

파형정형된 IFDMA 신호에서 클리핑이 스펙트럼과 BER에 미치는 영향

정회원 박 승 용*, 종신회원 김 정 구*

The Effect of Clipping on the Spectrum and BER of IFDMA Signal with Pulse Shaping

Seung-Yong Park* *Regular Member*, Jeong Goo Kim* *Lifelong Member*

요 약

SC-FDMA(single carrier-frequency division multiple access)는 낮은 첨두전력을 가져 최근 3GPP LTE(3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution)의 상향 다중 접속방식으로 채택되었다. 파형정형 여파기인 제곱근 상승여현 여파기의 롤오프 계수가 1에서 0으로 감소함에 따라 SC-FDMA의 부반송파 매핑방식 중 하나인 IFDMA(interleaved FDMA) 방식의 대역폭은 좁아지지만, 오히려 그 첨두전력은 심각하게 증가할 수 있다. 실제 시스템에서는 증폭기의 전력효율을 높이기 위하여 높은 첨두전력을 특정 값 이하로 절사하는 클리핑 과정을 수행하게 된다. 신호의 클리핑은 고주파 성분의 재생성 및 신호의 왜곡을 야기할 수 있다. 본 논문에서는 파형정형된 IFDMA 신호에서 클리핑이 스펙트럼과 오율에 미치는 영향을 분석한다.

Key Words : IFDMA, SC-FDMA, PAPR, Clipping

ABSTRACT

The SC-FDMA(single carrier-frequency division multiple access) was recently adopted as the uplink multiple access scheme from 3GPP LTE(3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution) due to its low PAPR (peak-to-averaged power ratio). The bandwidth of IFDMA(interleaved FDMA), one of the sub-carrier mapping methods of SC-FDMA, gets narrower as the roll-off factor of RRC(root raised cosine) filter decreases from 1 to 0, whereas its PAPR can increase significantly. In practice, to increase the power efficiency of an amplifier, signals with high PAPR undergo the process of clipping. Clipping of signals may cause regeneration of high-frequency components as well as distortion of signals. The current paper deals with the effect of clipping on the spectrum and BER of IFDMA signals with RRC filters.

I. 서 론

직교 주파수분할다중화(orthogonal frequency division multiplexing; OFDM)는 이산 푸리에 변환 (discrete Fourier transform; DFT)이나 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform; FFT)을 이용하여 신호벡터를 변

조 및 복조하므로 고속 및 높은 대역폭효율이 요구 되는 디지털 전송시스템에 적합한 것으로 알려져 있다^{[1], [2]}. OFDM은 많은 장점을 가지지만 첨두전력 대 평균전력비(peak-to-averaged power ratio; PAPR)가 높은 단점이 있다. 이로 인하여 TWTA (traveling wave tube amplifier)등과 같은 고풍력

* 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

* 부산대학교 정보컴퓨터공학부 차세대방송통신연구실(kimjg@pusan.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-08-341, 접수일자 : 2009년 8월 10일, 최종논문접수일 : 2009년 11월 5일

증폭기의 비선형 특성에 의하여 신호는 크게 왜곡 될 수 있으며 증폭기의 전력효율을 열화 시킨다^{[1], [2]}.

OFDM의 높은 PAPR을 줄이기 위하여 현재 많은 연구가 이루어지고 있으며, 최근에 3GPP LTE의 상향링크(up-link) 다중접속 방식으로 단일 반송파 주파수 분할 다중화(single carrier-frequency division multiple access; SC-FDMA)가 채택되었다.^[3]

