

## 전력선 통신에서 오버 샘플링과 Slew Rate 제한을 이용한 임펄스 잡음 제거 기법

오우진<sup>1\*</sup> · 나타라잔 발라<sup>2</sup>

### Mitigation of Impulse Noise Using Slew Rate Limiter in Oversampled Signal for Power Line Communication

Woojin Oh<sup>1\*</sup> · Bala Natarajan<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Professor, School of Electronics, Kumoh National Institute of Technology, Kumi, 39177, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Kansas State Univ. Manhattan, 66506 USA

#### 요 약

전력선 통신(PLC: Power Line Communication)은 저비용으로 고속 전송이 가능하여 스마트 그리드와 연계하여 다양하게 활용되고 있다. 그러나 전력선 채널은 임펄스 잡음으로 인하여 많은 문제가 있어 이를 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 아날로그 신호에 대한 비선형 필터에 적응형 clipping을 사용하는 ACDL (Adaptive Canonical Differential Limiter)이 제안되었다. 본 논문에서는 이의 특성을 분석하고 간략화하여 오버샘플링된 디지털신호에 대해 slew rate를 검출하는 방안과 유사함을 보였다. 제안된 방식은 모의 실험으로 PRIME 표준에서 성능을 검증하여 ACDL과 동일 수준 이상의 성능을 가지면서도 훨씬 간단히 구현이 가능한 장점을 확인하였다. BER 성능은 동등하면서도 복잡도는 10%이하로 줄어든다.

#### ABSTRACT

PLC(Power Line Communication) is being used in various ways in smart grid system because of the advantages of low cost and high data throughput. However, power line channel has many problems due to impulse noise and various studies have been conducted to solve the problem. Recently, ACDL(Adaptive Canonical Differential Limiter) which is based on an adaptive clipping with analog nonlinear filter, has been proposed and performs better than the others. In this paper, we show that ACDL is similar to the detection of slew rate with oversampled digital signal by simplification and analysis. Through the simulation under the PRIME standard it is shown that the proposed performs equal to or better than that of ACDL, but significantly reduce the complexity to implement. The BER performance is equal but the complexity is reduced to less than 10%.

**키워드** : 임펄스 잡음, 전력선통신, 오버샘플 신호처리, 슬루율, 제한기

**Keywords** : Impulse Noise, PLC, Oversampled Signal, Slew Rate, Limiter

Received 8 February 2019, Revised 16 February 2019, Accepted 26 February 2019

\*Corresponding Author Woojin Oh(E-mail:wjoh@kumoh.ac.kr, Tel:+82-54-478-7485)

Professor, School of Electronics, Kumoh National Institute of Technology, Kumi, 39177, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.4.431>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

전력선 통신(PLC: Power Line Communication)은 별도의 통신선을 구축하지 않고 전력선을 이용하여 저 비용으로 광범위하게 구축할 수 있는 장점이 있어 ITU와 IEEE에서 표준화되어 스마트 그리드로 다양하게 활용되고 있다. 특히 배전망 (NAN: Neighborhood Area Network), 덕내망(HAN: Home Area Network)을 위한 협대역과 광대역 통신 기술은 고속 통신이 가능하여 원격 검침, 홈 네트워크로 상용화 되고 있다 [1-2].

전력선 채널은 전자기기에서 발생하는 다양한 잡음원이 존재하기 때문에 대부분의 물리계층은 고속전송이 가능하면서도 간섭에 강한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 많이 사용하고 있다. 특히 냉장고, 전자레인지 등과 같은 고 전력 장치가 기동할 때 발생하는 주기적 임펄스 잡음(Periodic Impulsive Noise)은 문제가 심각하여 이에 대한 다양한 모델링과 연구가 진행되어 왔다 [3].

임펄스 잡음을 줄이기 위하여 일반적인 OFDM에서는 터보코드와 같은 강인한 부호화 방식이나 블록 인터리빙 등이 많이 제안되었으나 PLC와 같이 임펄스 잡음이 큰 환경에는 효과가 적다. 전력선 채널에서의 임펄스 잡음에 대한 개선 방안은 최근에 전통적인 비선형 방식인 clipping, blanking을 기반으로 다양하게 제시되고 있다 [4-6].

