

직교주파수분할다중화 통신 시스템을 위한 압축 센싱 기반 임펄스 잡음 및 클리핑 잡음 감쇄 기법

서영훈*, 최병조^o

A Reduction Scheme of Impulse and Clipping Noises Based on Compressed Sensing for OFDM Communication Systems

Young-Hun Seo*, Byoung-Jo Choi^o

요약

OFDM 기반 통신시스템에서 압축 센싱을 단계적으로 적용하여 임펄스 잡음과 클리핑 잡음을 제거하는 방법을 제안한다. 이 방법은 1단계로 적응적 임계값을 적용한 블랭킹 기법을, 2단계 및 3단계에서 압축 센싱 기법을 반복적으로 적용하며 판정 궤환을 통해 비트 오류율을 점차 감소시킨다. 임펄스 잡음 채널에서 모의실험결과 비트 오류율이 10⁻⁵일 때 4.5dB의 SNR 이득을 얻을 수 있었다.

Key Words : OFDM, Impulse Noise, Clipping Noise, Compressed Sensing, Adaptive Thresholding

ABSTRACT

A compressive sensing based iterative scheme for reducing both the impulsive noise as well as the clipping noise is proposed for OFDM-based communication systems. Nonlinear blanking using adaptive thresholds is used in the 1st stage followed by two consecutive compressive sensing based detection with the aid of decision feedback for

reducing the BER gradually. Our simulation results revealed an SNR gain of 4.5dB at the BER of 10⁻⁵.

I. 서론

OFDM은 다중반송파를 이용하여 데이터를 전송하는 효율적인 변조 방식이다. 그러나 OFDM 신호는 높은 첨두 전력 대 평균전력비(PAPR)를 갖기 때문에 RF증폭기의 전력 효율을 향상시키기 위해 신호의 크기를 제한하는 클리핑 기법이 자주 이용된다. 이러한 클리핑은 신호 왜곡을 유발하고 비트오율을 증가시킨다. 이 문제를 해결하기 위해 압축 센싱 방식을 사용하여 클리핑 잡음을 줄이는 방법이 제안되었다.^[1] 한편, 어떤 통신채널들은 임펄스 잡음이 수반되며, 이 경우 전체 전송 오류가 더 증가하게 된다. 본 논문에서는 압축 센싱을 단계적으로 사용하여 임펄스 잡음과 클리핑 잡음을 함께 제거하는 방법을 제안한다.

II. 적응 임계값 기반 임펄스 잡음 제거

OFDM방식은 다중 반송파를 이용해 디지털 데이터를 전송하는 방식이다. 시간 영역의 OFDM 신호 $x(t)$ 는 높은 PAPR 값을 갖는다. 이 신호의 최대값을 A 로 제한하는 클리핑 동작^[1]은 다음과 같다.

$$\bar{x}(t) = \begin{cases} x(t), & |x(t)| \leq A \\ Ae^{j\angle x(t)}, & |x(t)| > A \end{cases} \quad (1)$$

클리핑 비율 γ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\gamma = \frac{A}{\sqrt{E\{|x(t)|^2\}}} \quad (2)$$

한편, 클리핑이 적용된 송신신호 $\bar{x}(t)$ 는 원 신호에 클리핑 잡음 $c(t)$ 가 부가된 $\bar{x}(t) = x(t) + c(t)$ 로 나타낼 수 있다^[1].