SC-FDMA의 부분송파 매핑방식으로는 IFDMA(interleaved FDMA) 방식과 LFDMA(localized FDMA) 방식이 있다.^[4] IFDMA 부분송파 매핑방식은 LFDMA 부분송파 매핑방식 보다 낮은 PAPR을 가진다. 일반적으로 통신 시스템에서는 인접채널에 대한 간섭을 줄이기 위하여 대역 외 전력방사(out of band power radiation)를 엄격히 제한하고 있으며, 제한된 대역 외 전력방사를 만족시키기 위해 파형정형을 수행한다. 일반적으로 파형정형 여파기로 제공된 상승여현 여파기(root raised cosine filter; RRC filter)를 사용한다. 파형정형된 SC-FDMA의 IFDMA 신호의 경우 RRC 여파기의 롤오프 계수(roll-off factor)가 0에서 1로 증가함에 따라 시간영역에서 부엽(side lobe)성분의 크기가 감소되어 PAPR이 감소한다. 이에 반하여 LFDMA의 경우, 부분송파 매핑과정에서 이미 높은 PAPR이 발생하여 파형정형 과정에서 롤오프 계수를 0에서 1로 증가시켜 부엽성분의 크기를 줄이더라도 PAPR은 크게 변화하지 않는다.^[4] 실제 시스템에서는 증폭기의 선형성 및 전력효율을 위해 특정 PAPR 보다 높은 신호는 반드시 제한되어야 한다. 따라서 높은 PAPR을 가지는 신호는 증폭기에 입력되기 전 특정 값 이하로 클리핑(clipping) 되어야 한다. 클리핑은 신호의 왜곡을 가져오므로 오류성능(error performance) 저하를 초래 할 수 있으며, 또한 클리핑으로 인한 신호의 급격한 변화는 고주파 성분을 발생시켜 대역폭의 증가를 야기 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 파형정형된 SC-FDMA의 IFDMA 신호에서 롤오프 계수 값에 따른 PAPR 변화와 대역폭 분석 및 클리핑이 스펙트럼과 BER(bit error rate)에 미치는 영향을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 서론에 이어 2장에서 파형정형된 IFDMA 신호의 특성을 소개하고 3장에서 클리핑이 스펙트럼과 BER에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

II. 파형정형된 IFDMA 신호의 특성

2.1 SC-FDMA

3GPP LTE의 상향링크 다중접속 기술인 SC-FDMA는 기본적으로 OFDM기술의 변복조 방식과 유사하나 송신단에 전처리과정인 DFT 모듈을 첨가함으로써 송신단에서 높은 PAPR 발생을 최소화하여 단말의 전력소모를 줄이는 장점을 가진다.^[5-6]

그림 1은 SC-FDMA의 송신기와 수신기의 구조를 나타내었다. 여기서 시간 영역의 데이터 심벌들은 OFDMA 모듈을 통과하기 전에 DFT과정을 수행하기 때문에 SC-FDMA는 DFT-spread OFDMA로 불리기도 한다. 그림에서 CP는 cyclic prefix, PS는 파형정형(pulse shaping)을 각각 의미한다. 그리고 입력 데이터 $\{x_n\}$ 은 PSK 또는 QAM신호로 매핑된 심벌을 의미한다. N개의 심벌은 SC-FDMA의 N-point DFT된다. 이 과정에서 입력 심벌에 대한 주파수 영역 신호인 X_k 가 만들어 지며, 다음으로 부분송파 매핑 과정에서 X_k 는 각각 M개의 직교 주파수에 매핑 된다. 여기서 N은 심벌의 수를 의미하며, M은 시스템의 부분송파의 개수를 의미한다. 부분송파 매핑과정을 수행한 X_k 은 OFDMA시스템과 동일하게 직교 부분송파에 의하여 변조되며 직교 부분송파 변조된 신호는 순환확장 및 파형정형 된다.

SC-FDMA에서 사용자 q에 대한 입력 데이터 $\{x_n^{(q)}\}$ 을 N-point DFT를 수행한 결과는 다음과 같다.

$$X_k^{(q)} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n^{(q)} e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (1)$$

SC-FDMA는 부분송파 매핑 방식에 따라 IFDMA와 LFDMA로 나누어진다. DFT된 신호 $X_k^{(q)}$ 를 IFDMA 부분송파 매핑 과정을 수행한 주파수

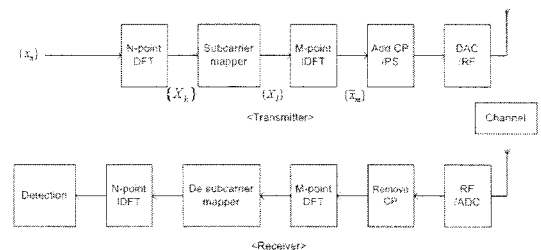


그림 1. SC-FDMA의 구조

수 영역의 샘플을 $\widetilde{X}_{I_m}^{(q)}$, LFDMA 경우를 $\widetilde{X}_{L_m}^{(q)}$ 라 하면 $\widetilde{X}_{I_m}^{(q)}$ 와 $\widetilde{X}_{L_m}^{(q)}$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{X}_{I_m}^{(q)} = \begin{cases} X_k^{(q)} = X_{(m-q)/Q}^{(q)}, & m = Qk + q \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

$$\widetilde{X}_{L_m}^{(q)} = \begin{cases} X_k^{(q)} = X_{m-Nq}^{(q)}, & m = k + Nq \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

