

# 아날로그 FM 신호 간섭 환경하에서의 DAB 시스템 성능분석

## The Performance Analysis of DAB System in the Interference Environment of an Analog FM Signal

서 석\*, 이 찬길\*, 오 길남\*\*

\* 한양대학교 전자공학과, \*\* 한국전자통신연구원

### 요 약

본 논문에서는 아날로그 FM 간섭하에서의 In-band DAB 시스템의 성능을 이론적 배경을 통한 비트 오류율을 계산하였다. 성능분석에 사용된 시스템은 변조 방식으로 M-PSK, M-QAM 을 사용하며, 특히 OFDM 변조 방식을 사용한다. 성능분석은 주파수 비선택적 리시언 페이딩 채널에 대해 실시하였다. 그러나 이 결과는 레일리 페이딩 채널과 AWGN 채널에 대해서도 유효하다. 성능분석 및 시뮬레이션에 사용된 시스템은 한국전자통신연구원에서 제안한 DAB 시스템을 토대로 하였다.

### Abstract

In this paper we analyze the bit error rate of an in-band DAB(Digital Audio Broadcasting) system which is based upon orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) and uses M-PSK and M-QAM modulation schemes in the interference environment of an analog FM signal. Results are derived which take into account the influence of the frequency non-selective Rician fading channel, but they are valid for Rayleigh fading channel and AWGN channel as well. Theoretical bit error rates and simulation results are given for system parameters for DAB proposed by ETRI(Electronics and Telecommunications Research Institute).

### I. 서론

DAB(Digital Audio Broadcasting)는 뉴스, 음악 방송 뿐만 아니라 전자 신문, 지리/교통/기상 정보 방송, 무선호출, 데이터, S/W 및 영상 방송 등 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있으며, OFDM 과 같은 다중반송파를 이용한 디지털 전송방식을 사용함으로써 다중경로 환경에 강하며 이동 수신품질이 우수하므로 FM 방송에

서 문제시되는 잡음과 간섭에 의한 수신품질의 열화를 최소화할 수 있으며 CD 급 음질을 제공할 수 있다.

이와 같이 DAB 는 기존의 아날로그 AM, FM 방송의 단점을 해소하고 고품질과 새로운 형태의 고부가 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있는 차세대 방송방식으로 인정되고 있으며 DAB 의 범 세계적 실용화 시기가 임박함에 따라 국내에서 DAB 실용화를 위한 연구개발이 시급한 형편이다.

국내 지상파 디지털 방송은 기존의 아날로그 방송 주파수 대역내에서 전환할 예정으로 DAB 는 기존의 FM 방송채널을 사용할 계획이다. 그러나 디지털 방송은 기존 아날로그 방송과 상호간섭을 유발하므로 이를 최소화하기 위한 연구로서, 미국내에서는 In-Band On-Channel(IBOC), In-Band Adjacent-Channel(IBAC) 전송방식에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

In-Band 방식 외에 또 하나의 DAB 방식으로 New-Band DAB 방식이 있다. New-Band 방식을 이용할 경우에 새로운 주파수 대역을 할당하기 때문에 가용 스펙트럼의 확보가 문제된다. 또한 New-Band 방식은 기존 방송업자가 투자한 방송시설을 이용할 수 없는 이유로 추가 투자가 많아 경제적이지 못하다.

New-Band 방식은 새로운 주파수 대역을 사용하기 때문에 인접 채널의 간섭에 대한 문제가 발생하지 않지만 In-Band 방식의 경우 가장 문제가 되는 것은 아날로그 FM 신호와 DAB 신호간의 상호 간섭이다. 더욱이 가능한 기존의 FM 방송 채널배치를 그대로 유지해야 하는 문제점이 있다. 따라서 가능한 현재의 FM 채널 배치를 그대로 사용하는 환경하에서 FM 신호와 DAB 신호간의 상호 간섭에 대한 연구가 반드시 필요하다.

