

Crest Factor 감소를 위한 효율적인 피크 윈도우링 기법

유병욱, 황유선, 이규하, *이충용

(주)캠프넷, *연세대학교

bwyoo@thecampnet.co.kr, hys1022@thecampnet.co.kr, khlee@thecampnet.co.kr,

*cylee@yonsei.ac.kr

Efficient Peak Windowing Techniques for Crest Factor Reduction

Byungwook Yoo, Kwangmin Kim, Kyu Ha Lee, *Chungyong Lee

Campnet Co. Ltd., *Yonsei University

요 약

본 논문에서는 다중 반송파, 특히 OFDM 시스템의 PAPR 을 감소시킬 수 있는 CFR 알고리즘을 다룬다. 기존의 피크 윈도우링 기법이 윈도우 길이 내에 피크들이 여러 개 있을 경우, 과도 clipping 으로 인하여 성능이 열화되는 현상을 개선하기 위하여 포락선 기반 피크 윈도우링 기법을 적용한다. 뿐만 아니라, 피크 윈도우링이 가지고 있는 EVM 열화를 완화하기 위하여 기존의 단순 clipping 기법과 혼합하여 시스템에서 요구하는 EVM 성능뿐 아니라 ACLR 성능까지도 만족하도록 한다. MATLAB 을 이용하여 알고리즘을 검증하고, 하드웨어 구현을 위하여 Xilinx Virtex5 를 이용하여 검증하여 제안하는 기법의 복잡도는 높지만 EVM 과 ACLR 성능이 우수함을 알 수 있다. 효율적인 주파수 이용과 수신 성능 측면에서 우수한 성능을 보인다. 따라서 DVB-T 나 LTE, IEEE 802.16m 등의 차세대 방송 및 통신의 전송에 이용되는 OFDM 신호의 PAPR 을 효과적으로 줄일 수 있는 기법으로 적용될 수 있다.

1. 서론

최근 스마트 TV 와 스마트폰의 수요가 증가됨으로 인하여 기존의 아날로그 방송과 통신으로 사용자의 요구를 수용할 수 있는 한계를 디지털로 전환하여 해결하고자 하는 연구가 한창 진행 중이다. 이를 위하여 디지털 오디오 방송 (DAB: digital audio broadcasting)과 디지털 멀티미디어 방송 (DMB: digital multimedia broadcasting)이 이미 송출 중에 있으며, 더 나아가 디지털 비디오 방송 (DVB: digital video broadcasting)에 대한 연구도 지속 중이다. 통신에서는 기존의 패킷 교환 방식 (packet switching)과 회선 교환 방식 (circuit switching)이 공존하는 WCDMA 를 대체하는 기술로써 LTE (long-term evolution)/LTE-Advanced 및 IEEE 802.16m 표준화가 진행 중에 있다.

앞서 설명했던 최근 진행중인 방송과 통신의 연구들의 공통점은 직교 주파수 분할 접속 방식 (OFDM: orthogonal frequency division multiplexing)을 사용한다는 점이다.

OFDM 기술은 기존의 single carrier 전송 기술에 비하여 주파수 효율이 높고 다중 경로 페이딩에 강하다는 장점을 가지고 있어 이동성이 강한 단말을 서비스하는 최적의 기술로써 각광받고 있다. 이로 인하여 지상파 방송 표준과 4 세대 통신 기술의 전송 방식으로 선호되고 있다 [1-3].

그러나, OFDM 시스템은 crest factor, 또는 PAPR (peak-to-average power ratio)이 높다는 단점을 가지고 있으며, 이로 인하여 고풍력 증폭기의 비선형 왜곡을 유발하여 스펙트럼 왜곡 및 EVM (error vector magnitude)의 열화를 초래한다[4].

이러한 영향을 감소시키기 위한 CFR (crest factor reduction) 기법, 또는 PAPR 감소 기법들이 제안되었다[5-8]. [5]에서는 가장 간단한 기법으로 특정 임계치 이상의 피크들을 단순 clipping 하는 기법이 제안되었으며, [6-8]에서는 clipping 기법을 보완하는 피크 윈도우링 기법이 제안되었다. 이외에도 부가적인 정보를 첨부하여 clipping 된 신호를 수신단에서 복원할 수 있는 기법들이 제안되었으나, 실제적으로 구현 가능한 clipping 기법과 피크 윈도우링 기법에 대해 다룬다.

본 논문에서는 peak windowing 기반 CFR 기법의 구현에 대해 다룬다. 윈도우 크기 내에 다중의 피크가 존재할 경우, peak windowing 의 성능이 열화됨으로 인하여 이를 해결하기 위한 기법을 제안하고 이를 WiMAX 3FA 신호에 적용하여 성능을 평가한다.