식 (2)과 식(3)에서 $m(m=0, 1, \dots, M-1)$ 은 부반송파의 색인이며 $q(q=0, 1, \dots, Q-1)$ 은 사용자의 색인이다. 다음 그림은 부반송파의 수 N 이 16이며, 사용자의 수 Q 가 4이고, 각 사용자당 사용할 수 있는 부반송파 수 M 이 4인 경우의 IFDMA와 LFDMA의 매핑 방법을 보여주고 있다.

일반적으로 IFDMA 부반송파 매핑방식은 LFDMA 부반송파 매핑방식 보다 낮은 PAPR을 가진다. 인접채널에 대한 간섭을 줄이기 위하여 파형정형된 IFDMA 신호의 경우 RRC 여파기의 롤오프 계수가 1에서 0으로 감소함에 그 대역폭은 좁아지지만 시간영역에서 부엽(side lobe)성분의 크기가 증가되어 PAPR이 크게 증가할 수 있다. 이에 반하여 LFDMA의 경우, 부반송파 매핑과정에서 이미 높은 PAPR이 발생하여 파형정형 과정에서 롤오프 계수의 변화에 따른 PAPR의 변화는 미미하다.^[4] 따라서 본 논문에서는 IFDMA 만 다루기로 한다.

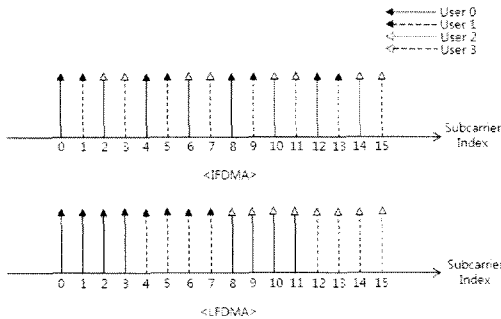


그림 2. SC-FDMA의 부반송파 할당

2.2 파형정형된 IFDMA 신호의 PAPR

IFDMA 방식으로 부반송파 매핑된 기저대역 SC-FDMA 신호의 경우 PAPR이 이론적으로 0의 값을 가진다. 하지만 대역 제한된 채널을 통과하기 위하여 파형정형 여파기로 전송 신호의 스펙트럼을

제한하여야 한다. 일반적으로 송신기와 수신기에 동일한 여파기를 사용한다면 표본화 순간에 심벌 간 간섭이 발생하지 않는 RRC 여파기가 파형정형 여파기로 널리 사용되고 있다.

RRC 여파기의 주파수 영역의 전달함수 $H_{RRC}(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.^[7]

$$H_{RRC}(f) = \begin{cases} \sqrt{T}, & |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T} \\ \sqrt{T} \cos \left[\frac{\pi T}{2\alpha} \left(|f| - \frac{1-\alpha}{2T} \right) \right], & \frac{1-\alpha}{2T} < |f| < \frac{1+\alpha}{2T} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

여기서 T 는 심벌 간격을 의미하며 α 는 롤오프 계수로써 $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 값을 가진다. RRC 여파기는 α 가 0일 때 대역 외 전력방사가 가장 적고 α 가 증가함에 따라 대역 외 전력방사가 증가하여 소요대역폭이 증가 하게 된다. 하지만 α 의 값이 0으로 가까워질수록 부엽(side lobe)이 커진다.

큰 부엽성분은 수신기에서 표본화 시간 오차로 인하여 심벌 간 간섭의 영향을 크게 받을 뿐만 아니라 파형정형 과정을 수행한 후의 전송신호의 침투 전력이 증가할 수 있다.^[8-9] RRC 여파기를 통과한 IFDMA의 신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$x(t) = e^{jw_c t} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{x}_m h_{RRC}(t-mT) \quad (5)$$

여기서 w_c 는 시스템의 중심 주파수이며 \tilde{x}_m 은 IFDMA 부반송파 매핑 신호이다. 그리고 $h_{RRC}(t)$ 는 RRC 여파기의 임펄스 응답이다. 전송신호 $x(t)$ 의 PAPR은 다음과 같이 정의한다.

$$PAPR = \frac{\text{peak power of } x(t)}{\text{average power of } x(t)} \quad (6)$$

그림 3은 부반송파의 수 M 은 256, 심벌의 수 N 은 64, 사용자 수 Q 는 4 이며 QPSK 변조라고 가정했을 때 α 의 변화에 따른 IFDMA신호의 PAPR을 나타내었다. 이하 본 논문의 시뮬레이션에서는 위의 가정을 따른다.

