

Signal Distortion Techniques 을 적용한 Eureka 147 DAB 시스템의 성능평가

정영호*, 박소라*, 이수인*, 김환우**
한국전자통신연구원 방송시스템연구부*
충남대학교 정보통신공학부**

Performance Evaluation of Eureka 147 DAB System with Signal Distortion Techniques

Young-Ho Jeong*, So-Ra Park*, Soo-In Lee*, Whan-Woo Kim**
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)*
Chungnam National University (CNU)**
E-mail: yhcheong@etri.re.kr

요약

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)의 단점인 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)을 개선하기 위한 방법 중에서 SDT(Signal Distortion Technique)는 전송시스템의 규격 및 수신기의 변경 없이도 적용 가능한 이점이 있다. 본 논문에서는 SDT에 속하는 clipping과 peak windowing 기법을 Eureka 147 DAB(Digital Audio Broadcasting) 시스템에 적용하여 얻은 BER 및 PSD 성능결과를 토대로 PAPR 개선 정도에 따른 시스템의 요구 E_s/N_0 및 out-of-band의 PSD 열화 정도를 분석하였다. Hamming windowing을 적용한 경우, PAPR 4dB에서 clipping에 비해 요구 E_s/N_0 는 비슷한 열화정도가 나타났으나, out-of-band의 PSD는 5dB 정도 개선되는 성능을 보였다.

1. 서론

OFDM 신호는 독립적으로 변조된 다수의 부반송파로 구성되어 있으며, 이들이 동일한 위상을 가지는 경우 높은 PAPR 을 갖게 된다. 이와 같은 높은 PAPR 은 높은 양자화 bit resolution 처리를 요구하므로 AD/DA 변환기의 구현 복잡도를 증가시킨다. 또한 peak 신호의 포화(saturation) 영역에서의 비선형 증폭에 의해 발생하는 시스템 성능저하를 방지하기 위해 HPA(High Power Amplifier)의 동작 범위를 낮추게 됨으로써(back-off) 전력효율을 감소시키게 된다. 따라서 OFDM 을 적용한 시스템에서의 PAPR 감소 기술에 대한 연구는 성능개선을 위해 필연적이라 할 수 있다.

OFDM 전송방식의 PAPR 개선을 위해 제안된 알고리즘들은 SDT(Signal Distortion Technique), 코딩 기술, 그리고 SST(Symbol Scrambling Technique)의 크게 세가지 범주로 분류할 수 있다. SDT 는 peak 신호 주변의 OFDM 신호를 비선형적으로 왜곡시킴으로써 간단히 peak 전력을 감소시키는 방법으로 clipping, peak windowing, peak cancellation 기법 등이 있다[1]-[4]. 코딩

기술은 높은 PAPR 을 갖지 않는 OFDM 심벌 조합이 생성되도록 하는 특별한 형태의 FEC(Forward Error Correcting) coding 을 의미하며, Golay complementary sequences, Reed-Muller code 등이 제안되었다[5],[6]. SST 는 가장 작은 PAPR 을 갖는 OFDM 심벌을 구성할 수 있는 sequence 을 선택 혹은 스크램블링하는 방법으로 selected mapping, partial transmit sequences 기법 등이 있다[7]-[9]. SDT 는 송신 단에서의 간단한 신호처리만으로 구현 가능하므로 전송규격의 변경 없이도 적용될 수 있으며, 또한 기존 수신기의 구조변경이 필요하지 않다. 그러나 coding 기법과 SST 는 전송규격의 변경 혹은 별도의 신호처리 모듈이 수신기에 추가되어야 하므로 서비스중인 시스템에서의 구현은 불가능하다.

'87 년부터, 유럽 각국은 Eureka 147 공동 프로젝트를 결성하여 이동수신에서 고음질의 오디오 서비스를 보장할 수 있는 DAB 전송방식에 대한 연구를 본격적으로 시작하였다. '92 년부터는 COFDM(Coded-OFDM) 변조 방식과 MPEG-1, -2 layer II 오디오 코덱을 기반으로 한 DAB 전송시스템의 구현 및 성능 평가시험을 실시하여, '95 년 초 유럽 단일 표준의 DAB 전송방식 개발을 완료하였다[10][11]. 영국 BBC 의 공식 DAB 서비스를 시작으로 유럽 대부분의 나라와 캐나다, 싱가포르, 중국 등에서 본방송 및 실험방송이 진행 중에 있다. 현재까지 국제 표준화 및 상용화가 완료된 시스템은 Eureka 147 밖에 없으며, 우리나라도 금년 초, '디지털 라디오 방송 잠정 표준방식 공청회'를 통해 Eureka 147 전송방식을 DAB 신호전송을 위한 잠정 표준방식으로 발표하였다.