임펄스 잡음 채널은 많은 경우 이항 가우시안 모델로 나타낼 수 있으며, 이 경우 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \bar{x}(t) + (1-b)n_g(t) + bn_i(t) \quad (3)$$

* 이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음

• First Author : Incheon National University, Department of Embedded System Engineering, yhseo@inu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Incheon National University, Department of Embedded System Engineering, bjc97r@inu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2016-11-339, Received November 4, 2016; Revised November 27, 2016; Accepted November 28, 2016

여기서 b 는 0 또는 1의 값을 갖는 확률 변수로 1을 갖을 확률은 λ_1 로 나타낸다. 또한, $n_g(t)$ 는 $N(0, \sigma^2)$ 분포를 갖는 AWGN 성분이고, $n_i(t)$ 는 임펄스 성분으로 $N(0, \kappa\sigma^2)$ 의 분포를 따른다. 채널에 따라 κ 는 $10^2 \sim 10^4$, λ_1 은 $10^{-2} \sim 0.1$ 의 값을 갖는다.

임펄스 잡음을 검출하고 제거하기 위해 k -번째 수신 심볼 y_k 에 다음과 같이 적응 임계값 T_{BN} 을 적용한 블랭킹 기법을 적용하여 \tilde{y}_k 를 구한다.^[2]

$$\tilde{y}_k = \begin{cases} y_k, & \text{if } |y_k| < T_{BN} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

적응 임계값 T_{BN} 은 m 개의 OFDM 심볼로부터 구할 수 있으며 구체적인 방법은 참고문헌 [2]에 제시되어 있다. 그러나 이 방식은 클리핑 잡음을 함께 제거하기 힘든 단점이 있다. 그러므로 본 논문은 임펄스 잡음과 함께 클리핑 잡음도 제거하기 위해 압축 센싱을 적용하는 방안을 제시하고자 한다.

III. 압축센싱 기반 임펄스 및 클리핑 잡음 제거

압축 센싱을 통해 희소 벡터를 효과적으로 압축 및 복원할 수 있다는 것이 알려져 있다. 압축 센싱을 적용한 시스템 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad (5)$$

식(5)에서 Φ 는 측정 행렬, \mathbf{x} 는 이미지나 특정한 신호, Ψ 는 변환 행렬, $\Theta = \Phi\Psi$ 인 센싱 행렬, \mathbf{s} 는 희소 벡터를 나타낸다. 송신 신호 \mathbf{x} 는 기저벡터로 구성된 변환 행렬을 이용하여 희소 벡터로 분해 할 수 있다고 가정한다.

압축 센싱 기법에서는 측정값 \mathbf{y} 와 센싱 행렬 Θ 를 이용해 희소 벡터 \mathbf{s} 를 복원하기 위해 다음과 같이 L_1 -노름(norm)을 최소화하는 희소 벡터를 찾는다.^[3]

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min \|\mathbf{s}'\|_1 \quad (6)$$

그러나 식 (6)의 해를 직접 얻는 것은 복잡도가 매우 높기 때문에, 탐욕 알고리즘을 사용하는 OMP, IHT, SP 등이 사용된다. 식 (5)의 경우는 잡음이 없는 이상적인 환경을 가정하였지만 실제 통신 시스템에서는 잡음이 발생하기 때문에 다음과 같이 측정값을 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y} = \Theta \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (7)$$

한편, 클리핑 및 임펄스 잡음 채널을 가정한 OFDM 통신 환경에서 수신신호 벡터 \mathbf{y} 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}^* \mathbf{X} \mathbf{c} + \mathbf{n}_g + \mathbf{n}_i \quad (8)$$

식 (8)에서 \mathbf{F}^* 는 $N \times N$ IDFT 행렬이며, \mathbf{X} 는 주파수 영역의 송신 심볼, \mathbf{c} 는 클리핑 잡음, \mathbf{n}_g 는 가우시안 잡음, \mathbf{n}_i 는 임펄스 잡음을 나타낸다.