최근에는 아날로그 신호에 대하여 유사 평균인 tukey's 범위를 추종하여 적응형 clipping으로 임펄스 잡음을 제거하는 ACDL(Adaptive Canonical Differential Limiter)이 제안되었다 [7]. 이 방식은 비교적 우수한 성능을 보이고 있으나 아날로그 신호처리가 요구되어 실제 구현하기 어려운 문제가 있다.

본 논문에서는 ACDL을 분석하고 근사화하여 오버 샘플링 된 디지털 영역에서 처리하는 방식을 제안한다. 적응처리 clipping 대신에 신호의 slew rate에 따라 임펄스 신호를 검출 할 수 있음을 확인하고 이에 따라 고정 Limiter를 적용하여 간단히 하였다. 제안된 방식은 디지털로 쉽게 구현이 가능하며 PRIME 방식의 협대역 PLC 표준에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 기존보다 우수한 성능을 갖는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 II장에서 ACDL을 분석하고 이에 따른 근사화 방안을 설명한다. III장에서는 제안된 slew rate 로 임펄스 간섭을 검출하여 제거하는 방안을 설명한다. 마지막으로 IV장과 V장에서는 협대역 PLC인 PRIME에서 제안된 방식의 성능을 비교 평가 하고 결론을 맺겠다.

## II. ACDL 분석

ACDL은 적응형 비선형 필터로 OFDM 기반의 PLC에 적용하면 그림 1과 같다[7]. 그림 1은 ACDL을 전형적인 OFDM방식의 PLC통신에 적용한 것이며 그 특성상 정합 필터가 미분된 형태가 더해지므로 이를 보상하도록 정합필터를 수정해야 한다. 그림 2는 ACDL의 세부 블록도이다. 수신된 신호의 차분 값에 대하여clipping을 수행하는 CMTF(Clipped Mean Tracking Filter)는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\chi(t) = \frac{1}{\tau} C_{\alpha}^{\alpha+}[x(t) - \chi(t)] \quad (1)$$

여기서 함수  $C_{\alpha}^{\alpha+}(x)$ 는 clipping을 수행하는 함수로 다음과 같이 정의된다.

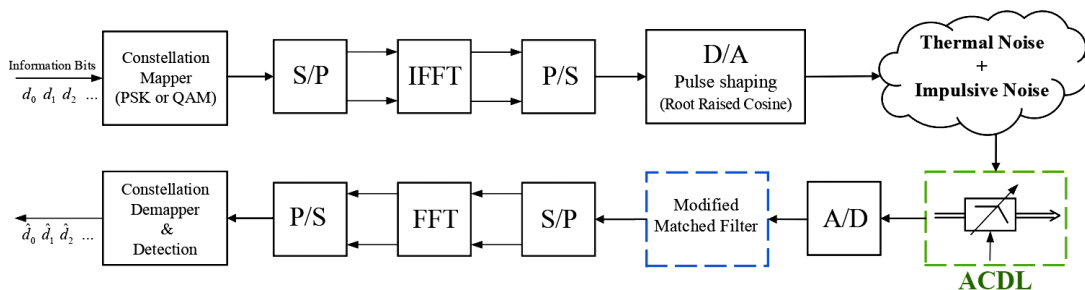


Fig. 1 Block diagram of typical PLC system with ACDL [7]