따라서 본 논문에서는 아날로그 FM 신호의 간섭이 존재하는 환경하에서의 DAB 신호의 성능을 평균 비트 오류율을 통해 알아보았다. 논문의 구성은 제 I 장 서론에 이어, 제 II 장

에서는 성능분석에 사용된 시스템 모델의 간략한 설명을 보였다. 제 III 장에서는 AWGN 채널, 리시언 페이딩 채널, FM 간섭이 존재하는 환경에 대한 M-PSK, M-QAM 변조 방식의 성능 분석을 연속적으로 보였으며 FM 간섭 신호를 해석한 후에 DAB 시스템에 대한 성능 분석을 하였다. 제 IV 장에서는 성능분석 결과를 이용한 시뮬레이션 결과를 설명과 함께 보였으며 제 V 장에서는 본 논문의 결론을 나타내었다.

## II. 시스템 모델

그림 1 은 성능분석에 사용된 시스템 모델을 간략하게 보인 것이다. 송신기는 입력 이진 데이터를 직병렬 변환기를 통해 병렬 데이터 형태로 변환한다. 변환된 데이터는 신호 모사기 (mapper)에 의해서 사용될 변조방식(M-PSK, M-QAM)에 따라 적당한 신호점으로 모사된다. 모사된 정보 데이터는 IFFT 에 의해 변조되고 직병렬 변환기에 의해서 직렬 데이터 형태로 변환되고 보호구간이 삽입된 후에 전송된다. 송신된 신호는 아날로그 FM 신호와 AWGN 등의 간섭을 받게 되고 페이딩 채널의 영향으로 페이딩을 겪게 된다. 수신기는 송신기의 역을 수행하게 된다.

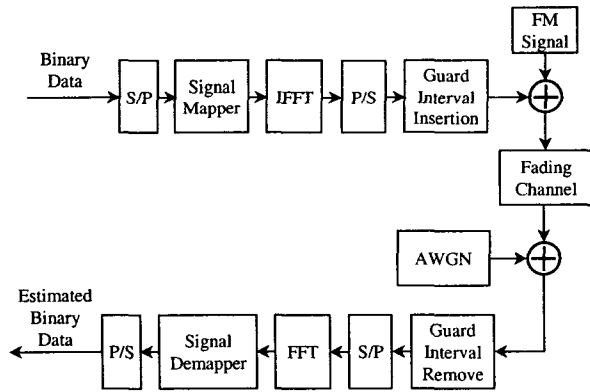


그림 1. 시스템 모델

성능분석에 사용된 채널 모델은 느리게 변화하는 주파수 비선택적 리시언 페이딩 채널을 가정하였다. 만약 캐리어 주파수가 100MHz 이고 수신기 이동속도를 100km/h 를 가정할 때, 최대 도플러 변이는 9.3Hz 정도이며, 이는 시스템의 심볼 전송속도에 비해 아주 작기 때문에 느리게 변화하는 페이딩의 가정하다고 할 수 있다. 또한 OFDM 시스템의 특

성으로 인해 심볼 지속시간이 매우 길게되며, 이는 각각의 부반송파 채널은 협대역임을 의미하게 되므로 주파수 비선택적 페이딩 가정 또한 적당하다고 할 수 있다. 수신기는 최적의 동기식 복조를 수행하는 것으로 가정하였으며, 이를 위해 수신기는 채널의 상태에 대한 완벽한 정보를 도출해야 한다. 또한 채널의 임펄스 응답보다 긴 보호구간을 삽입함으로써 심볼 상호간섭은 없는 것으로 가정하였다. 또한 완벽한 캐리어 주파수 추적 및 시간 동기 등이 가정되었으며, 이는 부반송파간의 간섭은 없다는 가정으로 귀결된다.