우선, 임펄스 잡음을 검출하기 위해 적응 임계값을 사용하여 블랭킹을 적용한 신호 $\tilde{\mathbf{y}}$ 로부터 1차 심볼 검출을 통해 $\hat{\mathbf{X}}$ 을 구한다. 그 다음으로는 임펄스 잡음 검출 정확도를 높이기 위하여 결정 계환을 통해 신호 성분을 다음과 같이 제거해 준다.

$$\mathbf{F} \mathbf{y} - \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{N}_g + \mathbf{F}(\mathbf{c} + \mathbf{n}_i) \quad (9)$$

식 (7)과 (9)를 비교할 때 $\mathbf{c} + \mathbf{n}_i$ 는 희소 벡터에 해당하며, $\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{N}_g$ 는 잡음에 해당하고, $\mathbf{F} \mathbf{y} - \hat{\mathbf{X}}$ 는 압축 센싱을 통한 측정값으로 볼 수 있다. 만약 $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}}$ 이면 식 (9)의 심볼값은 원점 근처에 위치하게 된다. 참고문헌 [1]은 압축 센싱을 적용하여 희소벡터를 검출하기 위한 조건으로 $\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}}$ 인 확률이 80% 이상이어야 한다는 실험결과를 보고하고 있다. 따라서, 전체 N 개의 샘플 가운데 절대값이 1 이하인 샘플이 80% 이상인 경우에만 $M = 0.8N$ 개의 샘플을 선택하여 압축 센싱을 적용하였다. M 개의 샘플을 선택하기 위한 부분 항등행렬 $\mathbf{S}_1 = \mathbf{I}_{M \times N}$ 을 식 (9)에 곱해주면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{S}_1(\mathbf{F} \mathbf{y} - \hat{\mathbf{X}}) = \mathbf{S}_1\{\mathbf{F}(\mathbf{c} + \mathbf{n}_i) + \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{N}_g\} \\ &= \Theta \mathbf{s}_f + \mathbf{N}_g + \mathbf{N}_s \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 $\Theta = \mathbf{S}_1 \mathbf{F}$ 는 부분 푸리에 행렬인 센싱 행렬이며, $\mathbf{s}_f = \mathbf{c} + \mathbf{n}_i$ 는 희소 벡터에 해당되고, \mathbf{N}_g 는 가우시안 잡음, $\mathbf{N}_s = \mathbf{S}_1 \times (\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}})$ 는 심볼 검출 오류에 의한 잡음에 해당한다. 따라서 $\hat{\mathbf{y}}$ 과 Θ 를 이용하여 OMP 알고리즘을 적용하면 \mathbf{s}_f 중에서 상대적으로 전력이 큰 요소의 잡음 추정 성분에 해당하는 $\hat{\mathbf{n}}_1$ 를 복원할 수 있다. $\hat{\mathbf{n}}_1$ 을 식 (8)에서 제거하면 다음과 같다.

$$y - \hat{n}_1 = F^* X + (c + n_g + n_i - \hat{n}_1) \quad (11)$$

남아있는 임펄스 잡음 및 클리핑 잡음을 제거하기 위하여 식 (11)로부터 2차 심볼 검출을 통해 \tilde{X} 를 구한다. 마찬가지로 잡음 검출 정확도를 높이기 위해 결정 계환을 통해 신호 성분을 제거해 준다.

$$F(y - \hat{n}_1) - \tilde{X} = X - \tilde{X} + N_g + F(c + n_i - \hat{n}_1) \quad (12)$$

식 (9)과 마찬가지로 $c + n_i - \hat{n}_1$ 는 희소 벡터에 해당하며, 2차 심볼 검출 여러 성분인 $X - \tilde{X}$ 와 N_g 는 잡음에 해당하고, $F(y - \hat{n}_1) - \tilde{X}$ 는 측정값이다. 이제, 식 (12)를 통해 얻어진 N 개의 샘플 가운데 참고문헌 [1]에 제시된 방법을 이용하여 $M = 0.8N$ 개의 샘플을 선택하여 압축 센싱을 적용한다. 구체적으로 M 개의 샘플을 선택하기 위한 부분 항등행렬 $S_2 = I_{M \times N}$ 을 식 (12)에 곱해주면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{y} &= S_2 \{ F(y - \hat{n}_1) - \tilde{X} \} \\ &= S_2 \{ X - \tilde{X} + N_g + F(c + n_i - \hat{n}_1) \} \\ &= \Theta s_c + N_s + N_g \end{aligned} \quad (13)$$

