

# Comanding 기법을 적용한 Eureka 147 DAB 시스템의 PAPR 성능평가

정영호\*, 박소라\*, 이수인\*, 김환우\*\*

\*한국전자통신연구원 방송시스템연구부

\*\*충남대학교 정보통신공학부

## Evaluation on PAPR Performance of Eureka 147 DAB System with Comanding Technique

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) 전송방식은 SCM(Single Carrier Modulation)에 비해 우수한 여러가지 장점들을 가지며, 방송 시스템들중 Eureka 147 DAB(Digital Audio Broadcasting) 시스템에 가장 먼저 채택되었다. 그러나 OFDM 신호의 높은 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) 특성은 D/A, A/D 변환기의 복잡도를 높이고, 고출력 증폭기의 효율성을 감소시키는 원인이 된다. 이를 개선하기 위한 방법 중에, SDT(Signal Distortion Technique)는 전송시스템의 규격 및 수신기의 변경 없이도 적용 가능하다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 SDT에 속하는 comanding 기법을 Eureka 147 DAB 시스템에 적용하여 PAPR 개선 정도에 따른 시스템의 요구  $E_b/N_0$  및 out-of-band의 PSD 열화 정도를 분석하였으며, 이를 clipping 기법의 성능과 비교하였다. 모의실험 결과,  $\mu$  값이 2인 경우, comanding 기법이 PAPR,  $E_b/N_0$ , out-of-band의 PSD 특성 모두에서 clipping 기법에 비해 우수한 성능을 나타냈다. 또한  $\mu$  값을 고정시킨 경우, 정규화 값이 증가할수록 신호왜곡 정도가 줄어들어  $E_b/N_0$ , out-of-band의 PSD 성능개선 정도는 증가하지만, 이와는 반대로 PAPR 값은 개선 정도가 줄어들었다.

### 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 기법에 대한 연구는 시스템의 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, comanding 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][8]. 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 이 서비스 제공중인 시스템에서의 구현은 불가능하다.

1980 년대 후반부터, 유럽 각국은 Eureka 147 공동 프로젝트를 결성하여 이동수신에서 고음질의 오디오 서비스를 제공할 수 있는 DAB (Digital Audio Broadcasting) 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[9]-[11]. 영국 BBC의 서비스를 시작으로 유럽 대부분의 나라와 캐나다, 싱가포르, 중국 등에서 본 방송을 하거나 준비 중에 있다.

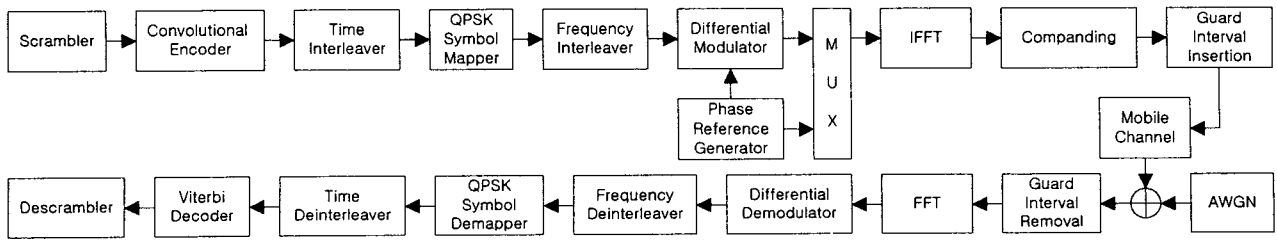


그림 1. Eureka 147 DAB 시스템 구성도

우리나라도 2001년 3월, '디지털 라디오 방송 잠정 표준방식 공청회'를 통해 Eureka 147 전송방식을 DAB 신호전송을 위한 잠정 표준방식으로 발표하였다.