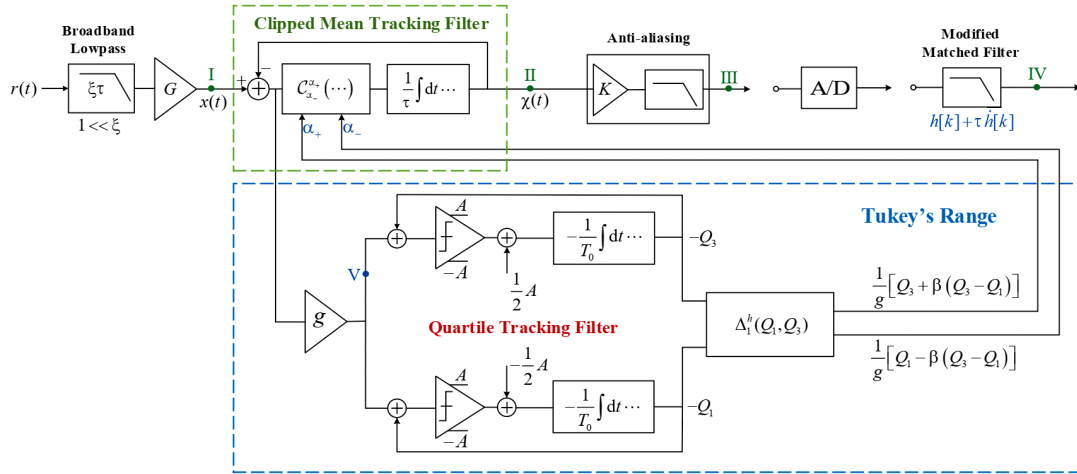


Fig. 2 Structure of ACDL [7]

$$C_{\alpha_{-}}^{\alpha_{+}}(x) = \begin{cases} \alpha_{+} & \text{for } x > \alpha_{+} \\ \alpha_{-} & \text{for } x < \alpha_{-} \\ x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

클리핑에 적용되는 문턱값  $\alpha_{+}, \alpha_{-}$ 는 QTF(Quartile Tracking Filter)에서 구해지는 Tukey의 범위에서 첫 번째( $Q_1$ )와 세 번째( $Q_3$ ) quartile 값에서 결정된다.

$$[\alpha_{+}, \alpha_{-}] = [Q_1 - \beta(Q_3 - Q_1), Q_1 + \beta(Q_3 - Q_1)] \quad (3)$$

여기서  $\beta$ 는 상수이다. CMTF에서 문턱값에 따라 blanking이나 clipping 등을 적용할 수 있으며 식 (2)는 clipping의 경우이며, 참고로 다른 임펄스 제거 방식과 동일하게 blanking이 더 우수한 성능을 보이고 있다.

Tukey의 범위를 연산하는 것은 입력 신호의 차분 값에 대하여 QTF에서 신호의 크기를  $\pm A$ 의 범위에 있는 신호에 대하여 적분하여  $Q_1$ 과  $Q_3$ 가 구해지며, 이는 각각 1/4과 3/4으로 수렴하는 것으로 알려져 있다. 이때  $A$ 는 신호보다 큰 값 중에서 임펄스를 제거하도록 적절히 작은 값으로 설정해야 한다. 입력 신호의 크기가 변하면 quartile 값이 변화하게 되어 식 (3)으로부터 clipping 범위가 적응 형태로 변화한다. 임펄스 잡음 신호는 순간적인 값이므로 적분 시간  $T_0$  동안에 적은 영향을 미치며 크기 또한  $\pm A$ 로 제한될 것이다. 이때  $T_0$ 는 신호의 주기보다 충분히 크게 하여 임펄스 잡음에 의한 급격한 변화를 줄여야 한다. 참고로 본 논문에서는  $\beta=3$ ,

$T_0 = 100/BW$ ,  $A = \sqrt{2} \max[|x(t)|]$ 로 설정하고 아날로그 신호는 80배 오버샘플링을 한 디지털신호로 구현하였다.

