

# Sub-Nyquist 표본화 시스템의 하드웨어 사용 효율 개선

장재혁<sup>o</sup>, 이흥노

광주과학기술원 전기전자컴퓨터 공학부

## Efficient Use of Hardware in Sub-Nyquist Sampling System

Jehyuk Jang<sup>o</sup>, Heung-No Lee

Department of Electrical Engineering and Computer Science,

Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

(jjh2014, heungno)@gist.ac.kr

### 요 약

본 논문은 의사잡음 신호 (PRS)를 이용하는 sub-Nyquist 표본화 시스템인 modulated wideband converter (MWC)의 하드웨어 사용 효율을 개선하는 문제를 다룬다. MWC는 PRS와 저역통과 필터를 사용하여 광대역 신호의 스펙트럼을 압축한 후 저속으로 표본화 한다. 이전까지는 스펙트럼 압축률이 PRS의 성능에 의해 결정되어, 더 넓은 대역의 신호를 압축하기 위해서는 더 빠르고 긴 주기를 갖는 PRS 신호를 필요로 하였다. 그러나 PRS 신호 발생기의 전력소모와 공정 면적에 관한 문제로 인해, PRS 신호 발생기의 속도와 주기는 한계가 있다. 본 논문에서는, 표본화 과정에서 고의적으로 스펙트럼의 aliasing을 유도하는 단순하지만 새로운 아이디어를 통해 MWC의 스펙트럼 압축률을 효과적으로 조절할 수 있음을 실증하였다. 실험을 통해, 제안된 시스템에서 주어진 신호의 성공적인 표본화에 필요한 표본화 속도가 기존 MWC 대비 약 65%로 줄어들 수 있음을 보였다.

## 1. 서론

전자전파 인지무선통신 분야에서는 광대역에 최소한 존재하는 스펙트럼을 수집하는 기술을 필요로 한다. 고전적인 신호수집 방법은 신호의 최대 주파수의 두 배, 즉 Nyquist rate로 표본화 하는 것이다. 그러나 상용 analog-to-digital converter (ADC)의 표본화 속도는 제한적이다. 뿐만 아니라 관심 신호는 최소한 존재하기 때문에 최대 주파수를 기준으로 표본화 하는 것 하드웨어 사용 관점에서 비효율적이기도 하다.

Modulated wideband converter (MWC) [1]는 압축 센싱 이론 [2]을 기반으로 광대역 최소 신호를 Nyquist rate보다 훨씬 낮은 sub-Nyquist rate의 속도로 정보손실 없이 표본화 하는 방법이다. 고속으로 진동하는 의사잡음 신호 (PRS)와 저역통과 필터를 활용하여 신호의 스펙트럼을 압축한 후 sub-Nyquist rate로 표본화하는 시스템이다. MWC의 스펙트럼 압축 성능은 PRS의 진동 속도와 의사 잡음 패턴의 주기에 의해 결정되었다. 따라서 관심 신호대역이 넓을수록 더 고성능의 PRS 발생기를 필요로 하였다. 이러한 수요를 충족하기 위해 더 빠르고 긴 패턴 주기를 갖는 PRS 발생기의 연구가 지속적으로 수행되고 있지만, 많은 전력을 소모하고 넓은 공정 면적

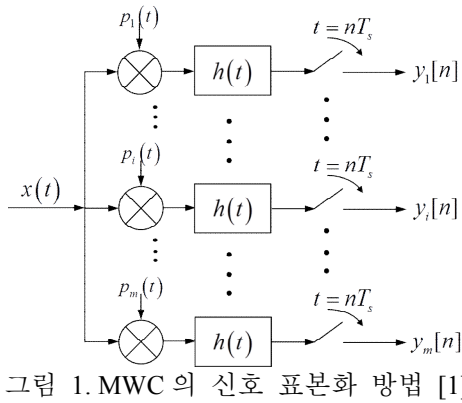
을 필요로 하기 때문에 [3] 상용 PRS 발생기의 수준은 그보다 훨씬 더 낮은 수준이다. PRS 발생기가 충분한 진동 속도와 패턴 주기를 갖지 못하면 기존의 MWC에서는 광대역 신호를 정보 손실 없이 표본화 하는데 필요한 표본화 속도를 최적화 하지 못하였다.

본 논문에서는 MWC가 압축된 신호를 표본화 할 때 고의적으로 스펙트럼의 에일리어싱 현상을 유도하여 압축 성능을 개선하였다. 제안된 방법은 MWC가 PRS 발생기의 성능에 의존하지 않고 광대역 신호를 정보 손실 없이 표본화 하는데 필요한 표본화 속도를 더 낮출 수 있게 하며, 이를 실험을 통해 보였다.