본 논문에서는 앞서 설명한 SDT에 속하는 companding 기법을 Eureka 147 DAB 시스템에 적용하여 얻은 BER, 및 out-of-band의 PSD 성능결과를 토대로 PAPR 개선 정도에 따른 시스템의  $E_b/N_0$  및 out-of-band의 PSD 열화 정도를 분석하였으며, 이를 clipping 기법의 성능과 비교하였다.

## 2. Eureka 147 DAB 시스템 모델

### 2.1 Eureka 147 DAB 시스템 모델

모의실험을 위한 Eureka 147 DAB 시스템의 구성도는 그림 1과 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. 16개의 논리 프레임(각 논리 프레임은 시간영역에서 24ms 구간의 정보를 포함하므로, 총 384ms 인터리빙 깊이)구간에 대해 시간 인터리빙된 데이터는 QPSK 심볼 맵핑후, 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)에 대한 영향을 최소화하기 위해 주파수 인터리빙이 적용된다. Phase 기준신호를 생성하여 전송 프레임의 두 번째 심볼에 위치시키고, 이를 기반으로 FIC(Fast Information Channel) 및 MSC(Main Service Channel)를 구성하는 OFDM 심볼에 대해 differential 변조를 수행한다. 전송 프레임을 구성하는 각각의 OFDM 심볼들은  $2^N$ 의 IFFT 처리를 위해 zero-padding을 수행한 후, IFFT를 통해 시간영역 신호로 변환된다. ISI(Inter-Symbol Interference)를 제거하기 위해 유효 심볼구간 후미의 약 1/4에 해당하는 데이터를 유효 심볼 앞에 삽입하여 전송하며, 이를 보호구간(guard interval)이라 부른다. 전송신호는 이동채널을 통과한 후, 잡음이 더해진다. 수신단에서는 먼저 보호구간을 제거하고, FFT를 통해 신호를 주파수 영역으로 변환시킨다. Differential 복조를 통해 얻어진 데이터는 주파수 디인터리버, QPSK 심볼 디맵퍼, 시간 디인터리버를 거쳐 Viterbi 복호기에 입력된다. 이 때 길쌈 부호기의 입력과 Viterbi 복호기의 출력단 데이터를 이용하여 BER을 측정한다. Eureka 147 DAB 시스템은 고품질의 오디오 서비스 제공을 위해 Viterbi 복호기의 BER 성능이  $10^{-4}$ 을 만족하도록 요구하며, 이 기

준은 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 207를 통해 제안된 그림 2와 같은 구조의 이동채널 모델을 적용하였다[10].

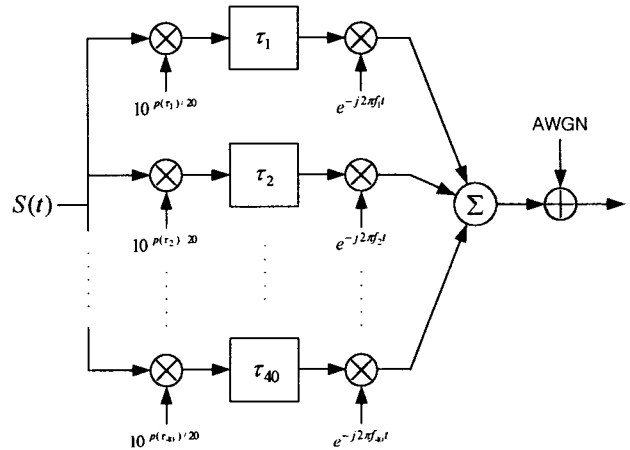


그림 2. 이동채널 모델

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

$$p(\tau) = Ke^{-\tau/\sigma} \quad 0 < \tau < \tau_{\max} \quad (1)$$

$$= 0 \quad \text{elsewhere}$$

이 값은 다중경로 전력지연 프로파일(power delay profile)에 해당한다. 식(1)에서  $\sigma$ 는 지연값들의 표준편차인 지연 확산(delay spread)을 의미하며,  $\tau_{\max}$ 는 최대 지연값을 나타낸다. K는 상수값이며, 그림 3과 같은 형태를 갖는 TU(Typical Urban) 지역의 전력지연 프로파일이 적용되었다.