이 논문은 2010 년도 정부(지식경제부)의 재원으로 지식경제 기술혁신사업 지원을 받아 수행된 것임(10036943)

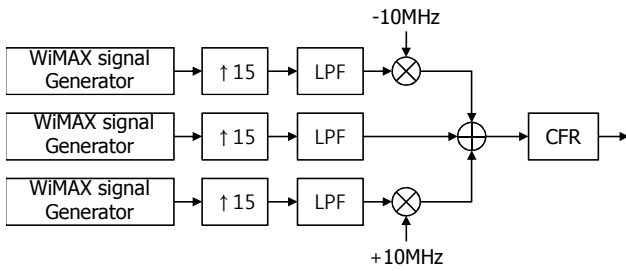


그림 1. 시스템 모델

표 1. WiMAX 3FA 신호의 PAPR (dB)

MAX	0.001%	0.01%	0.1%	1%	10%
11.292	10.856	10.265	8.971	6.934	3.617

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 본 논문의 기법을 적용할 WiMAX 시스템 및 CFR 의 성능을 위한 파라미터들을 설명한다. 3 절에서는 CFR 을 위한 clipping 기법 및 피크 윈도우링 기법에 대해 살펴본 후, 4 절에서는 효율적인 피크 윈도우링 기반 CFR 기법을 제안한다. 5 절에서는 제안 기법의 성능을 비교, 평가하고 6 절에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서 제안하는 시스템 모델은 그림 1과 같다. FFT 크기는 1024 이고, 128 크기의 보호구간이 사용된다. 각각의 WiMAX 신호는 10MHz 채널 대역 프로파일이 적용되었고 이때의 샘플링 주파수는 11.2MHz 이다. 각 FA 별로 생성된 신호는 15 배 오버샘플되어 168MHz 로 동작하고 LPF 를 거치게 된다. 3FA 신호 생성을 위하여 첫 번째 FA 와 세 번째 FA 는 각각 -10MHz, +10MHz 만큼 주파수 천이되며, 이 세 신호가 더해진 후, CFR 을 수행하게 된다. 이때, WiMAX 3FA 신호의 PAPR 은 표 1과 같다.

일반적으로, WiMAX 3FA 신호의 시간축 샘플을 $x(n)$ 이라 가정할 때, PAPR 은 다음과 같이 정의된다.

$$PAPR = \frac{\max\{|x(n)|^2\}}{E\{|x(n)|^2\}} \quad (1)$$

그렇지만 주로 CCDF (complementary cumulative density function) 의 0.01% 기준 PAPR 을 유효 PAPR 로 가정하므로, 본 논문에서는 WiMAX 3FA 신호의 PAPR 을 10.265dB 로 사용한다.

신호의 피크치가 clipping 되게 되면, 수신 신호의 EVM 이 열화되고 이에 따라 신호 대역폭 외부의 스펙트럼의 방사량이 증가하게 된다. 따라서, PAPR 감소 기법을 적용할 경우, EVM 과 ACLR (adjacent channel leakage ratio) 를 동시에 고려해야 한다. EVM 은 성장도 상에서 참고신호와 수신 신호간의 에러 벡터의 rms 로 정의되며 다음과 같다.

$$EVM = \sqrt{\frac{E\{|\hat{r}_n - r_n|^2\}}{E\{|r_n|^2\}}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

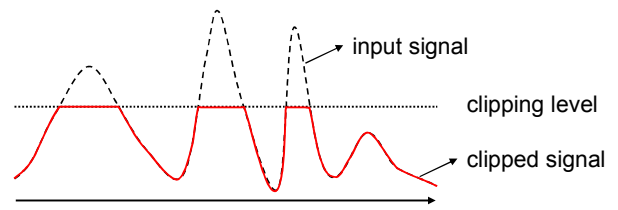


그림 2. 단순 clipping 의 예

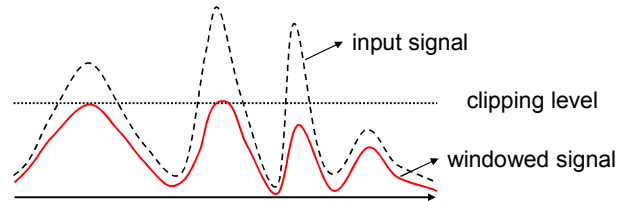


그림 3. 피크 윈도우링 의 예

ACLR 은 원하는 신호의 대역과 인접 대역간의 파워의 차이로 표시되며, WiMAX 10MHz 프로파일의 경우, FA 의 중심 스펙트럼의 파워와 중심으로부터 9.45MHz 떨어진 스펙트럼의 파워차로 구할 수 있다 [3].

