 와 $UsedCarriers$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$b(i) = \log_2 \left(1 + \frac{SNR(i)}{\Gamma + \gamma_{margin}(dB)} \right) \text{ 로 계산한다.}$$

$\tilde{b}(i) = \text{round}[b(i)]$, 여기서 $\text{round}(x)$ 는 x 를 반올림하는 것이다.

$diff(i) = b(i) - \tilde{b}(i)$ 로 차이를 계산한다.

만약 $\tilde{b}(i)=0$ 이면 $UsedCarriers = UsedCarriers - 1$ (3.4)

여기서 Γ 는 근사화된 SNR_{gap} 이다.

④ $B_{total} = \sum_{i=1}^N \tilde{b}(i)$ 로 설정하고, $B_{total}=0$ 으로 채널 환경이 나쁜 경우에는 적응 알고리즘 과정을 종료한다.

⑤ 새로운 γ_{margin} 을 다음과 같이 계산한다.

$$\gamma_{margin} = \gamma_{margin} + 10 \log_{10} \left(2 \frac{B_{total} - B_{target}}{UsedCarriers} \right) \quad (3.5)$$

여기서 B_{target} 은 OFDM 심볼 당 전송하고자 하는 비트 수이다.

⑥ $IterateCount = IterateCount + 1$ 으로 카운트 증가시킨다.

⑦ 만약 $B_{total} \neq B_{target}$ 이고 $IterateCount < MaxCount$ 이면,

$UsedCarriers = N$ 으로 설정하고 3 단계로 이동하거나 8 단계로 이동한다.

⑧ 만약 $B_{total} > B_{target}$ 이면, 부반송파의 $\tilde{b}(i)$ 에서 1 bit를 증가시켜 $diff(i)$ 의 차이를 작게한다. 각 부반송파의 $diff(i)$ 를 조정하여 B_{total} 과 B_{target} 가 동일하게 한다.

⑨ 만약 $B_{total} < B_{target}$ 이면, 부반송파의 $\tilde{b}(i)$ 에서 1 bit를 감소시켜 $diff(i)$ 의 차이를 크게한다. 각 부반송파의 $diff(i)$ 를 조정하여 B_{total} 과 B_{target} 가 동일하게 한다.

⑩ 주어진 비트 할당 $\tilde{b}(i)$ 를 바탕으로 $P_e(i) = P_{e, target}$ 이 되도록

특 입력 에너지 분포를 조정한다. 이 과정을 수행하면 송신 전력의 분포는 더 이상 플랫폼 형태가 아니고, 비트 할당에 따른 전력 분포로 구성된다. 즉, 변조 레벨은 B_{total} 과 B_{target} 가 동일한 시점에서 $\tilde{b}(i)$ 를 설정한다. 따라서 $\tilde{b}(i)$ 비트를 전송할 수 있는 변조 포맷으로 매핑하게 된다.

⑩ 마지막으로 에너지 분포는 모든 부반송파에서 동일하게 설정된다. 단계 ①에서 ⑦까지 시스템의 성능 margin (γ_{margin})을 반복하여 탐색하고, 최대 반복 탐색까지 카운트되면 단계 ⑧과 ⑨의 과정을 수행한다. 마지막으로 단계 ⑩과 ⑪은 각 부반송파의 에너지 분포를 동일하도록 조절하는 과정이다.

3-3. 매핑 회로(mapping circuit)