도플러 편이(Doppler shift)는 식 (2)에 의해 각 경로에 따라 서로 다른 값을 갖는다.

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

여기서,  $f_{\max}$ 는  $v/\lambda$  (이동체 속도/RF 반송파 파장)에 의해 결정되는 최대 도플러 편이를 나타내며,

$\theta_i$ 는  $0 \sim 2\pi$  사이의 균일분포(uniform distribution)를 가지는 랜덤 변수이다.

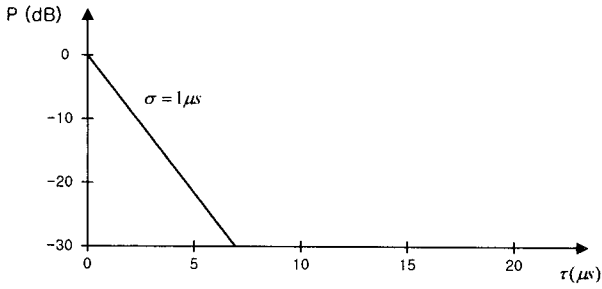


그림 3. TU 지역의 전력지연 프로파일

### 3. Comping 기법

Comping 기법은 로그함수를 이용하여 OFDM signal의 envelope  $m_E(t)$ 의 dynamic range를 줄임으로써, PAPR을 감소시키는 방법이다. 이는 대표적인 오디오 신호 comping 방법인  $\mu$ -law 혹은 A-law를 이용함으로써 쉽게 구현할 수 있다. 본 논문에서는 식 (3)으로 표현되는  $\mu$ -law를 이용하여 OFDM 신호에 comping 기법을 적용하였다.

$$s(t) = y_{\max} \frac{\log_e [1 + \mu (|m_E(t)| / x_{\max})]}{\log_e (1 + \mu)} \text{sgn}(m_E(t)) \quad (3)$$

여기서,  $x_{\max}$ 와  $y_{\max}$ 는 각각 입력 및 출력에 대한 정규화 값을 의미한다.

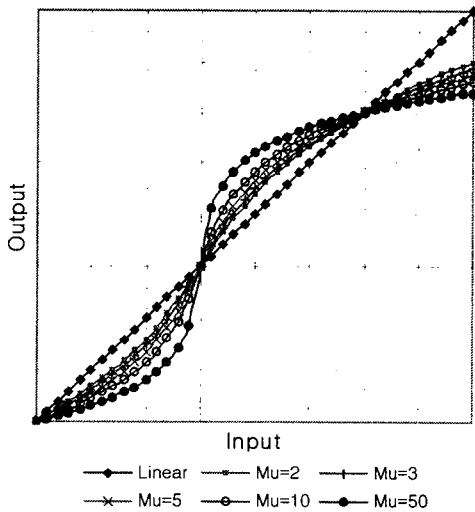


그림 4.  $\mu$ -law comping의 특성

Comping 방법을 통한 PAPR 감소 성능은 탁월하나, 이로 인한 OFDM 신호의 비선형 왜곡은 결국 시스템의 BER 성능을 저하시키거나 out-of-band의 스펙트럼 레벨을 증가시켜 인접채널 간섭의 원인이 될 수 있다.

Clipping은 그림 5에서 보는바와 같이 OFDM signal envelope  $m_E(t)$ 의 값이 식 (4)로 표현되는 CL(Clipping Level)  $C_{th}$  값 이상인 경우, 이를 강제적으로  $C_{th}$  값으로 출력하는 것으로 가장 간단히 PAPR을 감소시키는 방법이다.