본 논문에서는 앞서 설명한 SDT에 속하는 clipping과 peak windowing 기법을 Eureka 147 DAB 시스템에 적용하여 얻은 BER 및 PSD 성능결과를 토대로 PAPR 개선 정도에 따른 시스템의 BER 및 out-of-band의 PSD 열화 정도를 분석하였다. Peak windowing 적용 시 window의 종류 및 windowing 길이에 따른 시스템의 성능변화를 분석하였으며, 최종적으로 두 기법간의 성능을 비교 평가하였다.

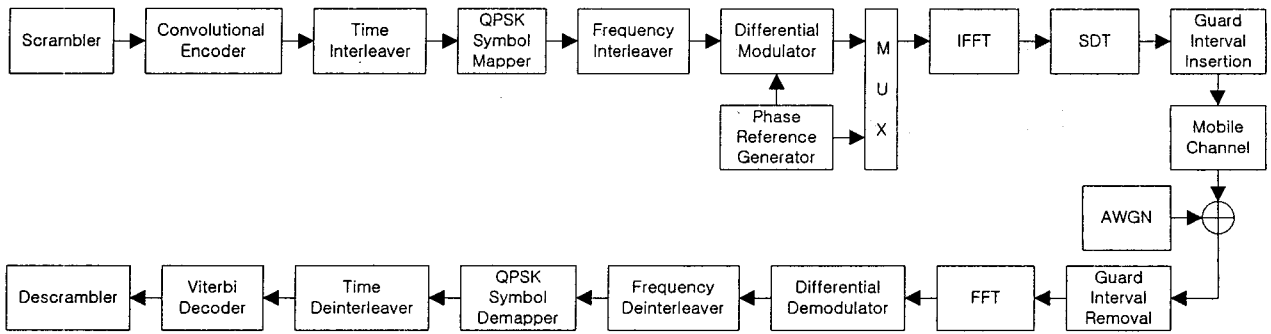


그림 1. Eureka 147 DAB 시스템 구성도

2. Eureka 147 DAB 시스템 모델

2.1 Eureka 147 DAB 시스템 모델

모의실험을 위한 Eureka 147 DAB 시스템의 구성도는 그림 1 과 같다. 랜덤 이진 데이터는 RF 전송신호의 에너지 분산을 위해 스크램블러를 통과한 후, 데이터 전송율과 선택된 UEP(Unequal Error Protection) 혹은 EEP(Equal Error Protection) 프로파일에 따라 서로 다른 부호화율로 길쌈 부호화된다. 16 개의 전송 프레임 데이터(각 전송 프레임이 시간 영역에서 24ms 구간의 정보를 포함하므로, 총 384ms 인터리빙 길이)구간에 대해 시간 인터리빙된 데이터는 QPSK 심벌 맵핑 후, 주파수 선택적 페이딩에 대한 영향을 최소화하기 위해 주파수 인터리빙을 적용한다. Phase 기준신호를 생성하여 MUX 를 통해 전송 프레임의 두 번째 심벌에 위치시키고, 이를 기반으로 FIC(Fast Information Channel) 및 MSC(Main Service Channel)를 구성하는 OFDM 심벌에 대해 differential 변조를 수행한다. 전송 프레임을 구성하는 각각의 OFDM 심벌들은 2^N 개(각 모드별 N 값, Mode I: 11, Mode II: 9, Mode III: 8, Mode IV: 10)의 IFFT 처리 크기에 맞추기 위해 zero-padding 시킨 후, IFFT 를 통해 OFDM 변조된다. ISI(Inter-Symbol Interference)를 제거하기 위해 유효 심벌구간 후미의 약 1/4 에 해당하는 데이터(보호구간)를 유효 심벌 앞에 삽입하여 함께 전송한다. 전송신호는 이동채널을 통과한 후, 가우시안 형태의 잡음이 더해진다. 수신 단에서는 보호구간(guard interval)을 제거하고, FFT 를 통해 시간 영역의 신호를 주파수 영역으로 변환시킨다. Differential 복조를 통해 얻어진 데이터는 주파수 디인터리버, QPSK 심벌 디맵퍼, 시간 디인터리버를 거쳐 Viterbi 복호기에 입력된다. 이 때 길쌈 부호화기의 입력과 Viterbi 복호기의 출력단 데이터를 이용하여 BER 측정을 이루어진다. Eureka 147 DAB 시스템은 고음질의 오디오 서비스 제공을 위해 BER 10^{-4} 을 목표로 하며, 이 기준은 Eureka 147 시스템과 관련된 모든 성능분석에 적용된다[11].