송신기의 매핑 회로(mapping circuit)는 채널 환경에 따라 적절한 성상도(constellation) 형태를 선택하여 N개의 병렬 데이터를 생성한다. 매핑 회로에서 사용되는 성상도는 일반적으로 PSK 계열 또는 QAM 계열의 변조 형태를 선택하게 된다. 본 논문에서는 BPSK, QPSK, 8PSK, 16-QAM의 네 가지 변조 형태로 구성하였다. 따라서 채널 환경을 고려하여 매핑 회로에서 출력하는 데이터의 최소 전송량과 최대 전송량은 다음과 같다. 최소 전송량은 채널 환경이 매우 열악하여 매핑 회로에서 N개의 병렬 입력에 모두 BPSK의 변조 형태를 취하는 경우이다. 이 경우 1개의 OFDM 블록이 전송하는 데이터의 비트수는 N비트가 된다. 반면 최대 전송량은 채널의 환경이 양호하여 매핑 회로에서 N개의 병렬 입력에 모두 16QAM의 변조 형태를 취하는 경우로, 1개의 OFDM 블록이 전송하는 데이터의 비트수는 4N 비트가 된다. 따라서 하나의 OFDM 송신 블록의 전송량은 최소 N 비트에서 최대 4N 비트 사이의 값을 가지게 된다. 이렇게 매핑 회로에서 각각의 N개의 병렬 입력의 constellation를 결정하고, 매핑 회로의 병렬 심벌은 N-point IFFT를 수행하고, 병/직렬 변환 후 출력 신호를 채널로 전송하게 된다. 수신 신호를 병/직렬 변환 후 FFT 연산을 수행한다. FFT의 N개의 병렬 출력 값이 디매핑 회로로 입력된다. 디매핑 회로는 송신기에서 사용한 constellation 정보를 알고 있으므로, 각각의 병렬 심벌마다 constellation 형태에 맞는 데이터의 복조 한다. 예로 첫 번째 입력이 16-QAM constellation 형태로 전송되었다면, 16-QAM의 데이터 decision 방법에 의해 데이터를 수신한다. 먼저 일반적인 OFDM의 구성은 다음과 같다. 부반송파의 수는 128개이고, 각 부반송파는 QPSK의 변조 형태로 구성한다. 이때 하나의 OFDM 블록이 전송하는 데이터의 비트수는 $128 \times 2 = 256$ 비트이다. 다음으로 적응 OFDM의 구성은 다음과 같다. 부반송파의 수는 동일하게 128개이고, BPSK, QPSK, 8PSK의 세 가지 변조 형태는 채널의 응답에 따라 결정된다. 그림 3.7은 세 가지 변조 방식의 constellation을 보여준다. 시뮬레이션에서 각 부반송파의 전력이 동일하도록 constellation을 구성한다. 여기서 constellation의 크기는 1이고, 위상을 변화시켜 데이터와 매칭시킨다.

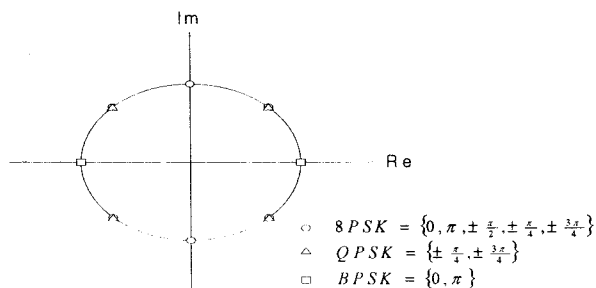


Fig. 3.7. The constellation with the same power.

그림 3.8은 채널 응답 특성이 선형적으로 감소하는 경우 적응 OFDM의 변조 형태를 나타낸다. 여기서 1~32의 부반송파는 채널 환경이 양호하므로 8PSK의 변조 형태로, 33~96의 부반송파는 QPSK의 변조 형태로, 97~128의 부반송파는 채널 환경이 열악하므로 BPSK의 변조 형태로 설정한다. 그림 3.8의 적응 OFDM 시스템에서 하나의 OFDM 블록이 전송하는 데이터의 수는 $32 \times 3 \text{bit}(8\text{PSK}) + 64 \times 2 \text{bit}(Q\text{PSK}) + 32 \times 1 \text{bit}(B\text{PSK}) = 256 \text{bit}$ 이다. 본 절에서 일반적인 OFDM과 적응 OFDM의 데이터 전송량과 송신 전력을 동일하게 전송된다.

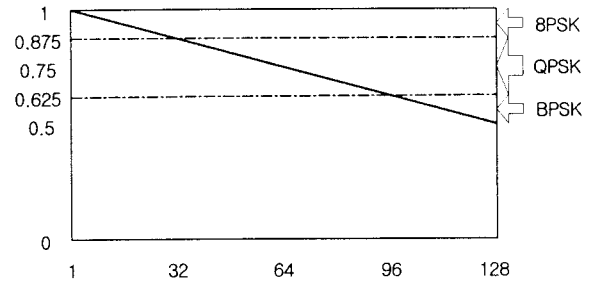


Fig. 3.8. Bit distribution of the OFDM system.

4. 적응 OFDM 시스템의 성능 분석

2절에서 언급한 전력선 채널의 특징을 고려하여, 적응 OFDM 시스템의 simulation에 적용할 전력선 채널의 모델을 구성하였다. 본 논문에서 구성한 전력선 채널의 기본 모델은 그림 4.1과 같다.

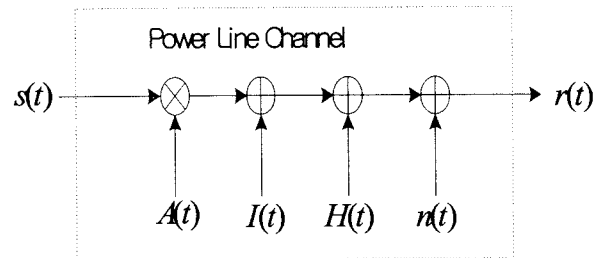


Fig. 4.1. Power line channel model.