## III. 시스템 성능분석

### 가. M-PSK(M-ary Phase Shift Keying)

Gray-코드 비트 모사(mapping)를 이용하는 M-PSK 변조된 신호가 AWGN 채널을 통과하는 경우의 비트 오류율은 식 (1)로 근사화가 가능하다[1].

$$P_{b,P} = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{\max(M/4,1)} Q\left(\sqrt{2L E_b/N_0} \sin((2i-1)\pi/M)\right) \quad (1)$$

여기서  $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \cdot \int_0^\infty e^{-t^2/2} dt$ ,  $E_b/N_0$  는 비트 당 SNR(Signal to Noise power ratio)을 나타내며  $L = \log_2 M$  은 심볼당 비트수를 나타낸다.

만약 신호가 주파수 비선택적 리시언 페이딩 채널을 통과할 경우 M-PSK 변조 방식의 비트 오류율은 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$P_{b,P|\beta} = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{\max(M/4,1)} Q\left(\sqrt{2L\beta^2 E_b/N_0} \sin((2i-1)\pi/M)\right) \quad (2)$$

여기서  $\beta$  는 채널 임펄스 응답의 포락선을 나타내며 리시언 분포를 갖는 랜덤 변수이다.  $E[\beta^2] = 2\sigma^2 + s^2$  이며,  $2\sigma^2$  은 산란 성분의 신호전력이고  $s^2$  은 직접파 성분의 신호전력을 나타낸다. 만약  $\alpha = \beta^2$  으로 치환하면 식 (2)는 식 (3)으로 나타낼수 있고, 랜덤 변수  $\alpha$  의 확률 분포 함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다 [2].

$$P_{b,P|\alpha} = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{\max(M/4,1)} Q\left(\sqrt{2L\alpha E_b/N_0} \sin((2i-1)\pi/M)\right) \quad (3)$$

$$p(\alpha) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2 + \alpha}{2\sigma^2}\right) I_0 \sqrt{\frac{\alpha s}{\sigma^2}} \quad (4)$$

여기서  $I_n(\cdot)$ 는  $n$  차의 수정된 Bessel 함수를 나타낸다. 식 (3)은 랜덤 변수  $\alpha$ 에 대한 조건부 비트 오류율이므로 식 (3)을  $\alpha$ 에 대해 평균함으로써 평균 비트 오류율을 얻을 수 있다.

$$\bar{P}_{b,P} = \int_0^{\infty} P_{b,P|\alpha} p(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

참고문헌 [3]의 결과를 이용하여 식 (5)의 적분을 풀면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\bar{P}_{b,P} = \frac{2}{L} \sum_{i=1}^{\max(M/4,1)} \left\{ \begin{array}{l} Q(u_i, w_i) - \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{d_i}{1+d_i}} \right) \\ \exp\left(-\frac{u_i^2 + w_i^2}{2}\right) I_0(u_i w_i) \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$u_i = \sqrt{\frac{R(1+2d_i - 2\sqrt{d_i(1+d_i)})}{2(1+d_i)}} \quad (6.1)$$

$$w_i = \sqrt{\frac{R(1+2d_i + 2\sqrt{d_i(1+d_i)})}{2(1+d_i)}} \quad (6.2)$$

$$d_i = 2\sigma^2 \sin^2\{(2i-1)\pi/M\} L E_b/N_0 \quad (6.3)$$

여기서  $Q(x, y)$ 는 1차 Marcum Q-함수를 나타내고,  $R$ 은 리시언 인자로서 직접파 성분의 전력대 산란 성분의 전력비를 의미한다. 즉  $R = s^2/2\sigma^2$ 으로 나타낼 수 있으며, 정규화된  $E[\beta^2] = 2\sigma^2 + s^2 = 1$ 을 사용하면  $2\sigma^2 = 1/(R+1)$ 이 된다.

#### 나. M-QAM

(M-ary Quadrature Amplitude Modulation)

Gray-코드 비트 모사를 이용하는 M-QAM 변조된 신호가 AWGN 채널을 통과하는 경우의 비트 오류율은 식 (7)로 근사화 할 수 있다 [1].

$$P_{b,Q} = \frac{4}{L} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} Q \left( (2i-1) \sqrt{\frac{3L E_b}{M-1 N_0}} \right) \quad (7)$$

여기서  $E_b/N_0$ 는 비트당 SNR(Signal to Noise power ratio)을 나타내며  $L = \log_2 M$ 은 심볼당 비트수를 나타낸다.