2.2 이동채널 모델

이동채널 모델로는 COST(European Cooperation in

the Field of Scientific and Technical Research)의 project 207 를 통해 제안된 그림 2와 같은 구조의 이동채널 모델을 적용하였다[10].

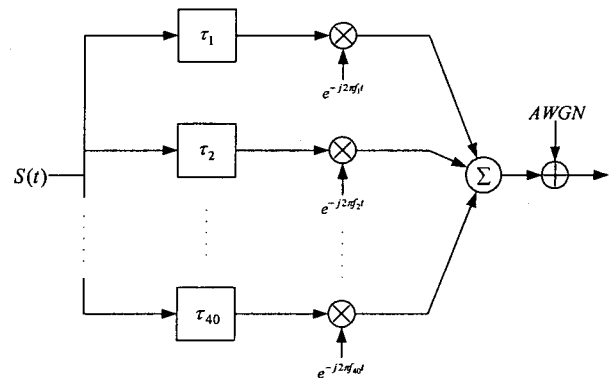


그림 2. 이동채널 모델

적용된 이동채널 모델은 다중 경로수 40, 각 경로마다 각기 다른 고정 지연값 τ_i , 고정 도플러 편이 f_i , 그리고 동일한 감쇄값을 갖는다. 각 경로의 지연값은 식 (1)의 확률 밀도 함수로부터 얻어진다.

$$p(\tau) = \begin{cases} Ke^{-\tau/\sigma} & 0 < \tau < \tau_{\max} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

이 값은 주어진 다중경로 전력지연 프로파일(power delay profile)에 해당한다. 식(1)에서 σ 는 지연값들의 표준편차인 지연 확산(delay spread)이며, τ_{\max} 는 최대 지연값을 나타낸다. 이때 K 는 상수이다. 전력지연 프로파일로는 현장시험을 통해 얻어진 그림 3 과 같은 TU(Typical Urban) 지역의 전력지연 프로파일 이 사용되었다.

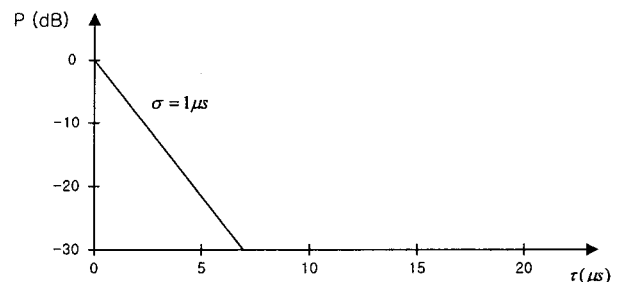


그림 3. TU 지역의 전력지연 프로파일

도플러 편이(Doppler shift)는 식 (2)에 의해 각 경로마다 고정된 값을 갖는다.

$$f_i = f_{\max} \cos(\theta_i) \quad (2)$$

여기서, f_{\max} 는 v/λ (이동체 속도/RF 반송파 파장)에 의해 결정되는 최대 도플러 편이를 나타내며, θ_i 는 $0 \sim 2\pi$ 사이의 균일분포(uniform distribution)를 가지는 랜덤 변수이다.

3. Signal Distortion Techniques

3.1 Clipping

Clipping 은 OFDM signal envelope $m_E(t)$ 의 값이 식 (3)으로 표현되는 clipping level C_{th} 값 이상인 경우, 이를 강제적으로 C_{th} 값으로 출력하는 것으로 가장 간단히 PAPR 을 감소시키는 방법이다.

$$C_{th} = m_{E_{eff}} \cdot 10^{\frac{PAPR}{20}} \quad (3)$$

여기서, $m_{E_{eff}}$ 는 $m_E(t)$ 의 RMS(Root Mean Square) 값을 의미한다.

그러나 이와 같은 신호왜곡은 간섭을 야기시켜, 결국 시스템의 BER 성능을 저하시키거나 혹은 OFDM 신호의 비선형 왜곡으로 인해 out-of-band 의 스펙트럼 레벨이 증가되어 인접채널 간섭의 원인이 된다.