### III. Slew rate기반의 간섭제거 기법

ACDL은 차분신호에 대하여 적분 구간인  $T_0$ 와 문턱값  $\pm A$ 를 적절히 설정하여 신호의 quartile 값을 추정하여 적응 limiter를 수행하는 것이다. 즉 이동 적분으로 신호의 상위 구간과 하위 구간으로 나누어 처리하고 이를

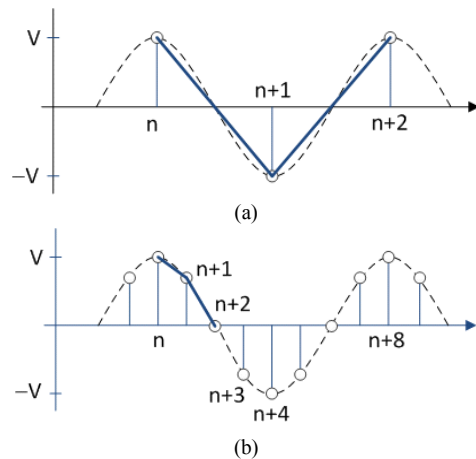


Fig. 3 Signals with the sampling rate of (a)  $2f_{BW}$  (b)  $8f_{BW}$

변어나는 신호는 임펄스 잡음으로 간주하여 차단하는 기법으로 일종의 신호 모양을 tracking하는 것이다.

이를 디지털 영역에서 살펴보자. 입력 신호는 대역제한된 신호이므로 시간 영역에서 최대 변위는 한정된다. 그림 3에서 보는 바와 같이 나이퀴스트 표본화율인 경우와 4배 오버샘플링한 경우를 비교해보자. 신호 크기가  $V$ 인 경우 1배 표본화 한 경우에는 이산 신호간의 변위는 최대  $\pm 2V$ 가 되지만, 4배 표본화인 경우  $\pm 0.5V$ 로 줄어들게 된다. 표본화를 더 높이면 이 값은 더 작아지게 된다.

시간 영역에서의 변위는 그림 4와 같이 SR(Slew Rate)를 사용하여 표현이 가능하다. SR은 OP Amp에서 사용하는 파라미터로 단위시간에 대한 전압의 변위로 정의되며 다음과 같이 신호의 대역폭과 밀접한 관계를 갖는다 [8].

$$SR = \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} = 2\pi fV \quad (4)$$

여기서  $f$ 는 신호의 주파수,  $x(t) = V\cos\omega t$ ,  $V$ 는 신호 크기이다. ACPL은 차분 신호에 대하여 QTF로 신호의 범위를 추적하여 클리핑의 한계 값을 설정하지만 제안된 방식은 slew rate로 정상 범위를 벗어나는 지 검출할 수 있을 것이다. 임펄스 잡음은 광 대역신호이므로 크기 변화가 원하는 신호보다 훨씬 큰  $f$ 와  $V$ 를 갖게 된다. 따라서 다음과 같이 문턱 값을 설정할 수 있다.

$$SR_{Th} = 2\pi\beta f_{BW} \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 상수이며  $f_{BW}$ 는 신호원의 대역폭이며 신호 크기는 정규화 되었다고 가정하였다. 이때 이산 신호 영역에서는  $f_s$ 로 표본화 되므로 오버샘플링 비율 (OF: Oversampling Factor)에 따라 결정된다.

$$SR_{Th, D} = \frac{2\pi\beta f_{BW}}{2\pi f_s} = 0.5\beta \frac{1}{OF} \quad (6)$$

이산 시간에서는 식 (4)의 SR의 미분이 차분이 되며, PRIME방식의 PLC신호에  $E_b/N_0=0\text{dB}$ 와  $10\text{dB}$ 의 가산 백색 잡음과 SIR(Signal-to-Impulse noise Ratio)=20dB의 임펄스 잡음이 있는 경우를 구하면 그림 4와 같다. 이는 적은 SIR에서도 충분히 검출이 가능한 것을 확인할 수 있다.

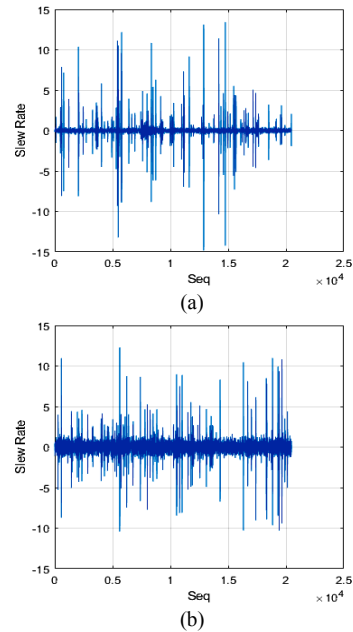


Fig. 4 Slew rate of SIR=20dB when  $E_b/N_0$  is (a) 0dB (b) 10dB.

