OFDM 기반 전력선 통신을 위한 Notch Filter 설계

Notch Filter Design for Power Line Communication based on OFDM

이현소*, 이영환**, 장동원**, 김경석*
충북대학교 전파공학과*, 한국전자통신연구원**

Hyun-So Lee(hyunso.lee@gmail.com)*, Young-Hwan Lee(yhwan@etri.re.kr)**,
Dong-Won Jang(dwjang@etri.re.kr)** , Kyung-Seok Kim(kseokkim@cbnu.ac.kr)*

요약

인터넷 서비스가 주 정보원으로 작용하는 정보화 시대에 인터넷 망이 닿지 않는 지역에 인터넷 서비스를 제공하기 위해 전력선 통신이 이루어지고 있다. 고속의 통신 서비스를 제공하기 위하여 현재 30MHz까지 할당된 주파수 대역을 80MHz로 확대하려는 연구도 이루어지고 있다. 하지만, 전력선은 통신 선로가 아니므로 통신 신호의 흐름에 따라 방사되는 전파가 발생하고, 그 전파는 기존에 그 대역을 사용하는 무선 통신 서비스와 간섭이 발생하게 된다. 본 논문에서는 전력선 통신과 무선 통신 서비스의 상호 간섭을 줄이기 위해 ETSI에서 규정한 간섭 채널을 기준으로, 간섭 신호의 대역폭을 고려하여 3단, 8단의 동적 Notch Filter를 연산하였다. 또한, 간섭 채널에 Notch Filter를 적용하였고, 적용한 결과를 스펙트럼 및 BER 성능을 통하여 검증하였다.

■ 중심어 : | 전력선 통신 | Notch Filter |

Abstract

Today is the Information age which Internet service acts a most important Information Source. So A Power Line Communication has been achieved to offer Internet service for Last-Mile area. And Research is achieved to frequency range from 30MHz to 80MHz for High-speed communication service. But, Power Line is not suitable for communication, so, electric wave is generated from flow of communication information. And the electric wave is interfered with Wireless Communication Service using the same frequency range. In this paper, we calculated a 3 steps and 8 steps dynamic Notch Filter to consider the bandwidth of interference signals based on ETSI standard for reduce of interference between Power Line Communication and Wireless Communication Service. And we applied a Notch Filter and verified the application performance from Spectrum and BER.

■ keyword : | PLC | Notch Filter |

I. 서 론

인터넷 서비스가 주 정보원으로 작용하는 정보화 시

대에 인터넷 망이 닿지 않는 Last Mile Solution에 적합한 서비스로서 전력선 통신에 대한 연구가 이루어지고 있다. 전력선 통신(Power Line Communication: PLC)

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 전파방송산업기반조성사업의 일환으로 수행되었습니다.(08-기반-17, 안 전한 전자파환경 조성)

접수번호 : #081208-005

접수일자 : 2008년 12월 08일

심사완료일 : 2009년 02월 11일

교신저자 : 이현소, e-mail : hyunso.lee@gmail.com

은PLT(Power Line Carrier, Mains Communication, Power Line Telecom) 또는 PLN(Power Line Networking)으로도 불리며 전력을 실어 나르는 도체에 데이터를 전송시키는 통신시스템이다. 최근에 전력선 통신 기술은 매우 발전되어서 200Mbps 정도의 고속통신을 할 수 있게 되었다. 그러나 전력선 통신에 이용되는 전력선은 기본적으로 60Hz의 전력을 전송하도록 설계되었으므로 이보다 높은 고주파 신호를 보내게 되면 표피효과(Skin Effect)로 인하여 전파가 방사되어 부근의 무선통신 시스템에 영향을 주게 된다. 그러므로 현재 전력선 통신에서 사용하는 주파수 대역(80MHz 이하)의 일차 이용자(ITU-R 에서 국제적으로 할당)인 항공과 해상의 안전/조난통신, 방송, 아마추어무선, 전파천문 등은 간섭에 대한 우려 때문에 전력선 통신의 활성화를 반대하고 있다. 현재 허용 전계강도 기준치가 규정되어 있지만, 전계강도 기준치만으로는 간섭을 완벽히 제거할 수 없으므로 별도의 주파수 대역 제거 시스템의 필요성이 대두되고 있다[1].

전력선은 이미 전 세계적으로 60% 이상의 주거지에 설치되어 있기 때문에 고속 PLC로 인터넷 액세스를 실현하는 새로운 액세스용 회선을 부설하지 않고 광대역 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 200Mbps PLC 장비가 상용화되는 등 PLC 기술이 성장함에 따라, 동남아시아나 아프리카와 같이 통신 인프라가 구축되지 않은 나라에서는 전력선을 통신 수단으로 활용하여 접근망(access network) 뿐만 아니라 백본망(backbone network)까지 구축하려는 연구가 진행 중이다[2][3].

하지만, PLC는 유선통신으로 그 매체가 전력선이므로 전파의 누설로 다른 무선 설비에 영향을 줄 가능성이 있으며 이 대역은 전파법 상에 따라 전파이용설비로 정해져 있다[4]. 전력선은 전화선이나 비대칭 디지털 가입자 회선(ADSL)처럼 단일 목적에 단일 기기로 이루어지는 통신선이 아니라, 가정의 냉장고, TV에서부터 한국 전력의 계량 설비 등 다양한 기기들이 접속되어 있어 회선의 잡음 수준이 굉장히 높은데다 신호가 왜곡되거나 끊기는 현상이 빈발해 데이터 통신 회선으로는 부적합하다는 한계를 지니고 있다. 특히, 높은 부하와

간섭현상, 변동하는 임피던스와 신호 감쇠 현상 등의 특수한 환경을 극복하고, 제한된 신호 전력을 통해 데이터를 전달해야 하는 어려움이 존재한다. 이러한 누설 전파와 기존 무선 서비스와의 간섭을 제어하기 위한 연구가 이루어지고 있다.