3.2 Peak windowing

Peak windowing 은 식 (4)와 같이 $m_E(t)$ 와 가중함수(Weighting function) $b(t)$ 를 곱함으로써 이루어지며, 이 때 peak windowing 된 새로운 signal envelope $\tilde{m}_E(t)$ 을 구할 수 있다.

$$\tilde{m}_E(t) = m_E(t) \cdot b(t) \quad (4)$$

가중함수 $b(t)$ 는 식 (5)와 같이 window 함수 $w(t)$ 에 의해 결정된다.

$$b(t) = 1 - \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \cdot w(t - t_n) \quad (5)$$

여기서, t_n 은 임의의 window level(W_{th})을 초과하는 $m_E(t)$ 의 local maximum 값에 대한 시간축상의 위치를 의미한다. 또한 계수 a_n 은 새로운 $\tilde{m}_E(t)$ 가 임의의 W_{th} 를 초과하지 않도록 식 (6)에 의해 결정된다.

$$a_n = 1 - \frac{W_{th}}{m_E(t_n)} \quad (6)$$

그림 4 는 peak windowing 적용에 따른 signal envelope 의 변화와 더불어 $b(t)$ 의 형태를 보여주고 있다. W_{th} 는 원하는 PAPR 이 주어졌을 경우, 식 (7)에 의해 결정된다.

$$W_{th} = m_{E_{eff}} \cdot 10^{\frac{PAPR}{20}} \quad (7)$$

본 논문에서는 세가지 형태의 $w(t)$ 즉, Gaussian shaped window, hamming window, hanning window 를 적용하여 시스템 성능을 분석하였다.

■ Gaussian shaped window

$$w(t) = e^{-\gamma t^2} \quad (8)$$

여기서, γ 는 가중함수 $b(t)$ 의 최적화를 위해 이용되며, window length 31, 15, 7, 3 인 $w(t)$ 를 얻기 위해 0.02, 0.09, 0.5, 4 의 네가지 γ 값을 적용하였다.

■ Hanning Window

$$w(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \frac{2\pi n}{N} \right], \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (9)$$

■ Hamming Window

$$w(t) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos \frac{2\pi n}{N}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (10)$$

여기서, N 은 window length 를 나타낸다.

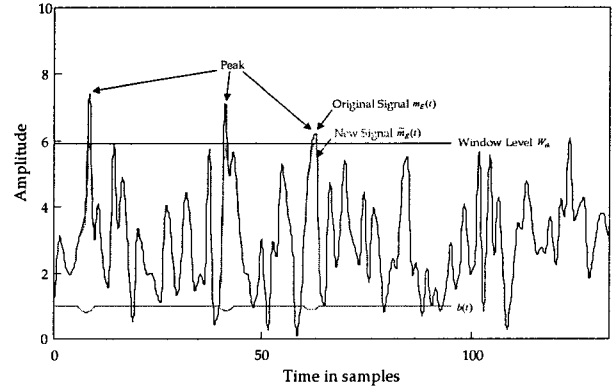


그림 4. Peak windowing 처리방법

4. 실험 결과 및 분석

SDT 를 적용한 Eureka 147 시스템에 대한 성능분석은 각 분석조건에 대해 Viterbi 디코더 출력단의 데이터와 길쌈 부호기의 입력 데이터를 상호 비교하여 10^{-4} BER 를 만족하는 요구 E_s/N_0 값을 조사함으로써 수행된다. 이때 동기 및 필터링은 완벽하다고 가정하였으며, AGC(Automatic Gain Control), 수신기 LO(Local Oscillator)의 phase noise, 송신 또한 수신 장비의 비선형 특성에 대한 영향은 고려되지 않았다. 따라서 얻어진 결과는 주어진 채널환경에서 보장할 수 있는 최적 성능을 의미한다. 모의실험을 위해 적용된 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. Eureka 147 DAB 시스템 파라미터

System Parameter	Selected Value
Frequency	240 MHz
Mobile Velocity	100 km/h
Channel Model	TU channel model
Transmission Mode	Mode I
EEP Profile	3-A (R=1/2)
Data Bit Rate	256kbps
Number of Transmission Frame	200

4.1 PAPR 가변에 따른 BER 성능

DAB 신호는 전송모드 I 에서 SDT 를 적용하지 않은 경우, 약 12.45dB 의 PAPR 을 갖는 것으로 조사되었다. 그림 5 는 clipping 을 적용 시, PAPR 가변에 따른 BER 성능분석 결과를 보여준다. 그림

5의 결과로부터 PAPR을 12.45dB에서 3dB로 낮추는 동안 약 0.5dB의 성능열화만이, 2dB로 낮추었을 경우 0.5dB의 추가 성능열화가 발생됨을 알 수 있다.