PAPR 값이 특정 $PAPR_0$ 보다 클 확률이 0.1% ($\Pr\{PAPR > PAPR_0\} = 10^{-3}$)인 경우 IFDMA는 α 가 0에서 1로 증가함에 따라 PAPR이 줄어든다. 이것은 RRC 여파기의 임펄스 응답 특성이 α 가 0

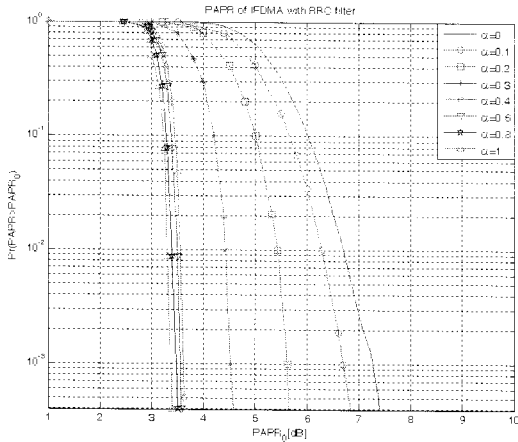


그림 3. RRC 여파기의 α 에 따른 IFDMA 신호의 PAPR

에서 1로 증가함에 따라 시간영역에서 부엽성분들의 크기가 감소하기 때문이다. 따라서 α 가 0에서 1로 증가함에 따라 증폭기의 전력효율은 향상된다.

2.3 파형정형된 IFDMA 신호의 스펙트럼

파형정형된 IFDMA 신호의 스펙트럼에 대하여 분석하기 위하여 대역 외 전력방사 규정^[10]을 참조하였다. 대역 외 전력방사가 -30dB를 만족하는 소요 대역폭을 α 에 따른 IFDMA 신호의 스펙트럼을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 계산하였다. 그림 4는 대역 외 전력방사가 -30dB를 만족하는 소요 대역폭을 α 값에 따라 비교한 것이다.

전송 신호의 대역폭은 α 값이 0에서 1로 증가함에 따라 대역 외 전력방사가 증가하여 -30dB를 만족하는 대역폭이 $\frac{1.064}{T}$ 에서 $\frac{1.876}{T}$ 로 약 1.8배 증가 하는 것을 알 수 있다. 여기서 T는 심벌 간격이다. IFDMA 신호는 RRC 여파기의 α 값을 크게 하여 PAPR을 줄임으로써 증폭기의 효율을 향상시킬 수 있으나, α 의 증가에 따른 대역 외 전력방사를 증가시켜 스펙트럼의 효율은 저하될 수 있다.

III. 클리핑이 스펙트럼과 BER에 미치는 영향

3.1 클리핑

신호의 PAPR이 큰 경우 선형 증폭기의 전력효율은 상당히 낮아질 수 있다. 따라서 높은 PAPR을 가지는 신호는 증폭기에 입력되기 전 특정 값 이하로 제한하는 클리핑을 수행 한다. 클리핑은 첨두전력을 특정 값(A)을 넘지 못하게 제한하여 증폭기의 전력효율을 높일 수 있는 기법이다.^[11] 다음 식

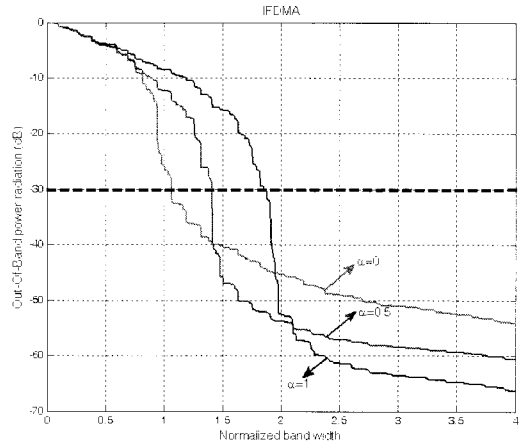


그림 4. RRC 여파기의 α 에 따른 -30dB 대역폭 비교

은 입력 x 에 대해 제한 첨두전력 $|A|$ 를 가지는 클리핑 회로의 특성이다.