제안된 시스템은 그림 5처럼 입력신호를 오버샘플링 영역에서 처리하도록 광대역 필터와 고속 ADC를 구성된다. 한계 문턱 값인  $SR_{Th}$ 에 따라 임펄스 간섭을 검출한 후에 Clipping이나 Blanking으로 잡음을 제거한 후에 디지털 수신기에 적합하도록 다운 샘플링하게 된다. 그림 4는 16배 오버샘플링과 8배의 대역폭에서 실험한 결과이다.



Fig. 5 Block diagram of the proposed algorithm

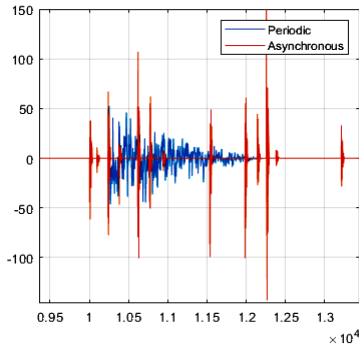


Fig. 6 Example of periodic cyclostationary noise and asynchronous impulsive noise

#### IV. 모의실험과 구현

모의실험은 논문 [7]에서와 동일하게 PRIME 표준의 OFDM 기반 PLC에 대하여 수행하였다. 사용된 파라미터는 표본화 주파수  $f_s = 250$  kHz, FFT 길이  $N = 512$ 로 부 반송파 간격은 488Hz이 된다. 잡음은 가산 백색잡음에 주기적인 주기정상성 잡음(periodic cyclostationary noise)과 비동기 임펄스성 잡음(asynchronous impulsive noise)을 적용하였다. 주기정상성 잡음은 교류 전력선의 2배 주파수인 120Hz에서  $\tau_{cs} = 200\mu s$ 로 감쇄하며 비동기 임펄스 잡음은 포아송 분포에  $\tau_{as} = 2\mu s$ 인 랜덤 임펄스로 설정했다. 그림 6에 임펄스 잡음의 예를 보였으며 서로 다른 특성을 확인할 수 있다.

제안된 방식을 모의실험하기 위하여 임펄스 잡음이 충분히 표현되도록 16배 오버샘플링에 12bit ADC로 가정하였으며 광대역 필터는 8배의 대역폭으로 하였다. SIR을 0~20dB로 변화하면서 수신단의 비트오류율(BER: Bit Error Rate)로 성능을 관찰하였다.  $E_b/N_0$ 는 가산 백색잡음만으로 산출하였으며 비교 대상으로 다음과 같이 구성하였다.

##### 방법 1) 임펄스 잡음 정보를 사용한 Limiter

사전에 임펄스 정보를 모두 알고 있다고 가정하여 그 크기에 따라 해당 위치의 신호를 blanking하는 방식. 임펄스 크기가 3이상 인 경우에 blanking을 적용하였으며 이보다 작은 크기로 설정하는 경우에는 오히려 성능이 나빠짐.

##### 방법 2) ACDL

논문 (7)에서 제안된 아날로그 신호처리를 80배 오버 샘플링해서 모의실험.