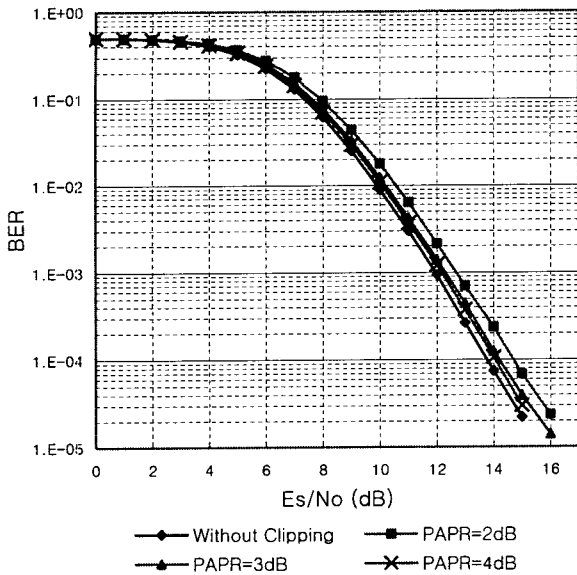


그림 5. Clipping level 가변에 따른 BER 성능분석 결과

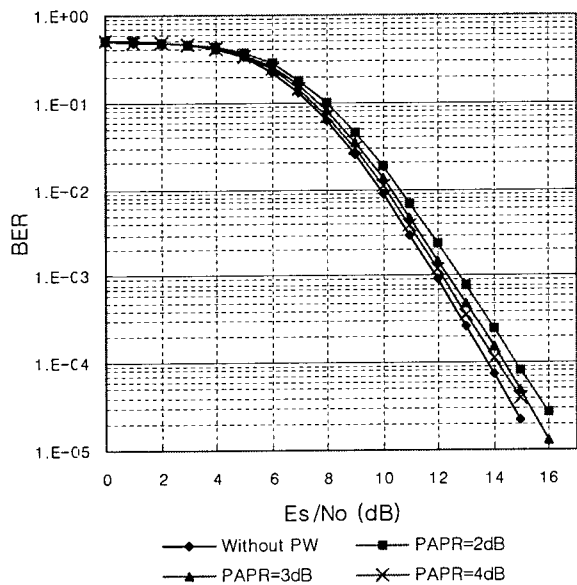


그림 6. Window length 7인 Gaussian shaped window 적용 시, window level 가변에 따른 BER 성능분석 결과

그림 6은 window length 7인 Gaussian shaped window 적용 시, PAPR 가변에 따른 BER 성능분석 결과를 나타낸다. 앞서 설명한 clipping의 결과와 유사하게 PAPR을 12.45dB에서 3dB로 낮추는 동안 약 0.6dB 정도의 성능 열화만, 2dB로 낮추었을 경우 0.4dB의 성능열화가 추가로 발생되었다.

표 2는 SDT(peak windowing의 경우, window length 7 적용)가 적용된 Eureka 147 시스템에서 10^{-4} BER을 만족하기 위해 필요한 Es/N_0 값이다. Hamming window

적용 시, 원 신호에 비해 PAPR을 약 10dB 정도 낮추어도(PAPR=2dB) 대략 1dB 정도의 성능열화만이 발생된다. 또한 clipping과 비교하면 0.1 ~ 0.3dB 정도의 성능열화가 발생하지만, Gaussian shaped window에 비해서는 0 ~ 0.1dB, Hanning window에 비해서는 0 ~ 0.2dB 정도 우수하다.

표 2. PAPR 가변에 따른 시스템의 요구 Es/N_0

	Without SDT	PAPR		
		4dB	3dB	2dB
GSW	13.75	14.10	14.35	14.80
N_W		14.10	14.60	15.00
M_W		14.10	14.45	14.80
Clipping		14.05	14.20	14.70

여기서, GSW는 Gaussian, N_W는 Hanning, M_W는 Hamming window를 의미한다.