$$C_{th} = m_{Eff} \cdot 10^{\frac{PAPR}{20}} \quad (4)$$

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

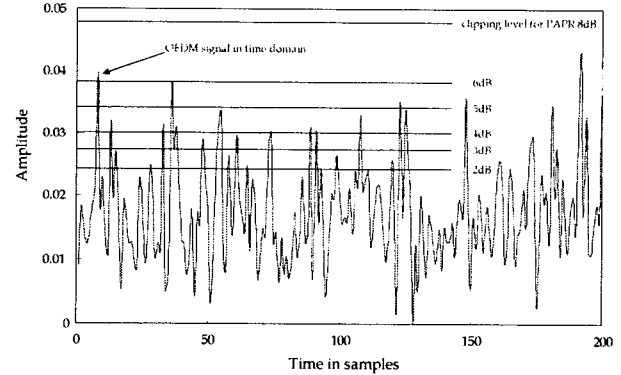


그림 5. Clipping 처리방법

Comping 기법의  $x_{\max}$ 와  $y_{\max}$ 는 입력력의 최대값을 의미하나, 본 논문에서는 두 값을 동일하게 설정하고, clipping 기법의 clipping level  $C_{th}$  값을 기준으로 성능분석을 수행하였다.

### 4. 실험 결과 및 분석

Comping을 적용한 Eureka 147 DAB 시스템에 대한 성능분석은 각 분석조건( $\mu$  값과 정규화 값 가변 조건)에 대한 PAPR 개선정도, 시스템 요구  $E_s/N_0$  열화정도, out-of-band의 PSD 열화정도를 종합적으로 비교 평가함으로써 이루어진다.

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              |

모의실험시, 송수신 동기 및 필터링은 완벽하다고 가정하였으며, AGC(Automatic Gain Control), 수신기 LO(Local Oscillator)의 phase noise, 송신 또한 수신 장비의 비선형 특성에 대한 영향은 고려하지 않았다. 따라서 얻어진 결과는 주어진 채널환경에서 보장할 수 있는 최적성능을 의미한다. 모의실험을 위해 적용된 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

#### 4.1 $\mu$ 값 가변에 따른 BER 성능

DAB 신호는 전송모드 I 에서 SDT 를 적용하지 않은 경우, 약 12.5dB 정도의 PAPR 을 갖는 것으로 조사되었다. 그림 6 은  $\mu$ -law companding 기법 적용 시,  $\mu$  값 가변에 따른 BER 성능분석 결과를 보여준다. 이 때 정규화 값  $x_{max} (= y_{max})$ 은 clipping 기법에 적용된  $C_{th}$  값(SDT 기법을 적용하기 전, CL for required PAPR 2dB)을 기준으로 하였다. 이 그림으로부터 DAB 의 시스템 요구 BER 성능( $=10^{-4}$ )을 만족시키기 위한 각 조건에서의  $E_s/N_0$  값을 얻을 수 있다.