여기서 $A(t)$ 는 전력선 채널의 주파수 응답 특성을 나타내며, 신호의 감쇄 및 주파수 선택적 페이딩 특성이 있다. $I(t)$ 는 채널의 임펄스 잡음을 나타내며 시간에 따라 가변적으로 발생한다. $H(t)$ 는 고조파 잡음(harmonic noise)을 나타내며 60Hz의 정수 배에서 고조파(harmonic) 성분이 발생한다. 마지막으로 $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음(AWGN : additive white Gaussian noise)이고, 열 잡음 및 채널의 기본 잡음을 나타낸다. 본 절에서 성능 분석을 위한 시뮬레이션 변수는 표 4.1과 같다. 여기서 코딩, 파일럿, 지연 확산 등을 고려하지 않고, 순수 OFDM 심벌만을 고려하여 설정하였다. 일반 OFDM에서 전송 속도는 변조 방식에 따라 차이가 발생한다. 먼저 128개의 모든 부반송파가 BPSK 변조 방식을 선택하는 경우 전송 속도는 다음과 같다. 1개의 OFDM 블록이 전송하는 비트수는 $1 \text{bit}(B\text{PSK}) \times 128 \text{부반송파} = 128 \text{ bits}$ 이다. 심벌 주기가 0.128ms이므로 전송 속도는 $128 \text{ bits} / 0.128 \text{ ms} = 1 \text{ Mbps}$ 가 된다. 이와 마찬가지로 128개의 모든 부반송파가 QPSK 변조 방식을 선택하는 경우 전송 속도는 $512 \text{ bits} / 0.128 \text{ ms} = 2 \text{ Mbps}$ 가 된다. 각 변조 방식별 전송 속도는 표 4.1에서 알 수 있다.

Table. 4.1. Simulation parameters.

부반송파의 수	128	
과도 샘플링	4	
IFFT/FFT 사이즈	128×4=512	
심벌 주기	0.128ms	
부반송파 간격	7.8125kHz	
채널 간격	1MHz	
전송 속도	BPSK	1Mbps
	QPSK	2Mbps
	8PSK	3Mbps
	16QAM	4Mbps

4-1. 전력선 채널에서 성능 분석

전력선 채널의 특징을 고려하여, 일반 OFDM과 적응 OFDM 시스템의 성능 분석을 한다. 그림 4.2은 전력선 채널 모델을 나타낸다. 여기서 $A(t)$ 는 주파수 응답 특성을 나타내며, 신호의 감쇄와 주파수 선택적 페이딩 특성이 있다. $I(t)$ 는 채널의 임펄스 잡음을 나타내며 시간에 따라 가변적으로 발생한다. $H(t)$ 는 고조파 잡음 특성을 나타내며 60Hz의 정수 배에서 고조파 잡음 발생한다. 마지막으로 $n(t)$ 는 additive white Gaussian noise (AWGN)이고 열잡음 및 채널의 기본 잡음 특성을 나타낸다.

그림 4.3은 채널 응답 특성과 임펄스 잡음, 그리고 고조파 잡음이 존재하는 상황에서 적응 OFDM과 일반 OFDM의 BER 성능 분석이다. 여기서 채널의 주파수 응답은 Case 4의 경우이고, 임펄스 잡음은 $ISR=3dB$ 이고 $p=0.01, 0.001$ 의 확률을 가지고 발생하는 경우이고, 고조파 잡음이 백색 잡음의 1.5배의 전력($HNR=1.76dB$)을 가지는 경우이다. 그림의 결과에서 적응 OFDM 시스템이 일반 OFDM 시스템보다 신뢰할 수 있는 데이터 전송이 가능하다.

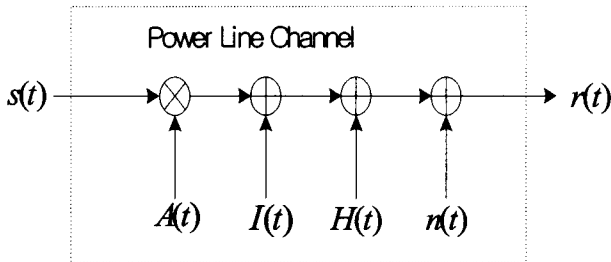


Fig. 4.2. Power line channel model.