국외의 경우, 일본의 전력선 통신 표준화 기구인 ECHONET에서는 홈 네트워크 기반 전력선 통신 허용 대역폭을 10kHz~450kHz로 제한하고, 누설 전계 허용치를 100uV/m으로 규제하며, 송신전력을 10mW/10kHz 이하로 규정하여 기존 무선 서비스와의 간섭을 피하는 방식을 채택하였고[5], 2006년 고속 전력선 통신에 대한 규제를 완화하고 실용화를 검토하는 과정에 있으며, 유럽의 OPERA에서는 EMC문제를 전담하는 ETSI TC ERM, CENELEC SC205A, TC209, TC210, TC215의 전문가가 포함된 Joint Work Group CENELEC/ETSI에서 연구를 진행하고 있다. 미국에서는 Homeplug Power Alliance에서 2004년 말 Ethernet class Home Powerline Network을 위한 표준안 HomePlug V2.0을 발표하였다[6]. 국내에서는 2005년 고속 전력선 통신 도입을 위한 주파수 이용방안 연구를 통해 옥내 및 옥외에서 AM방송, 해상통신, 아마추어 무선, 항공통신 등 기존 무선 서비스 보호를 위한 운용 금지 대역을 설정하여 해당 대역을 전력선 통신에서 사용할 수 없도록 하는 방법을 제안하였다[7]. 또한, 옥내의 전력선 통신 신호가 옥외로 유출되는 것을 막기 위한 단상용, 3상용 등 블로킹 필터에 대한 연구도 이루어졌다[8].

고속 전력선 통신을 위한 표준화 제정 진행 흐름에 따라, ITU에서는 현재 80MHz까지 전력선 통신을 사용하기 위한 관련 권고 작성이 진행 중이며 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers), OPERA(Open PLC European Research Alliance), CEPCA(Consumer Electronics Powerline Communications Alliance)와 같은 표준화 기관에서는 국제적인 전력선 통신 표준화 작업을 수행하고 있다. 또한 미국이나 유럽 등 세계 여러 국가에서는 기존 무선통신 서비스에 간섭 영향을 최소화 할 수 있는 기술 기준을 제정해서 전력선 통신과 주파수 대역을 공유해

서 사용할 수 있도록 하고 있다. 현재, Homeplug 및 ETSI를 선두로 하여 기존 무선통신 서비스와의 간섭 영향을 최소화 하는 간섭 제어 방법으로 Notch Filter에 대한 연구가 이루어지고 있다.

Notch Filter는 극한의 Cutoff Slope를 갖는 LPF(Low Pass Filter)와 HPF(High Pass Filter)의 결합으로 구성되며 특정의 주파수에서 급격한 감쇠 특성을 가지고 있는 필터로써, 텔레비전 송신기에서 출력되는 고주파 신호를 이용하여 불필요한 주파수 성분을 제거할 목적으로 사용되어 왔다. Notch Filter를 통하여 특정 주파수에 포함된 잡음을 제거할 경우, 잡음 외의 다른 부분에는 거의 영향이 없어 기존 무선 통신 서비스와 전력선 통신이 동시에 이루어질 경우, 다른 대역에는 영향을 주지 않고 간섭이 발생하는 부분만을 제거할 수 있게 된다.

본 논문에서는 전력선 통신과 기존 무선 통신 서비스를 위한 Notch Filter에 대해 연구하였으며, 두 시스템 상호간의 간섭을 줄이기 위해 전력선 통신에서 무선 통신 서비스 사용 대역의 신호를 제거하여 전송하는 방식을 제안하였다. 제안한 방법을 통해 전력선 통신과 기존 무선 통신 서비스간의 간섭을 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문에서는 국제적으로 전력선 통신을 위해 채택하고 있는 OFDM 방식에 Notch Filter를 적용하였다. 2장에서는 Notch Filter를 적용할 전력선 통신의 환경에 대해 설명하고, 3장에서는 Notch Filter에 대해 알아본다. 4장에서는 OFDM 방식에 Notch Filter를 설계하고, 5장에서 시스템에 적용하여 그 결과를 확인하며, 6장에서 결론을 맺는다.

II. 전력선 통신 기술

기본적인 전력선 통신 방법은 가정에서 사용하는 전력선에 미약한 고주파 변조신호를 중첩시켜서 실현하는 방식으로 [그림 1]과 같다.

그림 1. 전력선 통신의 원리

1. 전력선 통신의 가용 대역폭 및 전송 속도

과거 홈 네트워크 기반의 전력선 통신에 할당된 가용 주파수 대역은 9kHz~450kHz로 9.6kbps 정도의 전송속도를 갖고 있었다. 하지만, 통신 신호의 전송을 위해 광대역의 주파수 대역을 필요로 하게 되었고, 광대역 전력선 통신을 허용한 국가들의 경우 대부분 2~30MHz의 대역을 사용 가능하게 할당하고 있다. 2~30MHz 대역은 최저 10Mbps에서 여러 모뎀을 동시 연결할 경우에도 40Mbps(이론적으로는 200Mbps)의 안정적인 속도를 유지할 수 있다.