$$y = \begin{cases} -A, & x < -A \\ x, & -A \leq x \leq A \\ A, & A < x \end{cases} \quad (7)$$

하지만 이러한 신호의 클리핑에 의해 신호의 높은 고주파 성분이 다시 발생하여 대역폭을 증가시킬 수 있으며, 또한 신호의 왜곡으로 인하여 오류가 발생할 수 있다. 따라서 시스템 설계자는 증폭기의 선형성과 클리핑 임계값을 대역폭 효율, 오류성능 및 증폭기의 전력효율을 고려하여 적절한 α 값과 클리핑 임계값을 선택하여야한다.

3.2 클리핑이 스펙트럼에 미치는 영향

IFDMA 신호를 클리핑 했을 때 그 스펙트럼의 변화를 클리핑 임계값을 7dB부터 1dB까지 1dB씩 감소시키며 조사하였다. 그림 5는 여파기의 α 가 0일 때, 클리핑 임계값에 따른 스펙트럼의 변화를 나타내었다. 그림에서 x 축은 심벌 간격 T에 대한 정규화된 대역폭을 나타낸다. 클리핑 임계값이 7dB에서 1dB로 감소함에 따라 신호의 PAPR이 줄어 증폭기의 효율을 증가시킬 수 있지만, 대역 외 전력방사가 증가하고 -30dB를 만족하는 소요 대역폭이 증가하는 것을 알 수 있다.

여파기의 α 와 클리핑 임계값에 따른 -30dB를 만족하는 정규화된 소요 대역폭을 표 1에 나타내었다. 표에서 대역폭이 제시되지 않은 것은 임계값이 증가하더라도 소요 대역폭의 변화가 미미한 것이다. 그리고 임계값 ∞ 는 클리핑을 하지 않은 경우이다. 표는 신호가 클리핑이 많이 될수록 대역폭이 더 넓

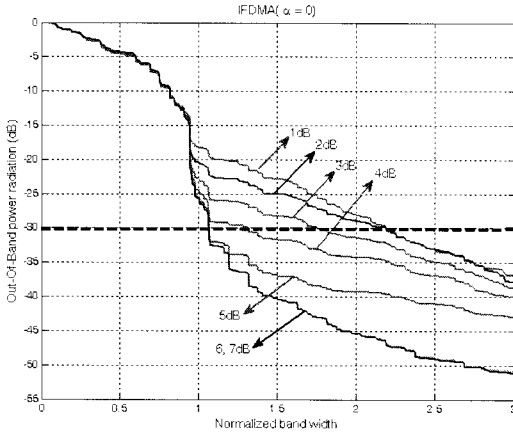


그림 5. 클리핑 임계값에 따른 스펙트럼의 변화($\alpha=0$)

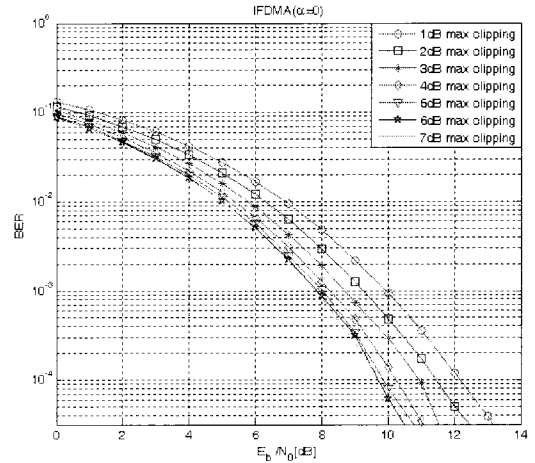
표 1. 롤오프 계수와 임계값에 따른 -30dB 소요 대역폭

α	임계값 [dB]	대역폭 [B/T]	α	임계값 [dB]	대역폭 [B/T]
0	1	2.192	0.2	1	2.258
	2	2.188		2	2.100
	3	1.756		3	1.286
	4	1.314		4	1.160
	5	1.064		5	1.130
	∞	1.064		∞	1.130
0.4	1	2.532	0.6	1	2.820
	2	1.406		2	1.474
	3	1.314		3	1.416
	∞	1.314		∞	1.416
0.8	1	3.064	1.0	1	3.402
	2	1.722		2	1.920
	3	1.634		3	1.876
	∞	1.643		∞	1.876