3. 일반적인 CFR 기법

OFDM 시스템의 PAPR 을 낮추는 기법 중 가장 간단한 방법은 특정 임계치 이상의 피크를 단순히 clipping 하는 기법으로 clipping 후의 신호 $x_c(n)$ 은 $c(n)x(n)$ 으로 표현되며, 이 때의 clipping 계수 $c(n)$ 은 다음과 같다[5].

$$c(n) = \begin{cases} 1 & |x(n)| \leq A \\ \frac{A}{|x(n)|} & |x(n)| > A \end{cases} \quad (3)$$

여기서, A 는 특정 임계치이다. 그림 2와 같이 특정 임계치 이상의 신호를 단순히 clipping 하는 기법으로 구현상 가장 용이한 기법이지만, 신호의 파형이 부드럽지 못함으로 인하여 인접 대역의 방사량이 커지는 단점을 지니게 된다.

단순 clipping 기법의 ACLR 성능 열화를 해결하기 위한 기법으로 등장한 피크 윈도우링 기법은 특정 임계치 이상의 피크에 윈도우를 적용하여 인접 신호까지 신호를 낮춰줌으로 인하여 신호를 매끄럽게 만들어 주는 기법이다. 이 때의 출력 신호는 다음과 같이 정의된다[6].

$$x_{pw}(n) = [1 - \{1 - c(n)\} \otimes w(n)] x(n) \quad (4)$$

여기서, clipping 계수 $c(n)$ 은 식 (3)과 동일하며, \otimes 은 convolution 연산자이고, $w(n)$ 은 윈도우 함수로써 일반적인 Hanning, Hamming 등의 윈도우 등이 쓰일 수 있다. 윈도우의 길이는 요구되는 EVM 과 ACLR 에 따라 적절히 조절될 수 있다. 피크 윈도우링이 적용된 예는 그림 3과 같다. 단순 clipping 과 달리 인접 신호까지 상대적인 파워를 낮춰줌으로 인하여 출력 신호를 부드럽게 하여 ACLR 을 개선시킬 수 있다.

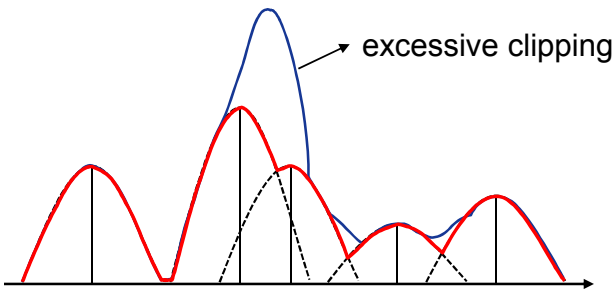


그림 4. 피크 윈도우링 기법의 과도 clipping 및 포락선 기반 기법의 예

하지만, 인접 신호들까지 파워에 영향을 받음으로 인하여 EVM 성능이 열화되는 단점을 갖는다[7]. 게다가, 인접한 피크간의 간격이 윈도우의 길이보다 작아지게 될 경우, convolution 연산에 의해서 과도한 clipping 이 발생할 수도 있다. 이 경우, 식 (4)의 $1-c(n)$ 이 0 보다 작아짐으로 인하여 오히려 PAPR 이 증가하게 된다. 이를 해결하고자 [7]에서는 단순 convolution 이 아닌 윈도우가 적용된 계수들의 포락선만 따라가는 기법을 제안하였다. 그림 4는 위에서 설명한 피크 윈도우링 기법의 과도 clipping 의 예와 포락선 기반 기법의 예를 보여준다. [8]에서는 비대칭 윈도우의 적용한 기법과 최적화된 clipping 계수를 제안하였으나, 최적화된 계수를 계산하는 과정에 어려움이 따른다.