그림 2. 전력선 통신 가용 주파수 대역

[그림 2]를 통하여 볼 수 있듯, 기존의 10~450kHz의 경우 기존 가전제품의 영향으로 인해 잡음이 크고 저임피던스의 특성을 갖는다. 주입 전력에 비해 수신 전력은 높으나 잡음 전력 또한 높아 SNR이 작게 나타난다. 2~30MHz의 광대역 전력선 통신에 할당된 대역의 경우에는 주입 전력에 비해 수신 전력은 높고 잡음 전력은 낮아서 SNR이 크게 나타나 잡음 정도가 적다. 하지만, 현재 고속 전력선 통신을 위해 확장한 30~80MHz의 대역은 주입 전력에 비해 수신 전력은 낮게 나타나며, 잡음 전력 정도는 2~30MHz 대역과 거의 동일하게 나타나 전송 손실이 크며, 잡음 정도도 크게 나타난다.

2. 전력선 통신의 반송 방식

[그림 3]과 같이, 변전소에서 변압기까지 22.9kV의 고압 송전선을 통하는 고압 전력선 통신은 배전 자동화, 부하 감시, 부하 제어 등에 적용하는 것을 목표로 두고 있으며, 이러한 고압 가입자망은 Out-door Service로 연구 중에 있다. 변압기로부터 주상 변압기, 각 수요자까지는 220V의 저압 배전선을 통해 저압 가입자망으로 Out-door Service가 실용화 되어 있고, 각 수요자의 Home Network Service가 In-door Service로 실용화 되어 있다.

그림 3. 전력선 통신의 배전선 반송 방식의 구분

하지만, 고압 사용자망이 운용될 경우, 기존 무선 시스템에 저압 배전선보다 방사되는 전파의 영향이 더 크게 나타나게 될 것이다. 이러한 두 시스템의 간섭을 줄이기 위한 기술이 Notch Filter이다.

III. 전력선 통신에서의 Notch Filter 기술

Notch Filter는 특정의 주파수에서 급격한 감쇠 특성을 가지고 있는 필터로써, 보통 송전선에 의해 유도되는 60Hz 잡음을 제거하는데 사용되어 왔다. 본 논문에서는 Digital Notch Filter 중 IIR Notch Filter를 적용하였다.

1. Notch Filter

일반적으로 2차 FIR Notch Filter의 경우에 전달함수는 분자다항식만으로 표현되고 영점이 켈레복소수 관계가 있으므로 전달함수를 식 (1)과 같이 표현 가능하다.

다. 이 때, 설계 변수는 α 와 w_0 이다[9, 10].

$$H(z) = (1 - \alpha e^{jw_0} z^{-1})(1 - \alpha e^{-jw_0} z^{-1}) \quad (1)$$

$$= 1 - 2\alpha \cos(w_0) z^{-1} + \alpha^2 z^{-2}$$

Notch 폭을 구하기 위하여 w_0 을 기준으로 주파수 오프셋을 포함하여 전달함수를 구하면 식 (2)와 같다.

$$H(e^{j(w_0 + \delta w)}) = (1 - \alpha e^{jw_0} e^{-j(w_0 + \delta w)})(1 - \alpha e^{-jw_0} e^{j(w_0 + \delta w)}) \quad (2)$$

$$= 1 - 2\alpha \cos(\delta w) + \alpha^2$$

위 식 (1), 식 (2)에서 알 수 있듯이, 각 설계 변수 α 와 w_0 는 Notch 깊이뿐만 아니라 폭에도 영향을 미치게 된다.

IIR Notch Filter의 전달함수는 식 (3)과 같다.

$$H(z) = \frac{(1 - re^{jw_0} z^{-1})(1 - re^{-jw_0} z^{-1})}{(1 - \alpha re^{jw_0} z^{-1})(1 - \alpha re^{-jw_0} z^{-1})} \quad (3)$$

$$= \frac{1 - 2r \cos(w_0) z^{-1} + r^2 z^{-2}}{1 - 2\alpha r \cos(w_0) z^{-1} + \alpha^2 r^2 z^{-2}}$$

식 (3)을 격자 필터 구조에 기초하여 나타내면 식 (4)와 같다.

$$H(z) = \frac{1 + (k_0 - k_0 k_1) z^{-1} + k_1 z^{-2}}{1 + (\alpha_0 - \alpha_0 \alpha_1) z^{-1} + \alpha_1 z^{-2}} \quad (4)$$

이 전달함수가 Notch Filter의 전달함수가 되기 위해서는 식 (5)와 식 (6)을 만족해야 한다.

$$\alpha_0(1 + \alpha_1) = \alpha k_0(1 + k_1) \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \alpha^2 k_1 \quad (6)$$

여기에서 α_1 은 Notch 폭, k_1 은 Notch 깊이와 관련이 있다. 이렇게 두 파라미터는 Notch Filter의 주파수 응답 특성을 조절할 수 있는 변수로 작용한다[11].

다음 [그림 4]는 FIR Notch Filter와 IIR Notch Filter의 주파수 응답을 비교한 결과이다.