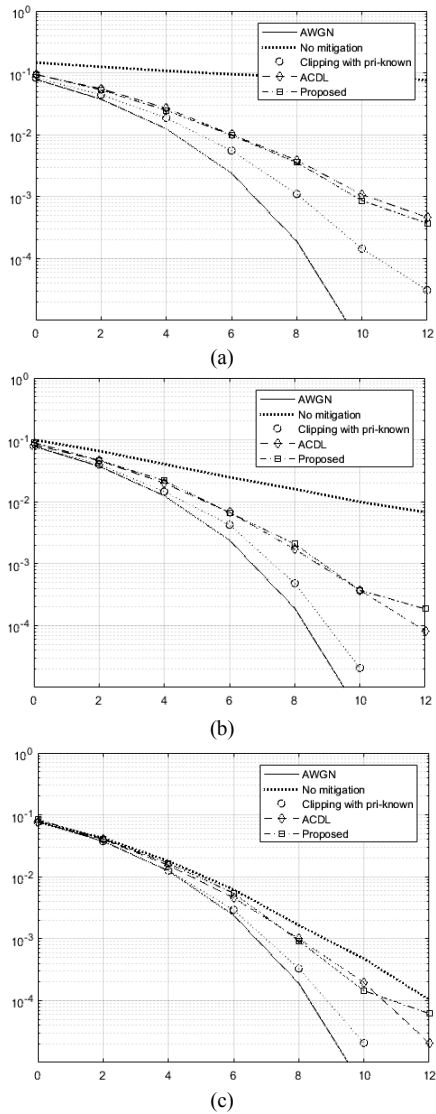


Fig. 7 BER performance under impulsive and periodic impulse noise of (a) SIR=0dB, (b) 5dB, and (c) 10dB

방법 3) 제안된 slew rate 검출 방식

제안된 slew rate 검출 방식을 적용하였으며  $SR_{Th}$ 는 8이상을 사용했으며, 넓은 폭의 임펄스인 경우 첨두치 근처에서 낮은 SR을 가질 수 있으므로 이를 검출하기 위하여 4개 이하의 고립된 비 검출 값도 모두 blanking으로 처리. 주기적인 주기정상성 잡음은 군집되고 작은 SR을 갖고 있어  $SR_{Th} = 2$ , 비 검출된 연속 값이 8개 이하의 고립된 신호를 blanking 처리.

그림 7은 비동기 임펄스 잡음만 있는 경우이고 그림 8은 주기정상성 잡음까지 모두 있을 때의 실험 결과이다. SIR=0, 5, 10dB일 때 PRIME 방식의 OFDM 기반 협대역 PLC에서 BER 성능을 구한 것이다. 실선은 임펄스 잡음이 없는 AWGN의 결과이고 가장 위에 있는 굵은 점선은 임펄스 잡음 제거를 하지 않은 경우의 성능이다. 앞서 언급한 3가지 방법 중에서 임펄스 위치를 알고 처리하는 blanking방식이 가장 좋은 결과를 보이고 있으며 ACDL과 제안된 slew rate 방식은 동일한 결과를 보이고 있다. 이는 제안된 방식이 ACDL의 동작을 분석하여 디지털로 근사화한 것이므로 동등한 성능을 갖는 것이 당연하다.

비동기 임펄스 간섭만 있는 그림 7을 보면 제안된 방식의 성능이 이상적인 값과 근사하여 임펄스 잡음의 검출이 정확히 이루지는 것으로 보인다. 그러나 주기정상성 잡음까지 포함한 경우에는 제안된 방식이나 ACDL 모두 이상적인 값과 다소 차이가 발생하고 있다. 이는 주기정상성 잡음이 비동기 임펄스 잡음에 비해 상당히 긴 시간동안 천천히 감쇄하므로 이의 영향을 받은 것이다. 이 구간을 임펄스 간섭으로 판정하여 blanking 하면 성능이 감소되는 것이다.

본 논문에서 제안한 slew rate 검출 방식은 기존의 ACDL과 동등한 성능을 가지면서도 훨씬 간단히 구현이 가능하다. ACDL은 아날로그 적응필터를 기반으로 하고 있기 때문에 이를 구현하려면 아날로그 집적회로나 80배의 고속의 디지털 신호로 근사화하는 것이 필요하다. 제안된 알고리즘은 8~16배 오버샘플링을 사용하므로 기존 방식보다 1/10의 ADC 속도로 구현이 가능하므로 10%의 복잡도를 갖는다고 추정하였으며 실제 구현은 단순한 차분과 윈도우 영역에서의 판정만이 필요하므로 더 감소될 수 있을 것으로 예상된다.

