

압축 센싱을 활용한 직교 주파수 분할 다중화 방식에서 클리핑 잡음 감소를 위한 연구

김기훈, 박호성, 노종선, 정하봉*

서울대학교, *홍익대학교

kkh@ccl.snu.ac.kr, *habchung@hongik.ac.kr

A Study On the Clipping Noise Mitigation in OFDM Systems Based On Compressive Sensing

Kee-Hoon Kim, Hosung Park, Jong-Seon No, and Habong Chung*

Seoul National Univ., *Hongik Univ.

요약

본 논문은 최근에 각광받고 있는 압축 센싱을 활용하여 직교 주파수 분할 다중화 방식 (orthogonal frequency division multiplexing; OFDM) 시스템에서 클리핑시 생기는 클리핑 잡음을 제거하기 위한 기법을 소개한다. 제안된 기법은 OFDM 시스템에서 수신된 심볼 시퀀스에 대하여 채널 등기화를 수행한 후, 상성도들과의 거리를 기반으로 “신뢰 있는” 톤들을 선택한다. 이렇게 선택된 톤들을 바탕으로 클리핑 잡음을 복원하게 되는데, 클리핑 잡음은 기본적으로 시간상에서 희소성을 갖게 된다. 따라서 압축 센싱을 활용하여, 신뢰도 있는 클리핑 잡음 복원 및 감소를 가능케 된다. 모의 실험 결과로부터, 제안한 기법을 통하여 OFDM 시스템의 비트 오류율 (bit error rate; BER) 성능이 향상 됨을 보인다.

I. 소개

직교 주파수 분할 다중화 방식 (orthogonal frequency division multiplexing; OFDM) 시스템은 고속 이동 통신에 적합한 통신 방식으로써 다중 경로 페이딩에 강건성을 보인다. 또한 대역폭 효율성도 매우 우수하고, 간단한 구현이 가능하다. 그러나 OFDM 신호는 높은 최대 전력 대 평균 전력 비 (peak-to-average power ratio; PAPR)을 갖기 때문에 넓은 선형 구간을 갖는 증폭기가 필요하다.

많은 문헌들에서, OFDM 시스템에서 PAPR을 감소 시키는 여러 기법들이 제안되었다. 그 중에 가장 간단한 것은 클리핑 (clipping)인데 [1]-[3], 이는 단순히 정해진 임계치 이상의 파위를 갖는 신호를 잘라내는 것이다. 나이퀴스트 샘플링율에서 클리핑은 구현이 간단하기 때문에 의미가 있지만, 디지털/아날로그 변환기 (digital-to-analogue converter; D/A converter) 후에 신호의 최대 전력, 즉 피크가 재 발생 된다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 오버 샘플링율에서 클리핑을 하는 기법 또한 제안되었는데, 이는 PAPR 감소 성능이 좋은 대신, 대역 내외에서 왜곡을 일으키게 된다. 위에서 설명한 클리핑 기법들은 공통적으로 클리핑 잡음을 발생시켜 신호를 왜곡시키는데, 이러한 클리핑 잡음을 제거 또는 완화하기 위한 여러 기법들이 [4], [5]에서 제안되었다.

최근의 희소 신호 처리, 즉, 압축 센싱이라 알려진 이론에 따르면, 희소성을 띠는 신호는 적은 수의 압축 측정값들로 복원이 가능하다. 같은 맥락에서, 클리핑 잡음은 시간 상에서 희소성을 갖게 된다고 볼 수 있고, 이는 주파수 상의 적은 수의 압축 측정값들로 복원이 가능함을 의미한다. 이러한 아이디어를 처음 제시한 논문은 [6]으로, 이 논문에서는 주파수 상의

몇몇 위치에 톤을 비움으로써 (예약함으로써) 이 부분에 클리핑 과정에서 추가된 클리핑 잡음을 이용하여 전체 클리핑 잡음을 복원하는 것이다. 다시 말하자면 주파수 상의 적은 수의 압축 측정값들만으로도, 시간 상에서 클리핑 잡음은 희소성을 가지기 때문에 전체 값들의 (비록 0이 아닌 원소들의 수는 적지만) 복원을 가능케 하는 것이다.