만약 신호가 주파수 비선택적 리시언 페이딩

채널을 통과할 경우에 M-QAM 변조 방식의 비트 오류율은 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$P_{b,Q|\beta} = \frac{4}{L} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} Q \left( (2i-1) \sqrt{\frac{3L\beta^2 E_b}{M-1 N_0}} \right) \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여, M-PSK의 평균 비트 오류율을 구하는 절차를 그대로 따르면 M-QAM에 대한 비트 오류율은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{P}_{b,Q} = \frac{4}{L} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} \left\{ \begin{array}{l} Q(u_i, w_i) - \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{d_i}{1+d_i}} \right) \\ \exp\left(-\frac{u_i^2 + w_i^2}{2}\right) I_0(u_i w_i) \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$d_i = \frac{3(2i-1)^2 2\sigma^2 L E_b}{2(M-1) N_0} \quad (9.1)$$

여기서  $u_i, v_i$ 는 각각 식 (6.1), (6.2)와 같다.

#### 다. 아날로그 FM 간섭 신호의 해석

만약 메시지 신호  $m(t)$ 가 랜덤 프로세스  $M(t)$ 의 샘플 신호라고 가정하면 주파수 변조된 신호  $s_{FM}(t)$ 도 역시 랜덤 프로세스이고 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s_{FM}(t) = A \cos \left\{ 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right\} \quad (10)$$

여기서  $A, f_c$  그리고  $k_f$ 는 각각 반송파의 진폭, 반송파 주파수 그리고 주파수 편이 상수를 나타낸다.

이러한 FM 신호는 AWGN 신호와 더불어 DAB 신호를 간섭하게 되며, DAB 시스템의 수신단에서 아날로그 FM 신호는 대역통과필터를 거치게 된다. DAB 시스템의 수신단에서 대역통과필터를 거친 FM 신호를  $s'_{FM}(t)$ 라고 하면  $s'_{FM}(t)$  역시 랜덤 프로세스이다. 계속해서  $s'_{FM}(t)$ 는 샘플링 간격  $t_s$ 로 샘플링되고 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform)를 거치게 되며 결과는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S'_{FM}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} s'_{FM}(n) e^{\frac{j2\pi mn}{N}} \quad (11)$$

여기서  $s'_{FM}(n)$ 은  $s'_{FM}(t)$ 를 샘플링한 이산신호로서 평균이 0(zero)인 랜덤 변수로 가정하도록 한다. IDFT를 거친 후의 신호  $S'_{FM}(m)$ 의 실수부와 허수부는 IDFT를 거친 DAB 신호의 실수부와 허수부를 각각 독립적으로 간섭하기 때문에 실수부만을 독립적으로 생각할 수 있으며 다음과 같게 된다.

$$\text{Re}[S'_{FM}(m)] = \sum_{n=0}^{N-1} s'_{FM}(n) \cos(2\pi mn / N) \quad (12)$$

만약  $\{s'_{FM}(n)\}$ 이  $n=0,1,2,\dots,N-1$ 에 대해서 i.i.d(independently and identically distributed) 랜덤 변수이고 부반송파의 개수  $N$ 이 충분히 크다고 가정하면, CLT(Central Limit Theorem)에 의해서  $\text{Re}[S'_{FM}(m)]$ 은 평균이 0인 가우시안 분포를 갖는 랜덤 변수로 근사화 할 수 있다.