그림 4. FIR Notch Filter와 IIR Notch Filter의 주파수 응답

[그림 4]와 같이 FIR Notch Filter와 비교하여 IIR Notch Filter의 주파수 특성이 좋게 나타남을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 식 (3)과 같은 전달함수를 이용해 Notch Filter를 연산한 후, 기존 무선 서비스 대역에서 사용하고 있는 대역에 필터를 적용함으로써 사용 대역과의 간섭을 줄이는 역할을 하게 된다.

2. 전력선 통신의 Notch Filter 국외 표준 규격

본 논문에서는 시뮬레이션 가능한 Notch Filter 표준 규격을 정하기 위해, 유럽 전력선 통신 표준인 ETSI TS 102 447 V1.1.1과 ETSI TS 102 578 V1.1.19에서의 Notch Filter 부분을 분석하였다.

ETSI에서 규정한 Notch Filter의 동작 타이밍은 [그림 4]와 같다.

그림 4. Notch Activation Timing(ETSI 규격)

Notching Information을 수신하면 Notch가 시작되는 시점부터 완료되는 시점까지는 1초 이내의 시간이 소요된다. 하지만, 데이터 정보 소통이 없거나 낮은 QoS가 요구되는 경우에는 Notching Information을 수신한 이후 최대 5분가량 지연이 가능하다는 내용이 규정되어 있다. 이는 데이터 소통이 없거나 QoS가 중요하지 않은 경우, Notching 동작이 이루어짐으로써 발생할 수 있는 효율성 및 안전성의 저하를 막기 위하여 규정되어 있다.

그림 5. Notch Filter의 특성

[그림 5]와 같이 Notch Filter는 Notch 되지 않은 주파수 대역과 적어도 23dB 이상의 레벨 차를 갖도록 규정하고 있으며, 최소 Notch 가능 Bandwidth는 ITU-R Radio Regulation의 주파수 할당에 의해 10kHz로 정해져 있다. PLT 성능과 EMC를 효과적으로 조율하기 위해 동시에 동작할 수 있는 최소한의 Notch Filter는 15개로, 이 동작 가능한 Notch Filter의 합이 Notch Bandwidth가 된다.

IV. 간섭 신호를 제거하기 위한 Notch Filter 적용 방안

광대역 전력선 통신을 위한 Notch Filter 모의실험을 위해서는 광대역 전력선 통신에 사용되는 변복조 방식을 고려하여 시스템을 구성하여야 한다. 현재 세계적으로 전력선 통신에 사용하는 변복조 방식은 OFDM 방식을 채택하고 있다. 이에 본 논문에서는 OFDM 신호를 기반으로 하여 간섭 신호를 제거하기에 알맞은 Notch

Filter 설계 방식을 제안하였다.

전력선 통신에 Notch Filter를 적용하여 기존 무선 서비스와의 간섭을 감소시킬 경우, 기존 무선 서비스가 사용하고 있는 채널 대역을 Notch Filter를 통해 제거하게 된다. 하지만, Notch Filter를 적용할 경우, 간섭 채널 대역을 사용하여 전송되던 전력선 통신의 통신 신호가 손실되는 현상이 발생하게 된다. 그리하여 본 논문에서는 기존 무선 서비스가 사용하는 대역을 알고 있다는 가정 하에, 그 채널을 선정하여 해당 채널의 신호를 제거한 후, 그 부분에는 통신 신호를 실어 보내지 않는 방식을 택하였다. 해당 채널에 신호를 제거하여 통신 신호를 전송하지 않지만, 전력선을 통해 통신 신호가 흐르는 동안 가변 임피던스와 신호 감쇠 등의 현상이 발생할 것을 고려하여 AWGN을 추가하여 발생하는 잡음에 Notch Filter를 적용하는 방법으로 시스템을 구성하였다.

1. 고려한 전력선 통신 시스템

시스템은 크게 신호 발생부와 채널 제거부로 나누어 지는데, 전력선 신호는 현재 국내에 할당되어있는 2~30MHz 대역을 사용하였으며, 간섭으로 작용하는 채널은 ETSI TS 105 578 V1.1.19에 배정되어 있는 HF Broadcasting Band를 적용하여 구성하였다.

표 1. OFDM 기반 전력선통신 시스템의 세부 Parameter

Parameter	Type I	Type II	Type III
System Clock(MHz)	40	26.6	13.3
Subcarrier No(Carrier)	1536	1536	1536
IDFT interval (Sample)	2048	2048	2048
IDFT interval(us)	51.2	76.8	153.6
Cyclic prefix(Sample)	800	532	268
Cyclic prefix(us)	20	19.95	20.1
Symbol interval(Sample)	2848	2580	2316
Symbol interval(us)	71.2	96.75	173.7

Type I : 30MHz Signal Bandwidth

Type II : 20MHz Signal Bandwidth

Type III : 10MHz Signal Bandwidth

[표 1]에서 Type I, II, III은 전력선 신호의 대역폭에 따라 나누어진다. 본 논문에서는 2~30MHz 대역으로 총 28MHz 대역을 적용하므로, Type I을 선정하였다. 각 Type은 10MHz 20MHz, 30MHz을 전력선 사용 대

역폭으로 규정하고, 그에 따라 System clock, IDFT interval, Cyclic prefix, Symbol interval등이 변화한다. 본 논문에서는 Type I에 규정된 내용을 기반으로 2k(2048)의 FFT size를 모의실험에 적용하였다.