하지만 위의 기법은 큰 한계점을 가지고 있다. 기본적으로 톤을 예약한다는 것은, 대역폭 효율성이 크게 감소 한다는 것이다. 게다가 무선 통신의 특성상 여러 종류의 잡음 모델을 고려해야 하는데, 이러한 잡음 모델이 존재하는 경우 압축 센싱 복원 기법들을 그다지 좋은 성능을 내지 못한다. 물론 성능을 좋게 하기 위하여 예약하는 톤들의 수를 더 증가시킬 수 있겠지만, 이는 당연히 앞에서 언급한 대역폭 효율성을 크게 감소 시킨다.

따라서 본 논문에서는 대역폭 효율성을 감소시키지 않는 새로운 형태의 압축 센싱 활용 클리핑 잡음 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 OFDM 시스템에서 수신된 심볼 시퀀스에 대하여 채널 등기화를 수행한 후, 상성도들과의 거리를 기반으로 “신뢰 있는” 톤들을 선택한다. 이렇게 선택된 톤들을 바탕으로 클리핑 잡음을 복원하게 된다. 따라서 추가적인 예약 톤들을 필요로 하지 않기 때문에, 대역폭 효율을 감소시키지 않는다.

II. 제안하는 클리핑 잡음 감소 기술

OFDM 시스템은 아래와 같은 행렬 식으로 표현이 가능하다. 아래 표시된 대문자 변수들은 모두 주파수 상의 신호를 나타내며, 소문자 변수들은 시간상의 신호를 나타낸다.

$$Y = H(X + C) + Z$$

위 식에서 Y 는 수신된 심볼 시퀀스, X 는 입력 심볼 시퀀스, C 는 (주파수 상의) 클리핑 잡음이고 Z 는 additive white Gaussian noise (AWGN), H 는 채널 응답이라고 한다. 일반적으로, zero-forcing (ZF) 채널 등기화 과정을 거치면 아래와 같은 식을 갖는다.

$$Y_{ZF} = H^{-1}Y = X + C + H^{-1}Z$$

푸리에 행렬을 F 라고 정의한다면, 위 식은 아래와 같이 쓰일 수 있다.

$$Y_{ZF} = X + Fc + H^{-1}Z$$

위 식은 주파수 상의 신호들을 나타낸 것이다. 따라서 어떠한 행 선택 행렬 S 를 곱해줌으로써, 주파수 몇몇 톤들을 선택하여 관찰하는 것이 가능하다. 수식적으로는 아래와 같다.

$$SY_{ZF} = SX + SFc + SH^{-1}Z$$

위에서 언급했다시피, 우리는 S 행렬을, “신뢰 있는” 톤들을 선택하게 설정해준다. 자세히 언급하자면, 채널 등기화를 거친 Y_{ZF} 에 대하여, 원래의 상성도에 최대한 가깝게 접근한 톤들의 위치만을 고르게 된다. 그렇게 한다면 SX 에 대하여 maximum likelihood (ML) 추정을 하게 되어 $S\hat{X}$ 를 얻어 내었을 때 상당히 신뢰할 수 있을 것이다. 따라서 위식을 아래와 같이 변형을 하게 되면

$$SY_{ZF} - S\hat{X} = S(X - \hat{X}) + SFc + SH^{-1}Z$$

이고, $S\hat{X}$ 는 상당히 신뢰할 수 있으므로, 다시 말해 이는 SX 와 매우 높은 확률로 유사한 값이다. 따라서 위 식의 오른쪽의 첫 번째 항은 매우 높은 확률로 0이다. 즉 아래와 같이 볼 수 있게 된다.

$$SY_{ZF} - S\hat{X} \approx SFc + SH^{-1}Z$$

위 식을 보면 왼쪽 식은 압축 측정값이라고 볼 수 있고 c 는 시간상의 클리핑 잡음 전체라고 볼 수 있다. 또한 SF 의 형태는 푸리에 행렬의 몇몇 행들만 골라 생성된 행렬이다. 이러한 식 형태는 압축 센싱에서 많이 다루어지는 형태인데, 압축 센싱 이론에 따르면 왼쪽 식의 압축 측정값을 이용하여 c 를 복원 가능하다. 따라서 압축 센싱 복원 알고리즘을 활용하여 c 를 복원함으로써 클리핑 잡음 효과를 감소시킬 수 있는 것이다.