#### 라. FM 신호 간섭하에서의 성능

앞의 해석 결과를 따르면 FM 간섭 신호를 평균이 0인 가우시안 잡음으로 고려할 수 있다. 만약 부반송파 개수가  $N$ 이고  $T_s = \log_2 MT_b$ 는 신호 모사기(mapper) 출력의 심볼 지속시간이라고 하면 부반송파간의 직교성을 위해 부반송파간 주파수 간격은  $1/(NT_s)$ 이 된다. 각 부반송파 채널의 주파수 대역을  $2/(NT_s)$ 로 근사화하면  $i$ 번째 부반송파에 대한 SNR  $\gamma_i$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma_i = \frac{E_s}{N_0 + NT_s P_{1,i} / 2} \quad (13)$$

여기서  $P_{1,i}$ 는  $i$ 번째 부반송파 채널 대역내의 총 간섭 전력량을 나타낸다.  $N$ 개의 심볼을 전송하는데 필요한 총 에너지는  $NE_s$ 이고 OFDM을 이용하는 DAB 시스템은  $NT_s$ 의 시간 동안  $N$ 개의 심볼을 동시에 전송하므로 DAB 신호의 평균 전력을  $P_{DAB}$ 고 할 때,  $P_{DAB}NT_s = NE_s$ ,  $E_s = LE_b$ 의 관계가 성립되므로 식 (13)을  $P_{DAB}$ 의 함수로 표현하면 식 (14)와 같다.

$$\gamma_i = \frac{LE_b / N_0}{1 + 0.5N (LE_b / N_0) (P_{DAB} / P_{1,i})^{-1}} \quad (14)$$

이제 식 (14)를 식 (6.3)과 식 (9.1)의  $LE_b / N_0$  대신에 대입하면 FM 신호 간섭이 존재하는

환경에서의 각 부반송파의 평균 비트 오류율을 얻을 수 있다. 그러나 FM 신호의 스펙트럼이 균일하지 않기 때문에 각 부반송파의 FM 신호 간섭량은 다르게 된다. 따라서 DAB 시스템의 평균 비트 오류율은 각 부반송파의 비트 오류율을 평균해야 하며 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$p_s = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} p_{s,i} \quad (15)$$

여기서  $p_{s,i}$ 는  $i$ 번째 부반송파의 평균 비트 오류율을 나타낸다.

#### 마. FM 간섭 전력 및 DAB 신호의 평균 전력

각 부반송파를 간섭하는 FM 신호의 간섭 전력량을 계산하기 위해서, 본 논문에서는 FM 신호의 전력 스펙트럼을 이용하였으며, 삼각 전력 스펙트럼 밀도 모델을 사용하였다[4]. 삼각 전력 스펙트럼 밀도 모델은 기저대역 스펙트럼을 가정할 때, 식 (16)과 같은 근사화 함수로 표현된다[4].

$$S_{FM}(f)_{dB} = \begin{cases} 0.36f, & f > 0 \\ -0.36f, & f < 0 \end{cases} \quad (16)$$

여기서  $S_{FM}(f)$ 는 dB 스케일의 크기를 나타내며  $f$ 는 kHz로 정규화된 주파수이다.

FM 간섭량을 계산하는 한 예로 그림 2와 같은 FM 간섭 시나리오를 고려하였다.

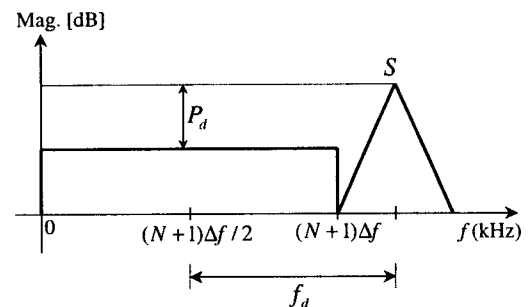


그림 2. DAB 와 FM 신호의 전력 스펙트럼

$N$  : 부반송파 수

$\Delta f$  : 부반송파간의 주파수 이격 [kHz]

$f_d$  : FM 반송파 주파수와 DAB 반송파 주파수와의 이격 [kHz]

$S$  : FM 신호의 피크 스펙트럼 전력 밀도 [dB]  
 $P_d$  : FM 신호의 전력 스펙트럼 밀도의 피크와 DAB 신호의 평균 전력 스펙트럼 밀도와의 레벨차 [dB]