ETSI에서 2~30MHz 대역 내의 전력선 통신 상에서 간섭으로 작용하는 HF Broadcasting Band는 총 15개의 채널로 구성되어 있다.

표 2. ETSI의 HF Broadcasting Band

CH	From(kHz)	To(kHz)	Bandwidth(kHz)
1	2300	2498	198
2	3200	3400	200
3	3900	4000	100
4	4550	4650	100
5	4750	5110	360
6	5750	6200	450
7	7100	7700	600
8	9300	9950	650
9	11550	12100	550
10	13550	13900	350
11	15050	15850	800
12	17400	17950	550
13	18900	19020	120
14	21450	21850	400
15	25670	26100	430

간섭 신호 채널은 2.3MHz에서 26.1MHz까지 존재한다. 대역폭은 최소 100kHz부터 최대 800kHz까지 분포하고 있다. 3, 4번 채널이 각각 100kHz 대역폭으로 가장 좁은 대역폭을 사용하며, 11번 채널이 800kHz로 가장 넓은 대역폭을 사용한다. [표 2]와 같이 간섭 채널의 대역폭 등의 정보가 균일하지 않으므로 이러한 정보를 고려하여 Notch Filter를 구성하여야 한다.

2. 간섭 신호 대역폭에 따른 Notch Filter 설계

각 채널의 대역폭에 알맞은 Notch Filter의 설계를 위해, [그림 6]에서 Notch Filter의 스펙트럼을 통해 확인해 보았다. 각 450kHz와 800kHz의 대역폭을 제거 가능한 Notch Filter를 설계하였다. Notch Filter의 통과대역 리플은 필터 설계에서 가장 엄격한 스펙으로 규정되어 있는 1dB로 설정하였다. 통과대역 리플을 크게 할수록 제거 대역부분의 필터 기울기가 가파르게 나타나 필터의 성능을 높일 수 있다.

그림 6. 간섭 채널 대역폭에 따른 Notch Filter 비교

800kHz 대역 제거 Notch Filter에 비해, 450kHz 대역 제거 Notch Filter의 경우가 Cutoff Slope가 가파르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 필터의 차이는 필터 가장자리의 기울기 외에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. -15dB까지는 800kHz Notch Filter가 450kHz Notch Filter보다 더 넓은 부분의 신호를 제거할 수 있는 것처럼 보이지만, 그 이하 레벨로는 제거 대역의 차이가 불분명하게 나타난다. 즉, 블록으로 표시된 안쪽의 신호가 모두 제거되어야 하지만, [그림 6]의 형태로 Notch Filter를 적용한다면, 제거해야 하는 채널 구간을 모두 제거할 수 없을 것으로 보인다.

본 논문에서는 이러한 상황을 고려하여 한 개의 채널 대역폭을 여러 개의 Notch Filter를 합산하여 제거하도록 하는 방법으로 각 채널 대역폭에 알맞게 필터의 단수를 조절하고, 그 Slope 계수 또한 조정하는 방식을 제안하였다.

V. 모의실험 및 분석

모의실험을 위한 시스템 흐름은 [그림 7]과 같다. 우선 ETSI 규정에 따라 Type I에 맞추어 OFDM 신호를 발생시키고, [표 2]의 간섭 채널들 중 제거하고자 하는 채널을 선정한다.

그림 7. 시스템 흐름도

시스템에서 그 채널 부분에 간섭이 존재한다는 것을 알고 있다는 가정 하에 그 부분의 신호를 제거하여 데이터를 신지 않은 채 전송한다. 잡음의 영향을 고려하기 위해 AWGN을 추가하여 발생하는 잡음부분에 Notch Filter를 적용하여 스펙트럼으로 결과를 확인한다.

1. OFDM 신호 발생 및 간섭 채널 선정

현재 고속 전력선 통신은 2~30MHz 대역을 할당하여 사용하고 있다. 향후 80MHz 대역까지 확장될 것이나, 본 논문에서는 2~30MHz 대역을 고려하여 [표 3]과 같이 파라미터 연산 후 OFDM 신호를 발생하였다.

표 3. OFDM Parameter

Parameter	Value
전체 대역폭	33.65MHz
유효 대역폭	28MHz
FFT size	2048
유효 부 반송파	1706
샘플 간격	16.432kHz

OFDM의 대역 효율은 83.2%로 하였고, FFT size는 [표 1]에 따라 2048로 정하였다. 대역 효율에 따라 유효 부 반송파를 정하였고, 유효 대역폭과 유효 부 반송파를 통해 각 샘플의 간격을 연산하였다.

[표 3]의 파라미터를 통해 OFDM 신호를 발생시킨 결과는 [그림 8]과 같다. 2MHz에서 30MHz 구간에 신호가 발생되었음을 확인 가능하다.

그림 8. OFDM 신호 발생 결과

모의실험 시 시스템에서 사용되고 있는 간섭 채널을 선정하여 해당 채널에 해당하는 대역폭을 제거하려면 FFT size에 맞는 각 샘플간의 간격을 알아야 해당 채널의 대역폭을 제거할 수 있기 때문에 간섭으로 작용하는 채널 파라미터의 연산이 필요하다. [표 3]에서 구한 각 샘플 간격인 16.432kHz를 바탕으로 간섭으로 작용하는 각 채널 정보에 해당하는 샘플 구간을 연산한 결과는 [표 4]와 같다.