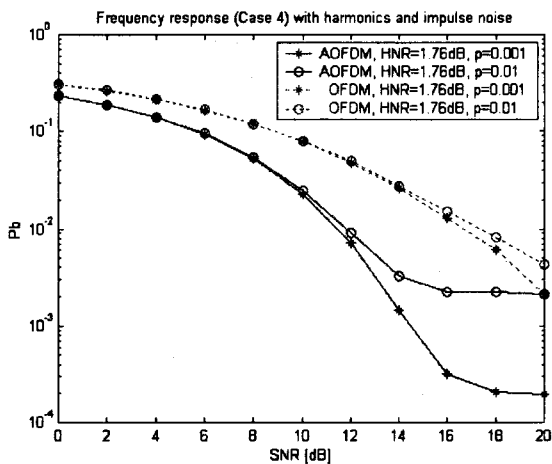


Fig. 4.3. BER performance for AOFDM and OFDM in Case 4 with harmonic and impulse noise.

그림 4.4은 채널 응답 특성과 임펄스 잡음, 그리고 고조파 잡음이 존재하는 상황에서 적응 OFDM과 일반 OFDM의 BER 성능 분석이다. 여기서 채널의 주파수 응답은 Case 4의 경우이고, 임펄스 잡음은 $ISR=3dB$ 이고 $p=0.01, 0.001$ 의 확률을 가지고 발생하는 경우이고, 고조파 잡음이 백색 잡음의 2.0배의 전력($HNR=3.01dB$)을 가지는 경우이다. 그림의 결과에서 적응 OFDM 시스템이 일반 OFDM 시스템보다 신뢰할 수 있는 데이터 전송이 가능하다.

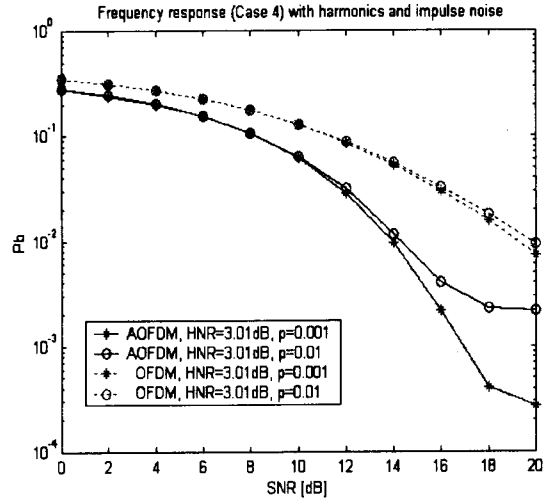


Fig. 4.4. BER performance for AOFDM and OFDM in Case 4 with harmonic and impulse noise.

그림 4.5는 여러 가지 전력선 채널의 변화에 따른 OFDM과 적응 OFDM 시스템의 BER 성능이다. 그림의 결과에서 impulse noise의 발생 확률이 작을수록, harmonic의 잡음 전력이 작을수록 BER 성능이 우수함을 알 수 있다. 그리고 채널의 주파수 응답 특성에 따라 적절한 비트 할당을 하는 적응 OFDM 통신 시스템이 열악한 전력선 채널 환경에서도 신뢰할 수 있는 통신이 가능하다.

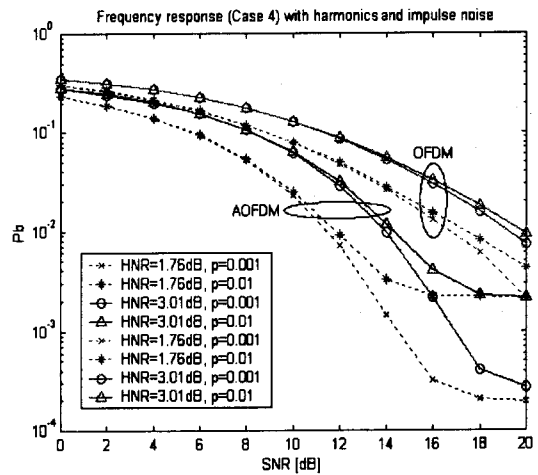


Fig. 4.5. BER performance for AOFDM and OFDM in the various power line channel model.

5. 결 론

전력선은 지역적으로 광범위한 네트워크를 구성하고 있어, 전력선을 이용한 통신 시스템은 전화선이나 internet access line과 같은 부가적인 케이블의 설치가 필요 없이 기존의 전력선 망을 이용하여 통신을 할 수 있다. 그러나 전력선 채널은 통신에 사용되기에는 채널 환경이 매우 열악한 단점이 있다. 따라서 전력선 채널 환경을 조절할 수 없으므로 잡음에 강인한 통신 시스템의 설계가 필요하다. 전력선 채널의 특징은 일반적인 AWGN(additive white gaussian noise) 채널 환경보다 잡음의 강도 매우 높고, 통신에 사용되는 대역 내에서 거리에 따른 신호의 감쇄가 심하다.