4. 제안하는 CFR 기법

3 절에서, 단순 clipping 기법은 ACLR 열화가 크고, 피크 윈도우링 기법은 ACLR 을 개선하는 대신 EVM 열화가 크다는 것을 살펴보았다. 본 절에서는 이 둘을 적절히 혼합하여 시스템에서 요구하는 EVM 과 ACLR 을 동시에 만족하도록 하는 기법을 제안한다. 먼저, 요구되는 ACLR 을 만족하는 정도로 단순 clipping 을 적용하여 큰 피크들을 제거한다. 그리고 미리 clipping 된 신호에 피크 윈도우링을 적용하여 기존의 피크 윈도우링에 비해 EVM 열화를 줄이면서 ACLR 을 만족하도록 한다. 특히 과도 clipping 기법을 피하기 위하여 포락선 기반 기법을 적용한다. 제안된 포락선 기반 기법은 윈도우 길이만큼의 버퍼를 이용하여 구현할 수 있다. 이전 피크와 윈도우에 의해 영향을 받는 계수를 버퍼에 저장하고 현재 피크와 윈도우에 의해 영향을 받는 새로운 계수를 버퍼와 비교하여 최대의 값을 선택하게 된다. 이때 버퍼의 내용은 새로운 것으로 업데이트 되고 새로운 피크가 검출될 때마다 이와 같은 과정이 반복되게 된다.

5. 모의 실험 결과

본 절에서는 168MHz 로 샘플링된 WiMAX 3FA 신호를 CFR 수행하였을 시의 PAPR 과 EVM, 그리고 ACLR 성능을 보인다. 길이 35 의 Hanning 윈도우가 적용되었고, 제안 기법에서 처음으로 clipping 할 때의 임계치는 2dB CFR 에서는 0.5dB, 4dB CFR 에서는 1dB 이다.

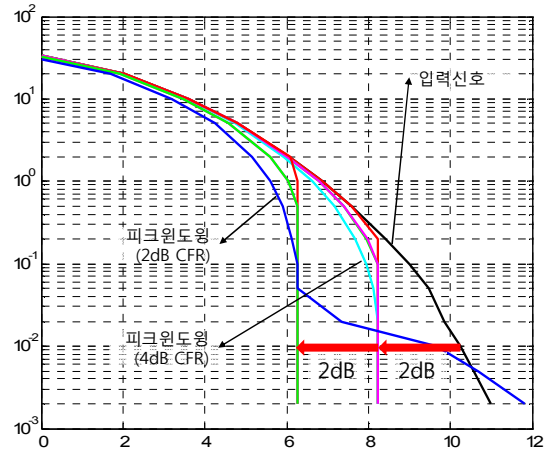


그림 5. Clipping 정도에 따른 CCDF

표 2. CFR 적용 시 각 기법의 PAPR (2dB/4dB)

	MAX	0.001%	0.01%	0.1%	1%	10%
입력	11.29	10.85	10.26	8.97	6.93	3.62
Clipping	8.26	8.26	8.26	8.26	6.92	3.62
	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	3.62
PW	8.26	8.26	8.26	8.04	6.65	3.57
	13.33	12.32	9.31	6.37	5.70	3.22
포락선	8.26	8.26	8.26	8.26	6.82	3.60
	6.26	6.26	6.26	6.26	6.13	3.49
제안기법	8.26	8.26	8.26	8.26	6.83	3.60
	6.26	6.26	6.26	6.26	6.13	3.49

표 3. CFR 적용 시 각 기법의 EVM 과 ACLR 성능

CFR		Input	Clipping	PW	포락선	제안기법
2dB	EVM	0.68	0.96	3.90	1.51	1.42
	ACLR	52.28	47.04	48.78	51.09	51.05
		53.27	47.25	48.96	51.44	51.41
4dB	EVM	0.68	2.50	16.8	4.68	4.59
	ACLR	52.28	36.04	36.53	45.13	44.98
		53.27	35.74	36.32	45.12	45.10

그림 5는 2dB, 4dB CFR 적용 시의 CCDF 이다. 0.01% PAPR 기준으로 2dB 적용 시에는 모든 기법에서 동일한 0.01% PAPR 을 얻을 수 있었다. 그렇지만 4dB CFR 적용 시에는, 윈도우 길이 내에 임계치를 초과하는 피크들의 수가 많아짐으로 인하여 과도 clipping 이 발생하게 되어 피크 윈도우링의 성능이 열화됨을 확인할 수 있다. 이는 표 2를 통하여 확인할 수 있다.