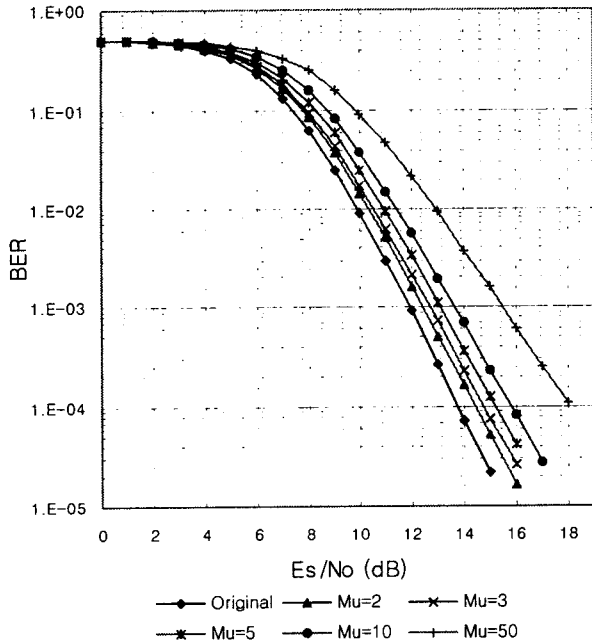


그림 6.  $\mu$  값 가변에 따른 BER 성능분석 결과

표 2.  $\mu$  값 가변에 따른 PAPR 과 요구  $E_s/N_0$

|                | Original | $\mu$ 값 |      |      |      |      |
|----------------|----------|---------|------|------|------|------|
|                |          | 2       | 3    | 5    | 10   | 50   |
| PAPR (dB)      | 12.5     | 1.9     | 1.8  | 1.7  | 1.5  | 1.1  |
| $E_s/N_0$ (dB) | 13.8     | 14.4    | 14.8 | 15.2 | 15.8 | 18.2 |

표 2는  $\mu$  값 가변에 따른 PAPR 성능개선 및 시스템 요구  $E_s/N_0$  성능저하를 보여준다.  $\mu$  값이 2인 경우, PAPR 을 10.6dB 정도 개선시켰음에도 불구하고 0.6dB 정도의  $E_s/N_0$  성능저하만이 발생되었다.

#### 4.2 정규화 값 가변에 따른 BER 성능

그림 7 은 정규화 값인  $x_{max} (= y_{max})$ 의 가변에 따른 BER 성능분석 결과를 나타낸다. 이 때 정규화 값  $x_{max} (= y_{max})$ 은 clipping 기법에 적용된  $C_{th}$  (CL for required PAPR)값을 기준으로 하였으며,  $\mu$  값은 2 로 고정하였다. 정규화 값이 커질수록 BER 성능이 개선됨을 알 수 있는데, 이는 companding 기법의

비선형 신호왜곡 영향이 상대적으로 줄어들음을 의미한다.

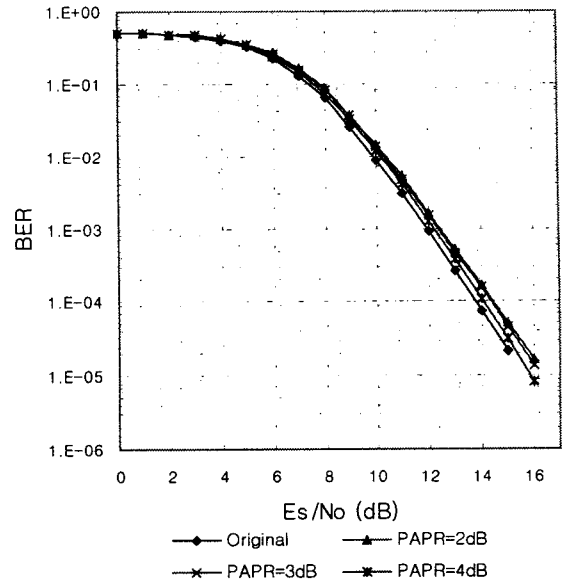


그림 7. 정규화 값 가변에 따른 BER 성능분석 결과

정규화 값 가변에 따른 PAPR 과 요구  $E_s/N_0$  값은 표 3 과 같다. 정규화 값을 증가시키에 따라 요구  $E_s/N_0$  값은 개선되나, 상대적으로 PAPR 개선 성능은 저하됨을 알 수 있다.

표 3. 정규화 값 가변에 따른 PAPR 과 요구  $E_s/N_0$

|                | Original | 정규화 값(CL for required PAPR) |      |      |
|----------------|----------|-----------------------------|------|------|
|                |          | 2dB                         | 3dB  | 4dB  |
| PAPR (dB)      | 12.5     | 1.9                         | 2.6  | 3.2  |
| $E_s/N_0$ (dB) | 13.8     | 14.4                        | 14.3 | 14.1 |

#### 4.3 $\mu$ 값 가변에 따른 PSD 성능

PSD 결과를 분석하기 위한 주파수 축상에서의 기준점을 정하기 위해 그림 8 에서 보는 바와 같이 6MHz TV 대역에서 1.536MHz 대역폭을 갖는 Eureka 147 DAB 채널 및 guard band 의 배치에 대해 다음과 같이 가정하였다.