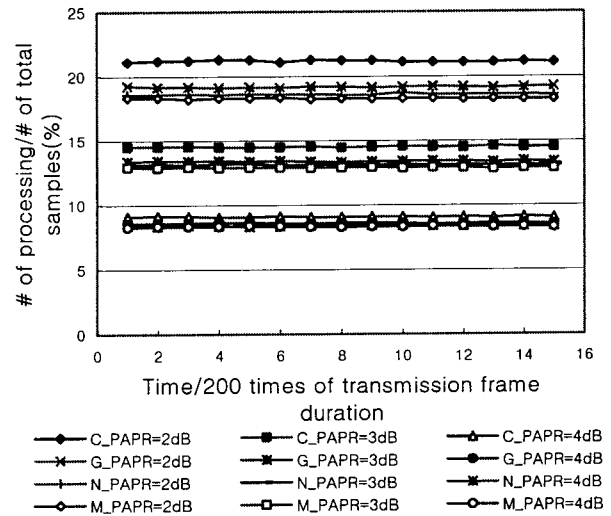


그림 7. PAPR 가변에 따른 SDT 적용 비율

그림 7은 임의의 PAPR 값에 대해 전체 신호 샘플 중 SDT가 적용되는 비율을 보여준다. 이때 clipping은 오직 하나의 신호 샘플에 대해 적용되지만, peak windowing(=7)은 window length 만큼의 샘플에 대해 적용되므로 그 적용비율이 clipping에 비해 상대적으로 낮게 나타난다. 여기서, C_PAPR은 clipping이 적용된 경우를 의미하며, G_PAPR, N_PAPR, M_PAPR은 각각 Gaussian shaped window, Hanning window, Hamming window가 적용되었음을 나타낸다. Window 함수별로 적용비율 차이가 나타나는 이유는 식 (8) ~ 식 (9)에 의해 그려지는 $w(t)$ 의 모양을 보면 쉽게 알 수 있다.

4.2 Window length 가변에 따른 BER 성능

그림 8은 Gaussian shaped windowing이 적용 시, window length 가변에 따른 BER 성능분석 결과를 나타낸다. Window length가 작아질수록 미약하지만 성능이 개선됨을 알 수 있는데, 이는 windowing되는 시간영역에서의 OFDM 신호 샘플수가 줄어들기 때문에 in-band 내의 신호왜곡 영향이 감소되어 나타나는 결과이다. 다만 PAPR 적용 값이 2dB인

관계로 그림 7 에서 보는 바와 같이 이미 너무 많은 신호 샘플에 왜곡이 생긴 탓에 성능개선 정도는 미미함을 알 수 있다. Window length 를 3 으로 했을 경우, peak windowing 을 적용하지 않은 경우보다 약 0.8dB 정도의 성능저하가 발생한다.

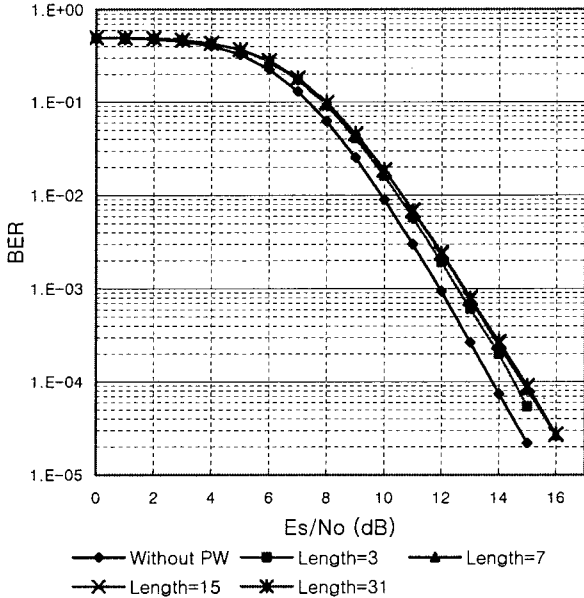


그림 8. Gaussian shaped window의 length 가변에 따른 BER 성능분석 결과

4.3 Window length 가변에 따른 PSD 성능

PSD 결과를 분석하기 위한 주파수 축상에서의 기준점을 정하기 위해 그림 9 에서 보는 바와 같이 6MHz TV 대역에서 1.536MHz 대역폭을 갖는 Eureka 147 DAB 채널 및 guard band 의 배치에 대해 다음과 같이 가정하였다. 6MHz 대역폭에 할당될 수 있는 최대 DAB 채널의 수는 3 개이며, 이 때 DAB 채널간 guard band 폭이 동일하다고 가정할 경우 464 kHz 의 guard band 폭이 계산된다. 따라서 PSD 분석 결과의 기준점을 DAB 채널의 중심 주파수로부터 첫번째 인접채널이 나타나는 1.232 MHz 떨어진 지점으로 설정한다.