그리고 주파수 영역과 시간 영역에서의 impedance의 변화가 심하여 송신기와 수신기 사이에 최적의 전력 전송 조절이 어렵다. 이러한 noise, impedance variance, signal attenuation 등의 전력선 채널의 parameter는 시간 영역, 주파수 영역, 송수신기의 위치에 따라 매우 가변적이기 때문에 신뢰성 있는 통신을 하기에 매우 어려움이 있다. 본 논문에서는 일반적인 OFDM에 채널의 변화에 따라 비트 할당을 달리하는 적응 OFDM(adaptive OFDM) 시스템에 대해 분석하였다. 이 적응 알고리즘은 채널의 환경이 양호한 경우에는 고효율 성상도(constellation)를 이용하고, 채널의 환경이 열악한 경우에는 저효율 성상도를 이용하는 방법이다.

그 예로 Case 4의 주파수 응답 특성에서 적응 OFDM 통신 시스템과 일반 OFDM 통신 시스템을 비교 분석한 결과로, 10^{-4} 의 BER을 만족하는 요구 SNR을 비교하면, 일반 OFDM의 경우 21.2dB의 SNR이 필요하지만 적응 OFDM의 경우 11.4dB의 SNR이 필요하다. 그러므로 적응 OFDM이 10^{-4} 의 BER을 만족하는 경우에 약 9.8dB의 SNR 개선 효과가 있다. 두 시스템을 비교하면 적응 OFDM이 채널의 환경 변화에 따라 적절히 비트를 할당함으로써 SNR 이득을 얻을 수 있다. 채널의 환경이 열악할수록 적응 알고리즘을 적용했을 때 성능 개선 효과가 크다. 다음의 표 5.1은 Case 1에서 Case 4의 주파수 응답에서 10^{-4} 를 만족하는 요구 SNR 및 SNR 개선 효과를 나타낸다. 표의 결과에서 채널 환경이 열악할수록 적응 알고리즘을 이용하는 경우, 시스템의 성능 개선효과가 큼을 알 수 있다.

Table 5.1. The required SNR and SNR gain.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
일반OFDM(요구SNR)	10.3 dB	14.6 dB	13.5 dB	21.2 dB
적응OFDM(요구SNR)	9.6 dB	10.8 dB	10.9 dB	11.4 dB
SNR 개선효과	0.7 dB	3.8 dB	2.6 dB	9.8 dB

[참고 문 헌]

- [1] F. J. Simois, and J. I. Acha, "Study and modeling of noise on the low voltage part of the electrical power distribution network between 30 kHz and 1 MHz," *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 217-222, 2001.
- [2] M. R. Winkler, "Chirp signals for communications", *IEEE WESCON Convention Record*, 1962.
- [3] L. J. Cimini Jr., "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-33, pp.665-675, July 1985.
- [4] H. C. Ferreira, H. M. Grove, O. Hooijen, A. J. Han Vinck, "Power line communications: an overview," *IEEE AFRICON 4th*, vol.2, pp.558-563, 1996.
- [5] M. H. L. Chan, R. W. Donaldson, "Attenuation of communication signal on residential and commercial intrabuilding power- distribution circuits," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol.28, pp.220-230, Nov. 1986.
- [6] A. Kocian and D. Dahlhaus, "Downlink Performance Analysis of a CDMA Mobile Radio System with Chirp Modulation," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 238-242, 1999.
- [7] A. Springer, W. Gugler, M. Huemer, L. Reindl, C. C. W Ruppel, R. Weigel, "Spread spectrum communications using chirp signals," *IEEE/AFCEA*, pp.166-170, 2000.
- [8] S. E. El-Khamy, "Matched swept-frequency digital modulation for binary signaling in inhomogeneous dispersive media", *IEEE Trans. Antenn. & Propagation*, Vol. AP-28, pp. 29-35, Jan. 1980.
- [9] S. E. El-Khamy, S. E Shaaban and E. A. Tabet, "Efficient multiple-access communications using multi-user chirp modulation signals", *IEEE 4th International Conference on Spread Spectrum System and Techniques*, Vol 3, pp.1209-1213, 1996.
- [10] R.L. Peterson, R.E. Ziemer and D.E Borth, *Introduction to Spread Spectrum Communications*, Prentice-Hall, 1995.