표 4. 간섭으로 작용하는 채널 Parameter

CH	From(kHz)	To(kHz)	Bw(kHz)	Samples
1	2300	2498	198	140~152
2	3200	3400	200	195~207
3	3900	4000	100	237~243
4	4550	4650	100	277~283
5	4750	5110	360	289~311
6	5750	6200	450	350~377
7	7100	7700	600	432~469
8	9300	9950	650	566~606
9	11550	12100	550	703~736
10	13550	13900	350	825~846
11	15050	15850	800	916~965
12	17400	17950	550	1059~1092
13	18900	19020	120	1150~1157
14	21450	21850	400	1305~1330
15	25670	26100	430	1562~1588

OFDM 신호에 적용시킬 Notch Filter 연산을 위해 적절한 간섭 채널을 선정하였다. 선정된 채널은 4번 채널, 5번 채널과 11번 채널로 4번 채널은 100kHz의 좁은 대역폭을 사용하고, 5번 채널은 최소 대역폭인 100kHz와 최대 대역폭인 800kHz의 중간인 360kHz의 대역폭을 사용하며, 11번 채널은 최대인 800kHz의 대역폭을 사용한다. 또한, 4번 채널과 5번 채널은 채널 간격이 100kHz로 필터 사용 시 두 채널에 간섭이 있을 것으로 예상된다.

2. 간섭 채널 제거 결과 스펙트럼 분석

무선 통신 시스템의 경우, 한 번에 여러 채널 대역이 사용되는 형태를 지니게 된다. 여러 채널 대역이 동시에 간섭을 발생시킬 때, 그 간섭을 제어하는 것이 본 모의실험의 목적이므로, 앞 절에서 선정된 4번, 5번과 11번 채널이 사용되고 있다는 전제 하에 선정된 채널들을 동시에 제거하는 형태로 실험을 진행하였다.

간섭으로 작용하는 채널들을 제거한 결과는 [그림 9]와 같다.

블록으로 표시된 부분이 채널에 해당하는 신호를 제거한 부분이다. 평균적인 신호보다 약 40dB 가량 신호를 낮추었다. 이렇게 신호가 제거된 부분에는 데이터를 실지 않고 신호를 전송하게 된다.

그림 9. 4번, 5번, 11번 채널 신호 제거 결과

채널을 제거한 부분을 확대하여 원 신호와 비교하였다. 그림은 인접한 4, 5번 채널과 11번 채널로 분류하여 나타내었다.

그림 10. 4번, 5번 채널 신호 제거 결과

그림 11. 11번 채널 신호 제거 결과

채널 신호가 제거된 부분을 스펙트럼을 통해 확인할 수 있다. 채널이 제거된 부분 좌, 우에 별도로 표시된 부분은 샘플 간격 16.432kHz에 해당하는 부분으로써, 이 부분은 차후에 FFT size를 조정함으로써 제어 가능하다.

이렇게 채널 대역을 제거한 통신 신호가 전력선의 특성상 잡음의 영향을 받을 것을 고려하여 SNR을 10dB로 한 AWGN 신호를 추가하여 잡음의 정도를 확인하였다.

그림 12. 4번, 5번 채널 제거 + AWGN(SNR:10dB) 결과

그림 13. 11번 채널 제거 + AWGN(SNR:10dB) 결과

4번의 경우 채널 대역이 좁아 그 잡음의 정도가 크지 않지만, 5번 채널과 11번 채널의 경우에는 채널 대역이 넓어진 만큼 잡음 정도와 그 빈도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

채널 제거 전 신호와 비교하여 불규칙하게 레벨이 상승한 부분을 제거하기 위하여 Notch Filter를 적용하는데, 각 채널의 정보에 알맞게 설계한 Notch Filter의 형태는 [그림 14][그림 15]와 같다.

[그림 14]는 4번 채널 제거를 위한 Notch Filter의 모습을 나타낸 결과이다.

그림 14. 4번 채널 제거를 위한 Notch Filter

앞 절에서 설명하였듯이 하나의 필터로는 해당 채널 대역을 제거하는데 무리가 있으므로, 3개의 필터를 중첩하여 채널을 제거하는데 적용하였다. 하나의 필터는 총 42.728kHz 구간을 필터링 가능하며, 제거 레벨은 각 -27dB 가량이다. 이러한 Notch Filter를 20kHz 간격으로 배치하여, 4.548~4.663MHz까지 총 115kHz 대역을 제거 가능하다. 좌, 우에 표시된 구간은 앞에서 설정한

통과대역 리플 1dB 구간이며, 통과대역 리플 및 제거 대역의 해당 샘플은 그림에 표기되어 있다.

[그림 15]는 5번 채널의 잡음을 제어하기 위한 Notch Filter를 나타낸 결과이다.

그림 15. 5번 채널 제거를 위한 Notch Filter

5번 채널 제거를 위한 Notch Filter 하나의 경우, 총 160kHz 구간을 필터링 가능하며, 제거 레벨은 약 -32dB 가량이다. 이러한 필터를 각 90kHz 간격으로 3단 배치하여, 4.746~5.107MHz 까지 총 361kHz 대역을 제거 가능하다.

[그림 16]은 11번 채널의 잡음을 제어하기 위한 Notch Filter이다.

그림 16. 11번 채널 제거를 위한 Notch Filter

11번 채널 제거를 위한 Notch Filter 하나의 경우, 총 220kHz 구간을 필터링 가능하며, 제거 레벨은 약 -35dB 가량이다. 이러한 필터를 각 200kHz 간격으로

배치하여, 15.060~15.850MHz 까지 총 790kHz 대역을 제거 가능하다.