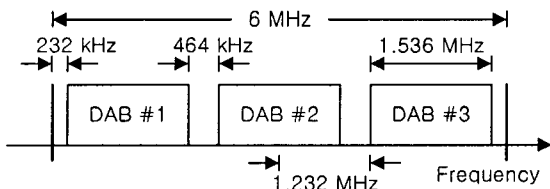
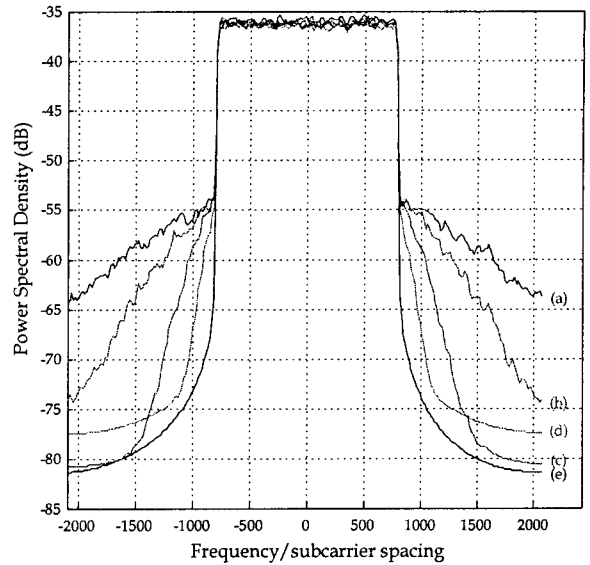


그림 9. 6MHz TV 채널에서 동일 guard band 를 가정했을 경우의 DAB 채널 배치

PAPR 을 2dB 로 고정하고, Gaussian shaped window 의 window length 를 가변 했을 때의 PSD 분석결과는 그림 10 과 같으며, 앞서 설명한 기준점을 토대로 out-of-band PSD 열화 및 시스템 요구 E_s/N_0 의 열화 결과를 표 3 에 나타내었다.



(a) WL=3, (b) WL=7, (c) WL=15, (d) WL=31, (e) Without PW
그림 10. Window length 가변에 따른 Gaussian shaped windowing의 PSD 성능분석 결과

표 3. Gaussian shaped window의 window length 가변에 따른 out-of-band의 PSD 및 요구 E_s/N_0 열화 결과

	Window length			
	31	15	7	3
PSD 열화(dB)	2	8	17	20
E_s/N_0 열화(dB)	1.15	1.15	1.05	0.8

상기 표의 결과로부터 알 수 있듯이, window length 31인 경우, 1.15dB의 E_s/N_0 열화와 2dB의 out-of-band PSD 열화만으로 PAPR을 10dB 이상 줄일 수 있다. 이는 상당한 HPA의 효율 증가를 의미하지만, 시간영역에서의 OFDM 신호 샘플의 19% 정도(그림 7 참조)에 대해 window length 만큼의 곱셈연산이 필요하다. 따라서 peak windowing의 window length는 시스템의 처리속도와 얻고자하는 성능간의 trade-off를 고려하여 결정되어야 한다.

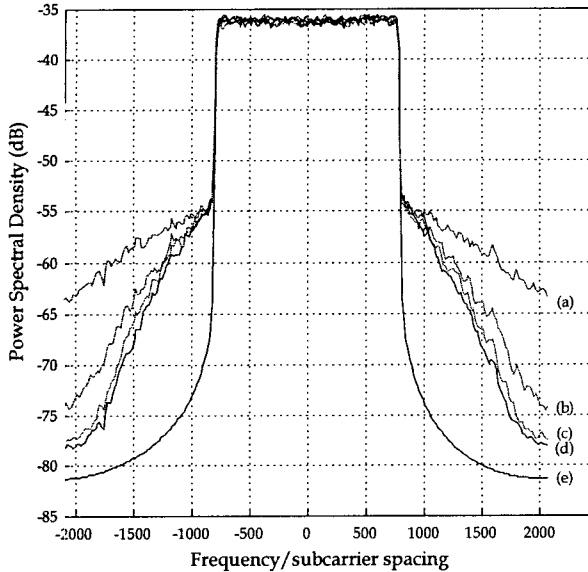
4.4 SDT 적용에 따른 PSD 및 E_s/N_0 성능

그림 11 은 PAPR=2dB 인 경우, clipping 및 window length 7 인 peak windowing 을 적용하여 얻은 PSD 분석 결과이며, 다음과 같은 순서로 out-of-band 의 PSD 성능열화 정도가 심함을 알 수 있다.

Clipping > Gaussian shaped windowing > Hanning windowing > Hamming windowing

표 4 는 peak windowing 기법 중에서 상대적으로 성능이 낮은 Gaussian shaped window 를 제외한 나머지 SDT 방법에 대한 out-of-band PSD 열화 및 시스템 요구 E_s/N_0 의 열화 결과를 보여준다. 표에 정리된 결과에 의하면, Hamming windowing 을 적용한 경우, out-of-band 의 PSD 및 시스템 요구 E_s/N_0 의 열화가 비교적 적은 것으로 나타났다. PAPR 이 4dB 인 경우, 요구 E_s/N_0 는 비슷한 열화정도가 나타났으나, clipping 에 비해 out-of-band 의 PSD 가 5dB 정도

개선되는 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 windowing 적용에 따른 계산량은 clipping에 비해 window length의 배수만큼 증가됨을 고려해야 한다.