마찬가지로 \hat{y} 과 Θ 를 이용하여 OMP 알고리즘을 적용해 \hat{n}_2 을 복원하고 제거하면 다음과 같다.

$$y - \hat{n}_1 - \hat{n}_2 = F^* X + (c + n_i - \hat{n}_1 - \hat{n}_2 + n_g) \quad (14)$$

따라서 추정 임펄스 잡음과 클리핑 잡음이 제거된 식 (14)에 DFT 행렬 F 를 곱하면 최종적인 3차 심볼 검출을 수행할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

제안된 방법의 성능을 고찰하기 위해 부반송파의 개수 $N=128$ 이고 QPSK 변조를 적용한 OFDM신호를 임펄스 잡음 채널을 통해 전송하는 모의실험을 실시하였다. 임펄스 잡음의 파라미터는 λ_1 은 0.01, κ 는 100의 값을 적용하였다. 적응 임계값을 위한 OFDM 심볼의 수 m 은 500개로 설정해 주었다^[2].

그림 1은 기존의 기법 및 제안 기법의 BER 성능을 도시한 것이다. 적응 임계값만을 적용한 그래프 E에서 BER이 10^{-5} 일 때 1dB의 SNR 이득을 관찰할 수 있다. 추가로 압축 센싱을 사용하여 잡음을 추정 및

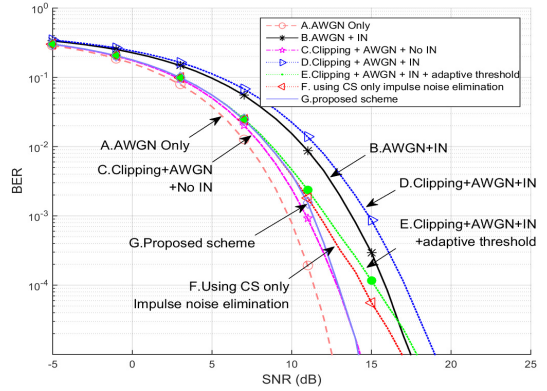


그림 1. 제안 방식의 BER 성능 비교
Fig. 1. BER performance comparison of each case

제거하여 얻은 그래프 F는 추가로 1dB의 SNR 이득을, 반복하여 잡음을 제거하여 얻은 그래프 G는 4.5dB의 SNR 이득을 나타내고 있다.

V. 결론

본 논문은 클리핑을 적용한 OFDM 신호를 임펄스 잡음 채널을 통해 전송하는 경우, 적응 임계값을 통해 임펄스를 확인하고 압축 센싱 방법을 통해 클리핑 잡음과 임펄스 잡음을 반복적으로 제거하는 방식을 제안하였다. 모의실험결과 제안한 기법이 임펄스 잡음과 클리핑 잡음을 동시에 제거하여 기존의 클리핑 제거 기법이나 임펄스 잡음 제거 기법만을 적용하는 경우와 비교하여 10^{-5} 의 BER에서 약 2dB~3dB의 SNR 이득을 추가로 얻을 수 있다는 것을 보였다.

References

- [1] K. H. Kim, et al., "Clipping noise cancellation for OFDM systems using reliable observations based on compressed sensing," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 61, no. 1, pp. 111-118, Mar. 2015.
- [2] E. Ulrich, et al., "Adaptive threshold optimization for a blanking nonlinearity in OFDM receivers," *IEEE GLOBECOM*, pp. 3661-3666, Anaheim, USA, Dec. 2012.
- [3] Thu L. N. Nguyen, et al., "A signal detection and estimation method based on compressive sensing," *J. KICS*, vol. 40, no. 6, pp. 1024-1031, Jun. 2015.