이렇게 각 간섭 채널에 알맞게 설계된 Notch Filter를 AWGN이 섞인 OFDM 신호에 적용한 결과는 [그림 17]과 같다. 앞의 결과와 마찬가지로, 결과 화면은 4번 채널과 5번 채널, 11번 채널을 분리하여 나타내었다.

그림 17. 4번, 5번 채널의 Notch Filter 적용 결과

4번과 5번 채널에 Notch Filter를 적용한 결과, 불규칙하게 나타났던 간섭 채널 제거 구간의 잡음들이 제거된 것을 확인할 수 있다.

그림 18. 11번 채널의 Notch Filter 적용 결과

하지만, 11번 채널의 경우 잡음의 제거 정도가 매우 미약하게 나타났다. 그 이유는 각 Notch Filter의 간격이 멀고, 그로인해 각 필터 대역의 사이에 해당하는 대역의 잡음이 제거되지 않아서 11번 채널과 같이 넓은 대역을 사용하는 경우에는 3개의 Notch Filter는 그 성능이 매우 낮게 나타났다.

이에 3단 Notch Filter는 넓은 채널 대역의 잡음을 제거하기에 알맞지 않은 것으로 판단되어 8단의 Notch Filter를 적용하였다.

그림 19. 11번 채널 제거를 위한 Notch Filter 확장

Notch Filter 하나가 총 100kHz 구간을 필터링 하도록 하였으며, 그 제거 레벨은 약 -32dB이다. 이러한 Notch Filter를 100kHz 간격으로 배치하여 3단 Notch Filter와 동일한 구간을 제거 가능하도록 설계하였다.

채널 잡음 구간에 8단 Notch Filter를 적용한 결과는 [그림 20]과 같다.

그림 20. 11번 채널의 8단 Notch Filter 적용 결과

3단의 Notch Filter를 적용한 결과보다 잡음 제거 특성이 좋게 나타남을 스펙트럼으로써 확인 가능하다.

3. Notch Filter 적용 결과의 BER 분석

앞에서는 Notch Filter와 OFDM 신호의 스펙트럼을 중심으로 그 성능을 분석하였으나, 통신 시스템에서 스

펙트럼을 통한 성능 확인에는 한계가 있다. 그리하여 본 논문에서는 BER로써 제안한 Notch Filter의 성능을 확인하였다.

BER 확인을 위한 시스템 흐름은 [그림 21]과 같다.

그림 21. BER 확인을 위한 시스템 흐름도

우선, OFDM 신호를 발생한 후, 간섭 채널을 선정하여 해당 채널의 신호를 제거하는 부분까지는 Time Domain 상에서 이루어지며, Frequency Domain으로 변환하여 AWGN을 추가하여 Notch Filter를 적용하고, 다시 Time Domain 상에서 수신 데이터를 복조하여 송신부와 수신부의 데이터를 비교, BER을 연산하는 방식을 적용하였다.

데이터 비교를 위하여 간섭 채널 선정 후, 해당 채널의 신호를 제거하여 AWGN을 추가하여 그대로 복조한 BER과 AWGN 추가 후 Notch Filter를 적용하여 복조한 BER을 비교하도록 하였다.

[그림 21]과 같은 시스템으로 구해진 각 채널의 BER은 [그림 22]와 같다.

그림 22. 4번 채널의 BER 그래프

4번 채널의 BER 그래프 확인 결과, SNR이 12dB 이상이 되면 Notch Filter를 적용한 경우의 BER 성능이 더 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 23. 5번 채널의 BER 그래프

5번 채널 또한, SNR이 12dB 이상이 되면 Notch Filter를 적용한 경우의 BER 성능이 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 외의 구간에서는 거의 동일한 BER 성능을 보인다.

그림 24. 11번 채널의 BER 그래프(3단 Notch Filter)

4번, 5번 채널과 동일한 방식으로 3단 Notch Filter를 적용한 BER 결과는 [그림 24]와 같다. SNR이 18dB 이상이 되면 Notch Filter를 적용한 경우의 BER이 성능이 좋게 나타났으나, 3단의 경우 스펙트럼에서 잡음이 잘 제거되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

11번 채널에 알맞게 설계된 8단 Notch Filter를 적용한 BER 그래프는 [그림 25]와 같다.

그림 25. 11번 채널의 BER 그래프(8단 Notch Filter)

[그림 25]의 그래프에서 보면 SNR 18dB까지 Notch Filter를 적용한 방식의 BER이 적용하지 않은 방식에 비해 성능이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 SNR이 18dB 이상이 되면 Notch Filter를 적용한 방식에서는 더 이상 Error bit가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

이렇게 11번 채널의 경우 3단과 8단의 Notch Filter 적용에 따라 차이가 있는데, 3단의 경우 주변의 대역에 영향을 덜 주는 대신에 잡음을 제대로 제거하지 못하고, 8단의 경우 잡음을 제거하는 대신에 주변 대역에 영향을 주게 된다. 하지만, Notch Filter의 사용 용도가 채널 구간의 잡음을 효과적으로 제거하는데 목적을 두고 있으므로, 800kHz와 같이 대역폭이 넓은 채널의 경우, 8단과 같이 확장된 Notch Filter를 적용하는 것이 효과적이라 볼 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 고속 전력선 통신과 기존 무선 서비스와의 간섭을 제거하기 위해 기존 무선 서비스가 사용하는 대역의 신호를 효과적으로 제거하기 위한 Notch Filter 설계 방식을 제안하였다. 현재 고속 전력선 통신에 할당된 주파수 대역인 2~30MHz와 변조방식인 OFDM을 적용하여 모의실험을 진행하였으며, 간섭 신호로 작용하는 무선 서비스의 사용 주파수 대역을 선택한 후, 그 부분의 신호를 제거하여 전력선 통신 신호를