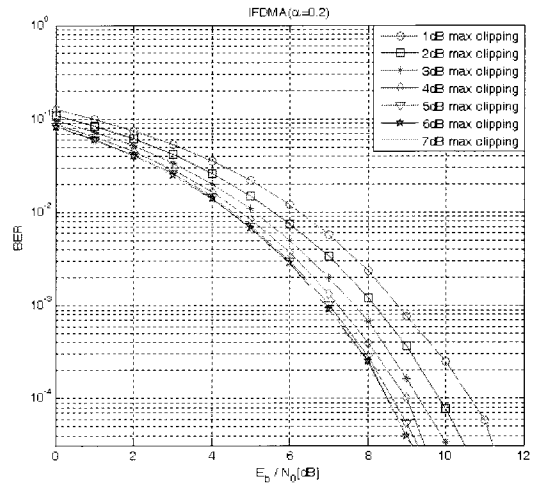
어짐을 보여준다. 이는 클리핑으로 말미암아 갑작스런 변화가 생긴 신호가 증가했기 때문이다. 그리고 클리핑 임계값이 증가할수록 클리핑이 대역폭에 미치는 영향은 점점 감소하였다. 여파기의 α 가 0.4 이상일 때 임계값 3dB로 클리핑된 신호의 대역폭은 클리핑 되지 않은 신호의 대역폭과 거의 동일 하다.

3.3 Clipping이 BER에 미치는 영향

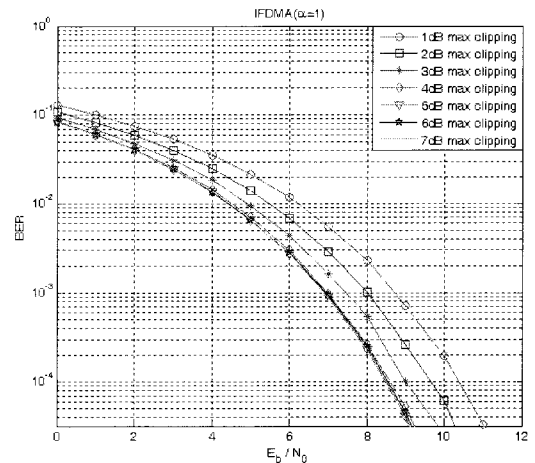
클리핑이 오류성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 클리핑 임계값을 7dB에서 1dB로 변화 시키며 각각의 α 에 대하여 가산성 백색잡음 환경에서 IFDMA 신호의 BER을 조사하였다. 음성통신이 요구하는 BER 10^{-4} 을 만족하는 신호 대 잡음비를 분석의 기준으로 하였다. 그림 6은 여파기의 α 가 각각 0, 0.2, 1일 때 클리핑 임계값에 따른 IFDMA



(a) $\alpha=0$



(b) $\alpha=0.2$



(c) $\alpha=1$

그림 6. 클리핑 임계값에 따른 BER

시스템의 오류성능을 나타내었다.

α 가 0일 때, 클리핑 임계값이 7dB에서 1dB로 감소함에 따라 신호의 왜곡이 증가하고 이에 따라 BER 10⁻⁴을 만족하는 신호대 잡음비가 9.8dB에서 12.15dB로 증가함을 보여준다. 임계값이 7dB에서 4dB로 감소하기까지는 오류성능의 저하가 상대적으로 적게 일어났지만 4dB 이하에서는 큰 폭의 성능 저하가 일어남을 보인다. 그리고 여파기의 α 가 0.2인 경우 α 가 0인 경우에 비해 전체 임계값에 대해 약 1.5dB의 BER 성능개선을 보인다. 이것은 α 가 0.2일 때 PAPR이 상대적으로 작아 클리핑에 의한 신호의 왜곡이 적게 일어났기 때문이다. 또한 α 가 0.2일 때 임계값의 변화에 따른 BER의 변화는 0.1일 때와 거의 유사한 추세를 보여준다. 그리고 그림 6의 (c)는 α 가 0.2에서 1로 변하더라도 BER의 변화는 미미함을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 RRC 여파기에 의해 파형정형된 IFDMA 신호를 여파기의 α 에 따른 PAPR과 대역폭을 분석하였다. 또한 시스템 증폭기의 요구조건을 충족시키기 위하여 전송신호를 클리핑 하였을 때, 클리핑이 스펙트럼과 오류성능에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 그 결과, RRC 여파기의 α 가 0에서 1로 증가함에 따라 부대엽이 감소하여 0.1% PAPR이 7.2dB에서 3.4dB로 감소하였다. 하지만 그에 따라 대역 외 전력방사 -30dB이하를 만족하는 정규화된 대역폭은 1.064에서 1.867로 증가하였다.