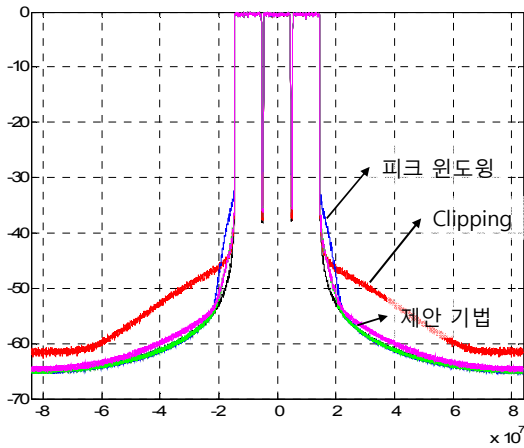


그림 6. 2dB CFR 적용 시의 스펙트럼

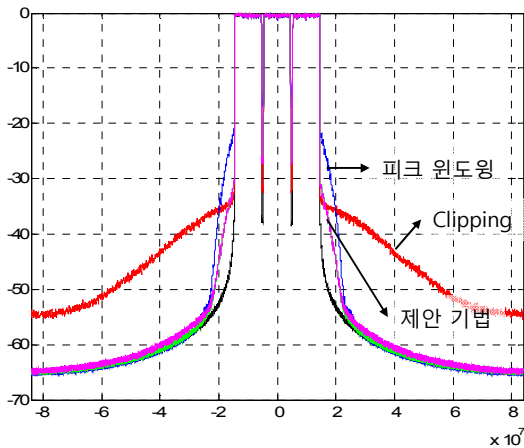


그림 7. 4dB CFR 적용 시의 스펙트럼

표 3은 CFR 적용 시 각 기법의 EVM 과 ACLR 을 보여준다. CFR 이 커질수록 EVM 과 ACLR 이 열화됨을 알 수 있다. 기존의 피크 윈도우링 기법에 비해서 포락선 기반 기법이 더 나은 EVM 과 ACLR 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 그리고 clipping 과 포락선 기반 기법을 동시에 적용할 경우, ACLR 측면에서 최대 0.5dBc 정도의 열화를 보이나, EVM 측면에서 대략 0.1% 정도의 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 6과 그림 7은 각각 2dB 와 4dB CFR 이 적용 되었을 때의 스펙트럼을 보여준다. 단순 clipping 의 경우 인접 대역에 큰 간섭을 야기할 수 있음을 알 수 있고, 피크 윈도우링의 경우는 인접 FA 에 미치는 간섭이 크다는 사실을 알 수 있다. 포락선 기반의 기법과 제안 기법의 스펙트럼 성능이 우수함을 이 결과를 이용하여 확인할 수 있다.

앞서 살펴보았던 CFR 알고리즘을 Xilinx Virtex5 를 이용하여 구현하였고, 이에 따른 복잡도는 표 4와 같다. 복잡도 측면에서는 clipping 이 가장 단순하고 제안하는 기법이 가장 복잡하다는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 기법의 복잡도는 포락선 기반 기법과 clipping 의 합과 유사하다는 것을 알 수 있다.

표 4. 복잡도 비교

	Clipping	PW	포락선	제안기법
Slice	588	906	1204	1841
Slice F/F	1986	2697	3605	5591
Slice LUT	1445	2369	3674	5117
DSP48	4	23	38	42

6. 결론

본 논문에서는 PAPR 을 줄일 수 있는 CFR 기법을 다뤘다. 기존의 clipping 기법과 피크 윈도우링 기법의 단점을 상호 보완하기 위하여 두 기법을 혼합하였으며, 특히 과도 clipping 이 야기되는 피크 윈도우링을 개선하는 기법인 포락선 기반 기법을 적용하여 EVM 과 ACLR 을 동시에 만족하도록 하였다. 제안한 알고리즘을 Virtex5 에 적용을 하여 구현하였고, 알고리즘과 동일한 결과를 얻음을 확인하였다. 하지만, 제안한 기법의 복잡도가 높으므로, 연산 측면에서 최적화하는 것을 차후로 진행하고자 한다.

참고문헌

- [1] ETSI EN 302 755 V1.2.1, Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), Feb. 2011.
- [2] 3GPP TS 36.211 V9.1.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical specification group radio access network; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical channel and modulation (Release 9), Mar. 2010.
- [3] IEEE 802.16m, IEEE standard for local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for broadband wireless access systems, May 2009
- [4] E. Costa, M. Midrio, and S. Pupolin, "Impact of amplifier nonlinearities on OFDM transmission system performance," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 37-39, Feb. 1999.
- [5] 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.
- [6] H. N. Mistry, "Implementation of a peak windowing algorithm for crest factor reduction in WCDMA," MS thesis, Simon Fraser University, Burnaby, BC, Canada, 2006.
- [7] G. Chen, R. Ansari, Y. Yao, "Improved peak windowing for PAPR reduction in OFDM," in *Proc. VTC 2009 Spring*, Barcelona, Apr. 2009.
- [8] H. Kuo and S. W. Cheung, "Optimization of windowing and peak-windowing techniques for WCDMA systems," in *Proc. ICASSP 2006*, Toulouse, May 2006.