전송하여 일차적인 간섭을 줄이고, 통신 선로로 사용되는 전력선의 높은 부하와 간섭현상, 변동하는 임피던스와 신호 감쇠 현상 등에 의해 발생하는 잡음을 Notch Filter로 제거하여 이차적인 간섭을 제어하는 방식으로 채널의 대역폭과 각 채널의 간격에 따라 Notch Filter의 단수 및 제거 대역폭을 조절하였다.

그 결과, 스펙트럼으로 선택 대역에 발생한 잡음이 제거되는 것을 확인하였고, BER 성능 또한 Notch Filter를 적용한 결과가 좋게 나타남을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 적용할 경우, 기존 무선 시스템과 전력선 통신 사이의 간섭을 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

Notch Filter의 경우, 제거 대역폭과 단수에 따라 제거 레벨과 기타 대역의 간섭 정도가 변하게 되는데, 이러한 대역폭과 단수를 조절하여 본 논문에서 사용한 채널 정보 외의 채널에서도 적용 가능할 것으로 보인다. 하지만, 제거 대역폭과 필터 중심 주파수에 따라 변하는 제거 레벨을 동일하게 해야 전력선 통신과 무선 통신 시스템의 간섭으로 인한 잡음을 제거하는데 더 나은 성능을 발휘할 수 있으므로, 제거 대역폭과 필터 중심 주파수에 따라 제거 레벨을 평준화 시키는 부분에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

고속 전력선 통신을 위해 현재 2~30MHz 대역에서 80MHz 대역까지 사용 대역을 확장할 경우, 고주파에서 더욱 커지는 표피 효과로 인해 방사 전파의 영향이 커지게 되므로, 이러한 영향을 줄이기 위한 간섭 및 잡음 제어에 대한 연구가 중요한 위치를 차지하게 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 장동원, 이영환, “전력선을 이용한 유비쿼터스 고속 데이터 통신 연구”, 주간기술동향 통권, 1367호, 2008(10).
- [2] N. Pavlidou, A. J. Han Vinck, and Y. Javad, “Power Line Communications: State of the Art and Future Trends,” IEEE Communications

Magazine, pp.34-40, 2003(4).

- [3] A. Majumder and J. Caffery, “Power Line Communications,” IEEE Potentials, Vol.23, Issue 4, pp.4-8, 2004.
- [4] Gilbert Held, *Understanding Broadband Over Power Line*, Auerbach Publication, 2006(5).
- [5] 정영화, “전력선통신기술 표준화 동향”, 전자공학회지, 제20권, 제1호, 2003(1).
- [6] 강영석, “전력선통신 동향과 상용화 전망”, 한국전자과학회지, 제15권, 제4호, 2004(10).
- [7] 안준오, *고속 전력선통신 도입을 위한 주파수 이용방안 연구*, 한국전파진흥협회, 2005(12).
- [8] 김철, *100kHz ~ 1MHz 대역용 전력선 통신 Filter 개발에 관한 연구*, (주)플레넷, 2001(12).
- [9] Miroslav Vlcek and Pavel Zahradnik, “Fast Analytical Design Algorithms for FIR Notch Filters,” IEEE Transactions on circuit and systems, Vol.51, No.3, pp.608-623, 2004(3).
- [10] 임덕원, 이견우, 박찬식, 황동환, 이상정, “GPS 수신기 간섭 제거를 위한 적응 IIR 노치필터 설계”, 전자공학회 논문지, 제44권, SC편, 제3호, 2007(5).
- [11] 최준원, 양윤기, 조남익, “DS-확산대역 시스템에서 격자형 IIR 노치필터를 이용한 협대역 간섭 신호 제거 알고리즘”, 한국통신학회논문지, Vol.26, No.4B, 2001(4).

저 자 소 개

이 현 소(Hyun-So Lee)

준회원

- 2008년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
 - 2008년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파공학과 석사과정
- <관심분야> : Cognitive Radio, 전자파신호 복원, 전력선 통신

이 영 환(Young-Hwan Lee)

정회원

<관심분야> : 전파감시, SDR, CR, MIMO-OFDM, DSA, UWB

- 1984년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1986년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업(석사)
- 2007년 2월 : 한국정보통신대학교 전자공학부 졸업(공학박사)

▪ 1989년 7월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 표준연구센터 책임연구원

<관심분야> : 전자장해석, 이동통신안테나, 무선설비 기술기준

장 동 원(Dong-Won Jang)

정회원

- 1983년 2월 : 한국항공대학교 항공통신공과(공학사)
- 2002년 2월 : 충남대학교 전파공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 충남대학교 전파공학과 박사과정 수료

▪ 1989년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 전파시스템, 통신시스템, 디지털신호처리, 프로토콜 공학

김 경 석(Kyung-Seok Kim)

정회원

- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)

▪ 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원

▪ 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사

▪ 2006년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 조교수