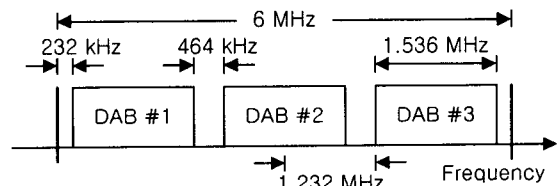
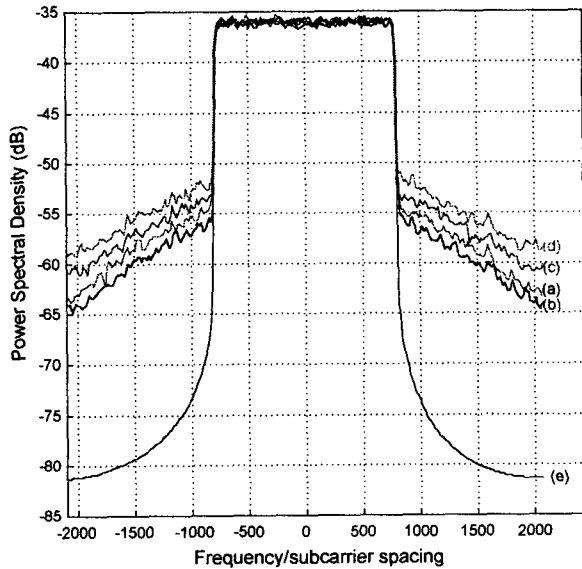


그림 8. 6MHz TV 채널에서 동일 guard band 를 가정했을 경우의 DAB 채널 배치

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.

정규화 값을 2dB PAPR 을 위한  $C_{th}$  값으로 고정했을 경우,  $\mu$  값 가변에 따른 PSD 분석결과는 그림 9 와 같다. 앞서 설명한 기준점을 토대로 out-of-band PSD 열화 및 시스템 요구  $E_s/N_0$ , 그리고 PAPR 개선 결과를 표 4 에 나타내었다.



(a) Clipping, (b)  $\mu=2$ , (c)  $\mu=5$ , (d)  $\mu=10$ , (e) Original  
 그림 9.  $\mu$  값 가변에 따른 PSD 성능분석 결과

표 4.  $\mu$  값 가변에 따른 PAPR, 요구  $E_s/N_0$ , out-of-band의 PSD 열화

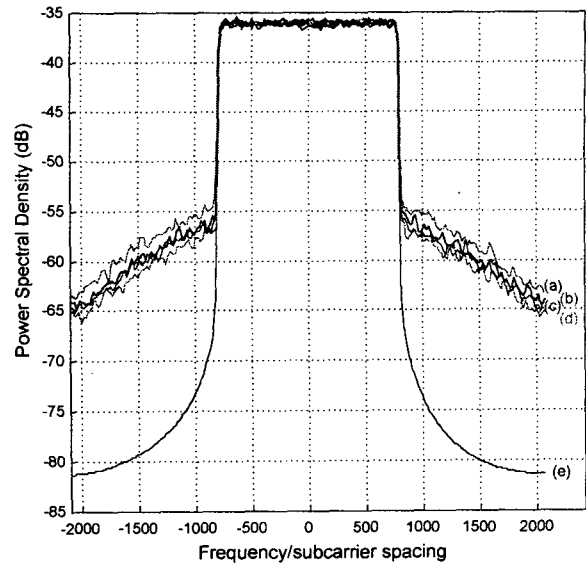
|                | Clipping | $\mu$ 값 |      |      |
|----------------|----------|---------|------|------|
|                |          | 2       | 5    | 10   |
| PAPR(dB)       | 3.1      | 1.9     | 1.7  | 1.5  |
| $E_s/N_0$ (dB) | 14.8     | 14.4    | 15.2 | 15.8 |
| PSD 열화(dB)     | 20       | 18      | 22   | 23   |

상기 표의 결과로부터 알 수 있듯이,  $\mu$  값이 2인 경우, companding 기법이 clipping 기법에 비해 PAPR,  $E_s/N_0$ , PSD 성능 모두 우수하다. 그러나  $\mu$  값이 5 이상인 경우,  $E_s/N_0$ , PSD 성능이 clipping 기법에 비해 상대적으로 저하되지만, PAPR 개선효과는 우수하다. 따라서 companding의  $\mu$  값은 가능한 적은 값으로 선정되어야 한다.