(a) Clipping, (b) Gaussian shaped windowing, (c) Hanning windowing, (d) Hamming windowing, (e) Without PW & clipping
 그림 11. PAPR=2dB에서의 peak windowing의 PSD 성능분석 결과

표 4. SDT 적용에 따른 out-of-band의 PSD 및 요구 E_s/N_0 열화 결과

		PAPR (dB)		
		4	3	2
Hanning windowing	PSD 열화(dB)	11	14	17
	E_s/N_0 열화(dB)	0.35	0.85	1.25
Hamming windowing	PSD 열화(dB)	10	13	16
	E_s/N_0 열화(dB)	0.35	0.65	1.05
Clipping	PSD 열화(dB)	15	18	20
	E_s/N_0 열화(dB)	0.3	0.45	0.95

결과적으로 clipping은 임의의 임계값을 넘는 OFDM 신호에 대해 rectangular window를 적용하는 형태로 볼 수 있으며, 반면 peak windowing 기법은 rectangular window 대신 spectral leakage 특성이 좋은 다른 window 함수들을 적용함으로써 낮은 BER 성능 열화 및 out-of-band의 PSD이 개선되는 장점이 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Eureka 147 DAB 시스템의 PAPR 개선을 위해 전송시스템의 규격 및 수신기의 변경이 필요하지 않는 SDT를 적용하여 시스템 성능을 평가하였다. PAPR 개선 정도에 따른 시스템의 요구 E_s/N_0 및 out-of-band의 PSD 열화 정도를 분석을 통해 peak windowing 기법이 clipping에 비해 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었다. 특히 Hamming windowing을 적용한 경우, PAPR 4dB에서 clipping에 비해 요구 E_s/N_0 는 비슷한 열화정도가 나타났으나, out-of-band의 PSD는 5dB정도

개선되는 성능을 보였다.

향후에는 시스템의 BER 및 PSD 성능열화가 발생하지 않는 SST의 Eureka 147 DAB 시스템에 대한 적용 가능성에 대해 연구할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Xiaodong Li and Leonard J. Cimini, Jr., "Effects of Clipping and Filtering on the Performance of OFDM," Proceedings of IEEE VTC'97, vol.3, pp.1634-1638, 1997.
- [2] Richard van Nee and Arnout de Wild, "Reducing the Peak-to-Average Power Ratio of OFDM," Proceedings of IEEE VTC'98, pp.2072-2076, 1998.
- [3] Pauli, M., and H. P. Kuchenbecker, "On the Reduction of the Out-of-Band Radiation of OFDM-Signals," Proceeding of ICC, Atlanta, 1998.
- [4] Pauli, M., and H. P. Kuchenbecker, "Minimization of the Intermodulation Distortion of a Nonlinearly Amplified OFDM Signal," Wireless Personal Communications, vol.4, pp.93-101, Jan. 1997.
- [5] James A. Davis and Jonathan Jedwab, "Peak-to-Mean Power Control in OFDM, Golay Complementary Sequences, and Reed-Muller Codes," IEEE Transaction on Information Theory, vol.45, no.7, pp.2397-2417, Nov. 1999.
- [6] Robert Bauml, Robert Fischer, and Johannes Huber, "Reducing the Peak-to-Average Power Ratio of Multicarrier Modulation by Selected Mapping," Electronics Letters, vol.32, pp.2056-2057, 1996.
- [7] Stefan H. Muller, Robert W. Bauml, Robert F.H. Fischer, and Johannes B. Huber, "OFDM with Reduced Peak-to-Average Power Ratio by Multiple Signal Representation," Annals of Telecommunications, vol.52, no.1-2, pp.58-67, Feb. 1997.
- [8] Stefan H. Muller, and Johannes B. Huber, "OFDM with Reduced Peak-to-Average Power Ratio by Optimum Combination of Partial Transmit Sequences," Electronics Letters, vol.33, no.5, pp.368-369, Feb. 1997.
- [9] ETSI EN 300 401 v1.3.2, *Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers*, ETSI, Sep. 2000.
- [10] Louis Thibault and Minh Thien Le, "Performance Evaluation of COFDM for Digital Audio Broadcasting Part I: Parametric Study," IEEE Transactions on Broadcasting, vol.43, no.1, pp.64-75, March 1997.
- [11] EBU BPN 011, *Collated Performance Evaluations of the Eureka 147 DAB System*, EBU, Sep. 1997.