III. 모의실험 결과

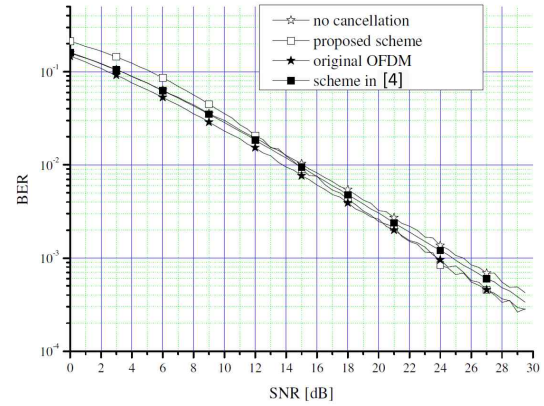
제안하는 기법의 성능 검증을 위하여 모의실험을 행하였다. 본 논문에서는 Rayleigh fading 채널을 가정하였다. 탭의 수는 4개이고 각각은 평균 0의 분산 1/4를 갖는 복소수 Gaussian 분포를 갖는다. 수신 단에서도 이 채널의 영향을 완벽히 안다고 가정 하였고, 이는 타당한 가정이다. 또한 나이퀴스트 샘플링율에서 클리핑을 0dB로 하였고, 부반송파의 수는 64개이고 상성도는 quaternary phase shift keying (QPSK)가 사용 되었다. 또한 제안하는 기법의 성능 비교를 위하여 [4]의 논문을 비교하였다.

그림 1에서 보자시피 제안하는 기법은 [4]의 기법과 비교하여 좋은 성능을 보인다. 실제적인 signal-to-noise ratio (SNR)에서 제안하는 기법은 클리핑을 하지 않은 OFDM 신호보다 BER 성능이 거의 일치함을 보인다.

IV. 결론

본 논문은 최근에 각광받고 있는 압축 센싱을 활용하여 OFDM 시스템

에서 클리핑 시 생기는 클리핑 잡음을 제거하기 위한 기법을 소개한다. 제안된 기법은 OFDM 시스템에서 수신된 심볼 시퀀스에 대하여 채널 등기화를 수행한 후, 상성도들과의 거리를 기반으로 “신뢰 있는” 톤들을 선택한다. 이렇게 선택된 톤들을 바탕으로 클리핑 잡음을 복원하게 되는데, 클리핑 잡음은 기본적으로 희소성을 갖게 된다. 따라서 압축 센싱 개념을 활용하여, 신뢰도 있는 클리핑 잡음 복원이 가능케 된다. 이는 모의 실험 결과를 통하여 기존의 기법보다 좋은 성능을 가짐이 확인되었다.



〈그림 1〉 Rayleigh fading 채널에서의 제안된 기법 성능 도식

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0000186).

참고 문헌

- [1] D.-W. Lim, S.-J. Heo, and J.-S. No, “An overview of peak-to-average power ratio reduction schemes for OFDM signals,” J. Commun. Netw., vol. 11, no. 3, pp. 229–239, Jun. 2009.
- [2] X. Li and L. J. Cimini, Jr., “Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM,” IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 5, pp. 131–133, May 1998.
- [3] H. Ochiai and H. Imai, “Performance analysis of deliberately clipped OFDM signals,” IEEE Trans. Commun., vol. 50, pp. 89–101, Jan. 2002.
- [4] H. Chen and A. Haimovich, “Iterative estimation and cancellation of clipping noise for OFDM signals,” IEEE Commun. Lett., vol. 7, pp. 305–307, Jul. 2003.
- [5] D. Kim and G. L. Stuber, “Clipping noise mitigation for OFDM by decision-aided reconstruction,” IEEE Commun. Lett., vol. 3, pp. 4–6, Jan. 1999.
- [6] E. B. Al-Safadi and T. Y. Al-Naffouri, “On reducing the complexity of tone reservation based PAPR reduction schemes by compressive sensing,” in Proc. IEEE Globecom 2009, Honolulu HI, Nov. 2009.