IFDMA 신호에 클리핑을 수행하였을 때 클리핑을 많이 할수록 신호의 대역폭은 증가함을 보였다. 그러나 여파기의 α 가 0.3 이상이고 클리핑 임계값이 3dB 이상인 경우에는 클리핑이 대역폭에 미치는 영향은 미미하였다.

여파기의 α 가 0에서 0.2로 증가하였을 때 신호의 오류성능은 BER 10⁻⁴을 기준으로 약 1.3dB 증가하였지만 α 가 0.2 이상인 경우에는 α 가 증가하여도 오류성능은 거의 변하지 않았다. 신호의 클리핑을 수행하였을 때 임계값이 4dB 이상인 경우에는 오류성능에 미치는 영향은 미미하였지만 신호의 왜곡이 심한 임계값 4dB 이하인 경우는 임계값이 작아질수록 오류성능이 상대적으로 많이 저하되었다.

IFDMA 신호에 대역폭 제어를 위한 RRC 여파기와 PAPR을 줄이기 위한 클리핑이 사용되어 질

때는 시스템의 조건에 따라 적절한 롤오프 계수와 클리핑 임계값이 선택되어야 한다. 예를 들어 대역폭과 PAPR을 같은 비용으로 가정했을 때 롤오프 계수 0.2와 클리핑 임계값 4dB가 적절한 선택이 될 수 있다. 따라서 앞으로 실제 시스템에서 비용문제를 동시에 고려했을 때 적절한 시스템 파라미터를 선택하는 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] R. O' Neill and L. Lopes, "Performance of amplitude limited multitone signals," *Proc. IEEE VTC'94*, Stockholm, Sweden, pp. 1657-1679, Jun. 1994.
- [2] S. L. Miller and R. J. O'Dea, "Peak Power and Bandwidth Efficient Linear Modulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 12, pp. 1639-1648, Dec. 1998.
- [3] 3rd Generation Partnership Project (3GPP); Technical specification group radio access network; physical layer aspects for evolved UTRA, <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25814.htm>.
- [4] H. G. Myung, J. Lim and D. J. Goodman, "Peak-to-Average Power Ratio of Single Carrier FDMA signal with pulse shaping," *Indoor and Mobile Communications, The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal*, Helsinki, Finland, pp.1-5, Sep., 2006.
- [5] 임민중, "3GPP RAN LTE 기술 개요 및 표준화 현황", *한국통신학회논문지*, 제 33권, 제 10호, pp. 964-971, 10. 2008.
- [6] U. Sorger, I. D. Broeck, and M. Schnell, "Interleaved FDMA-A new spread spectrum multiple access scheme," *Proc. IEEE ICC '98*, Atlanta, GA, pp. 1013-1017, Jun., 1998.
- [7] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Second ed. Prentice Hall PTR, 2001.
- [8] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Second ed. Prentice Hall PTR, 2002.
- [9] O. P. Sharma, V. Janyani and S. Sancheti, "Analysis of raised cosine filtering in communication systems," *WCSN. '07. Third International Conference on*, pp. 915, 13-15, Dec. 2007.
- [10] J. P. Castro, *The UMTS network and radio access*

technology: *Air interface techniques for future mobile systems*. New York: Wiley, 2001.

- [11] X. Li and L. J. Cimini, "Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*, pp. 1634-1638, May. 1997.

박 승 용 (Seung-Yong Park)

정회원



2007년 2월 부산대학교 정보통신 공학부 공학사
2009년 2월 부산대학교 컴퓨터 공학과 공학석사
2009년 2월~현재 롯데정보통신 SM사업부

<관심분야> SC-FDMA, OFDM, SAP

김 정 구 (Jeong Goo Kim)

종신회원



1988년 2월 경북대학교 전자공학과 공학사
1991년 2월 경북대학교 전자공학과 공학석사
1995년 8월 경북대학교 전자공학과 공학박사
1995년 3월~현재 부산대학교 정보컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 정보 및 부호이론, 디지털 통신시스템, 디지털 멀티미디어 방송 시스템