V. 결론

최근 표준화되어 상용화되고 있는 PLC 방식 중에서 OFDM 기반의 방식에 적합한 임펄스 간섭을 줄이는 방안을 제시하였다. 전력선 채널에서 발생하는 비동기 임펄스성 간섭과 주기정상성 잡음을 고려하였으며, 기존의 최신 연구인 ACDL을 분석하여 이보다 훨씬 간단하면서도 우수한 성능의 slew rate 검출 방식을 제안했다.

기존의 ACDL은 아날로그 신호에 대하여 clipping 값을 적응적으로 추정하는데 반하여 제안된 방식은 16배 오버샘플링 된 이산신호에 간단한 차분과 limiter로 구현이 가능한 장점이 있다. PLC의 북미 표준인 PRIME 규격에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 동등한 성능을 갖고 있음을 확인했으며 복잡도는 10% 이하로 대폭 줄어들 것으로 예상된다.

임펄스성 잡음에 대해서는 사전에 임펄스 잡음 정보를 모두 알고 처리하는 최대 성능치에 근사한 결과를 보여 주지만, 주기정상성 잡음에 대해서는 다소 성능 차이가 있다. 이는 주기정상성 잡음이 비동기 임펄스에 비하여 폭이 넓고 감쇄기가 길어 긴 시간동안 잔류하기 때문이다. 향후 연구 주제로 적응형 구조로 확장하는 방안을 진행 중에 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was supported by Research Fund, Kumoh National Institute of Technology

REFERENCES

[ 1 ] IEEE Std 1901.2-2013, *IEEE Standard for low-frequency (less than 500 kHz) narrowband power line communications for smart grid applications*, IEEE, New York, 2013.  
 [ 2 ] H. Kim, and S. Kang, "A Powerline-based Legacy-line Communication System for Implementation of a Communication Network in Ship," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 8, pp. 1831-1838. Aug. 2015.  
 [ 3 ] J. A. Cortes, L. Diez, F. J. Canete, and J. J. Sanchez-Martinez, "Analysis of the indoor broadband power-line noise scenario," *IEEE Transactions on Electromagnetic*

- Compatibility*, vol. 52, no. 4, pp. 849-858, Nov. 2010.
- [ 4 ] S. V. Zhidkov, "Analysis and comparison of several simple impulsive noise mitigation schemes for OFDM receivers," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 56, no. 1, pp. 5-9, Jan. 2008.
- [ 5 ] T. Shongwe, A. J. H. Vinck, and H. C. Ferreira, "The effects of periodic impulsive noise on OFDM," in *proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, Austin, TX, pp. 189-194. 2015.
- [ 6 ] Y. C. Kim, J. N. Bae, and J. Y. Kim, "Novel noise reduction scheme for power line communication systems with smart grid applications," in *proceedings of 2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, pp. 791-792. 2011.
- [ 7 ] R. Barazideh, A. V. Nikitin, and B. Natarajan, "Practical implementation of adaptive analog nonlinear filtering for impulsive noise mitigation," in *proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, pp. 1-7, 2018.
- [ 8 ] Op-Amp/Comparator Application Note: Operational amplifier, comparator (Tutorial), ROHM Co., Ltd., pp. 30, Mar. 2018. [Internet]. Available: [http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/amp\\_linear/common/opamp\\_comparator\\_tutorial\\_appli-e.pdf](http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/amp_linear/common/opamp_comparator_tutorial_appli-e.pdf)



**오우진(Woojin Oh)**

1996년: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)  
 1996년~1998년: SK 텔레콤 중앙연구원 (신임연구원)  
 1998년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 (교수)  
 ※ 관심분야: 신호처리, DSP 및 FPGA 시스템 설계 및 구현, 차량용 레이더 신호처리



**나타라잔 발라(Bala Natarajan)**

2002년: 콜로라도 주립대학교 전자공학 (공학박사)  
 2018년: 캔자스 주립대학교 통계학 (박사)  
 2012년~현재: 캔자스 주립대학교 (교수)  
 ※ 관심분야: 통계적신호처리, 최적화 및 네트워크 제어