#### 4.4 정규화 값 가변에 따른 PSD 성능

그림 10은 정규화 값 가변에 따른 PSD 성능분석 결과를 나타낸다.  $\mu$  값을 2로 고정하고, 정규화 값을 증가 시켰을 경우, PSD 성능열화가 줄어들게 된다. 상기 결과를 토대로 out-of-band PSD 열화 및 시스템

요구  $E_s/N_0$ , 그리고 PAPR 개선 결과는 표 5와 같다.



a) Clipping, (b)  $C_{th}=2$ dB, (c)  $C_{th}=3$ dB, (d)  $C_{th}=4$ dB, (e) Original  
 그림 10. 정규화 값 가변에 따른 PSD 성능분석 결과

표 5. 정규화 값 가변에 따른 PAPR, 요구  $E_s/N_0$ , out-of-band의 PSD 열화

|                | Clipping | 정규화 값(dB) |      |      |
|----------------|----------|-----------|------|------|
|                |          | 2         | 3    | 4    |
| PAPR(dB)       | 3.1      | 1.9       | 2.6  | 3.2  |
| $E_s/N_0$ (dB) | 14.8     | 14.4      | 14.3 | 14.1 |
| PSD 열화(dB)     | 20       | 18        | 17.5 | 17   |

$\mu$  값이 2 인 경우, 적용한 정규화 값 모두에 대해서 companding 기법이 clipping 기법에 비해 PAPR,  $E_s/N_0$ , PSD 성능 모두 우수하다. 정규화 값이 증가할수록 신호왜곡 정도가 줄어들어  $E_s/N_0$ , PSD 성능개선 정도가 증가되지만, PAPR 값은 이와는 반대로 개선 정도가 줄어들게 된다. 정규화 값이 4 인 경우, PAPR 개선 성능은 비슷함에도 불구하고,  $E_s/N_0$  은 약 0.7dB, PSD 열화는 3dB 정도 개선됨을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 Eureka 147 DAB 시스템의 PAPR 개선을 위해 전송시스템의 규격 및 수신기의 변경이 필요하지 않는 companding 기법을 적용하여 시스템의 out-of-band PSD 열화 및 시스템 요구  $E_s/N_0$ , 그리고 PAPR 개선 성능을 평가하였다. 모의실험 결과,  $\mu$  값이 2인 경우, companding 기법이 PAPR,  $E_s/N_0$ , out-of-band의 PSD 특성 모두에서 clipping 기법에 비해 우수한 성능을 나타냈다. 또한  $\mu$  값을 고정시킨 경우, 정규화 값이 증가할수록 신호왜곡 정도가 줄어들어  $E_s/N_0$ , out-of-band의 PSD 성능개선 정도는 증가하지만, 이와는 반대로 PAPR 값은 개선 정도가 줄어들었다. 분석결과를 통해 알 수 있듯이 companding 기법은

PAPR 개선 및  $E_b/N_0$  열화 성능은 비교적 우수하지만, 기법 자체가 가지는 신호왜곡의 특성상 out-of-band PSD 특성은 그리 좋은 편은 아니다.

따라서 향후에는 companding 기법의 out-of-band PSD 열화 특성 개선 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 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] Xianbin Wang, T. T. Tjhung and C. S. Ng, "Reduction of Peak-to-Average Power Ratio of OFDM System Using A Companding Techniques," IEEE Transaction on Broadcasting, vol.45, no.3, Sep. 1999.
- [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.