## 2. 본론

MWC [1]는 그림 1과 같이  $m$ 개의 채널로 구성되어 있다. 각 채널은 광대역 수신 신호  $x(t)$ 를 주기  $T_p$ 의 PRS인  $p_i(t)$ 와 혼합한 후, 대역폭이  $W_{LPF}$ 인 저역 통과 필터  $h(t)$ 를 통과시키고  $T_s$ 의 표본화 간격으로 표본화 한다.  $x(t)$ 의 최대 주파수는  $f_{\max}$ 이며, 스펙트럼은  $N$ 개의 서로 겹치지 않는 협대역 스펙트럼들로 구성되어 있으며, 각 협대역 스펙트럼

의 대역폭은  $B$  이다.  $W_{LPF}$  는 PRS 의 반복률인  $f_p := T_p^{-1}$  과  $W_{LPF} = qf_p$  의 관계가 되도록 설정하며, 본 논문에서는  $q=3$  으로 고정하였다. MWC 의 신호 혼합 과정이  $x(t)$  의 스펙트럼을 뒤섞어 전 대역의 스펙트럼 정보가 아주 협소한 기저대역 내에서 변형된 형태로 존재하도록 한다. 이후 저역통과 필터가 기저대역에 존재하는 변형된 형태의 스펙트럼 정보만을 취함으로써  $x(t)$  의 스펙트럼이 압축된다. 압축된 스펙트럼을 저속으로 표본화 한 후 디지털 신호 처리를 통해  $x(t)$  의 이산 스펙트럼을 복원한다. 기존의 MWC 는 표본화 속도인  $f_s := T_s^{-1}$  과  $h(t)$  의 통과 대역폭을 일치시켜, 즉  $f_s = W_{LPF}$ , 표본화 과정에서 압축된 스펙트럼의 에일리어싱이 발생하지 않도록 방지하였다.



MWC 가 정보 손실 없이 표본화하기 위해서는 PRS 의 진동 속도가  $x(t)$  의 Nyquist rate 인  $f_{NYQ} := 2f_{max}$  보다 빨라야 하며,  $f_p$  의 값이  $B$  의 값에 가까울수록 더 적은 표본화 속도를 필요로 한다 [1].  $f_p$  의 값은 PRS 의 의사잡음 패턴의 길이를 조절함으로써 가능하다. 만약  $f_{NYQ}$  가 매우 큰 반면  $B$  가 아주 작다면,  $f_p$  가  $B$  와 같아지게 하기 위해서는 PRS 가 아주 긴 길이의 의사잡음 패턴을 가져야 한다. 그러나 그러한 PRS 발생기는 많은 전력을 소모하고 넓은 공정면적을 필요로 하기 때문에 [3] 상용화가 어렵다.

제안하는 방법은 압축된  $x(t)$  스펙트럼을 표본화하는 과정에서 고의적으로 에일리어싱을 발생시키는 것이다. 이를 위해 새로운 표본화 속도  $f'_s := p^{-1}W_{LPF}$  로 설정하며, 본 논문에서는  $p=2$  로 설정하였다. 즉  $p=1$  이면 기존 MWC 의 표본화 방법이며,  $p=2$  이면 제안하는 방법이다. 제안하는 방법을 통해 표본화 과정에서 에일리어싱 현상을 허용함으로써 기존 MWC 에서 PRS 의  $f_p$  의 값을 줄이는 어려운 방법과 동일한 효과를 가져온다. 에일리어싱 현상으로 인해 기존 MWC 와는 다르게 변형된 입-출력 관계식은 추적이 가능하다 [4].

### 3. 실험 및 결론

제안하는 방법의 무손실 표본화 능력을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 표본화 속도를 바꿔가며 MWC 의 출력 샘플로부터 복원된  $x(t)$  의 이산 스펙트럼의 mean-squared error (MSE)를 측정하였다. MSE 는 300 번에 걸쳐  $x(t)$  를 무작위로 생성 한 후 평균을 계산하였다.  $f_{max}=18$  [GHz]이고  $B=50$  [MHz],  $N=14$  으로 설정하였으며  $x(t)$  의 각 협대역 스펙트럼의 반송주파수는 무작위로 설정하였다. 그림 2 는  $p=1$  로 설정한 기존 MWC 와  $p=2$  로 설정한 제안하는 방법에 의한 평균 MSE 를 보여 준다. 실험을 통해 제안된 방법이 특정 MSE 를 달성하기 위해 필요한 MWC 의 표본화 속도를 약 65% 정도로 감소시킨다는 것을 확인 할 수 있다.

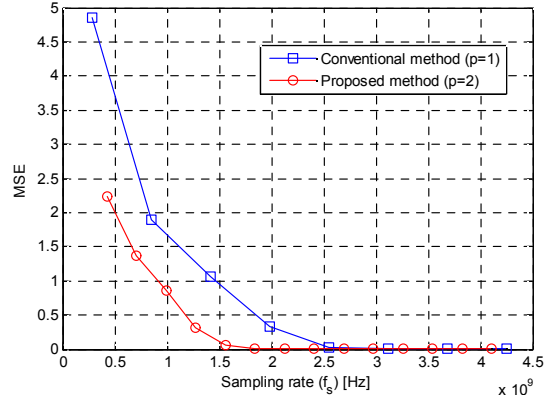


그림 2. MWC 의 표본화 속도에 따른 복원된 신호 스펙트럼의 평균 MSE 결과

### 4. 참고 문헌

- [1] M. Mishali and Y. C. Eldar, "From Theory to Practice: Sub-Nyquist Sampling of Sparse Wideband Analog Signals," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 4, no. 2, pp. 375–391, Apr. 2010.
- [2] E. J. Candès, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 489–509, Feb. 2006.
- [3] M. Sakare, "A Power and Area Efficient Architecture of a PRBS Generator With Multiple Outputs," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 64, no. 8, pp. 927–931, Aug. 2017.
- [4] Jehyuk Jang, Sanghun Im, and Heung-No Lee, "Intentional Aliasing to Improve Sub-Nyquist Sampling System," *IEEE Trans. Signal Process.*, accepted, Apr. 2018.