식 (16)을 이용하여 그림 2의 간섭 시나리오를 고려할 때  $i$  번째 부반송파에 미치는 간섭 전력량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{I,i} = \int_{i\Delta f}^{(i+2)\Delta f} 10^{0.036\{f - ((N+1)\Delta f / 2 + f_{d1})\} + 0.1M_1} df$$

$$= \frac{1}{0.036 \ln 10} \left[ 10^{0.036\{(i+2)\Delta f - (N+1)\Delta f / 2 - f_{d1}\} + 0.1S} - 10^{0.036\{i\Delta f - (N+1)\Delta f / 2 - f_{d1}\} + 0.1S} \right] \quad (17)$$

DAB 신호의 평균 전력량은 평균 전력스펙트럼 밀도를 DAB 신호의 주파수 대역을 통해 적분함으로써 얻을 수 있으며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{DAB} = \int_0^{(N+1)\Delta f} 10^{0.1(S-P_d)} df = (N+1)\Delta f 10^{0.1(S-P_d)} \quad (18)$$

여기서 주파수와 관련된 모든 변수 및 상수는 앞에서 설명한 것처럼 kHz로 정규화된 값이다.

#### IV 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 가. 8-PSK

그림 3은  $N = 512$ ,  $S = -13.8$  dB,  $\Delta f = 1$  kHz,  $f_d = 400$  kHz,  $P_d = 25$  dB 일 때의 평균 비트 오류율을 보인 것으로 FM 간섭의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그림 4는 다른 파라미터는 이전과 같게 하고  $f_d = 370$  kHz 했을 때의 평균 비트 오류율을 보인 그림으로 FM 간섭으로 인한 성능 저하가 뚜렷하게 나타난다. 즉 DAB 신호의 반송파와 FM 신호의 반송파간의 주파수 이격이 작을수록 FM 간섭량이 증가하여 DAB 시스템의 성능 저하가 심해짐을 의미한다.

##### 나. 16-QAM

그림 5는  $N = 512$ ,  $S = -13.8$  dB,  $\Delta f = 1$  kHz,  $f_d = 400$  kHz,  $P_d = 25$  dB 일 때의 평균 비트 오류율을 보인 것으로 8-PSK의 경우와 마찬가지로 FM 간섭의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그림 6은 다른 파라미터는 이전과 같게

하고  $P_d = 35$  dB로 했을 때의 평균 비트 오류율을 보인 그림으로 FM 간섭으로 인한 성능 저하가 뚜렷하게 나타난다. 즉 DAB 신호의 평균 전력 스펙트럼 밀도와 FM 신호의 스펙트럼 피크 레벨차가 클수록 DAB 신호의 평균 전력이 작아지게 되고, 따라서 상대적으로 FM 신호의 간섭 영향이 증가하여 DAB 시스템의 성능 저하가 심해지게 된다.

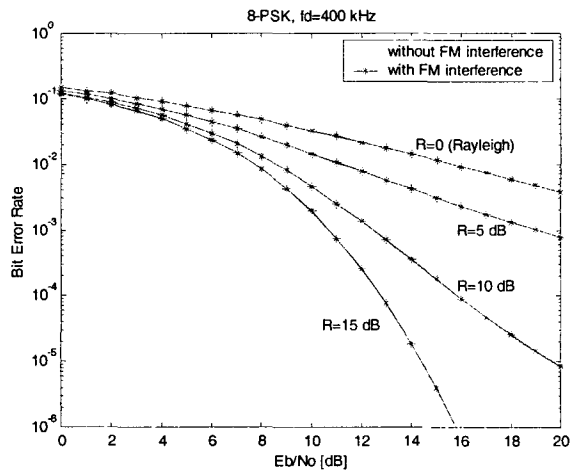


그림 3. 8-PSK의 평균 비트 오류율 ( $f_d = 400$  kHz)

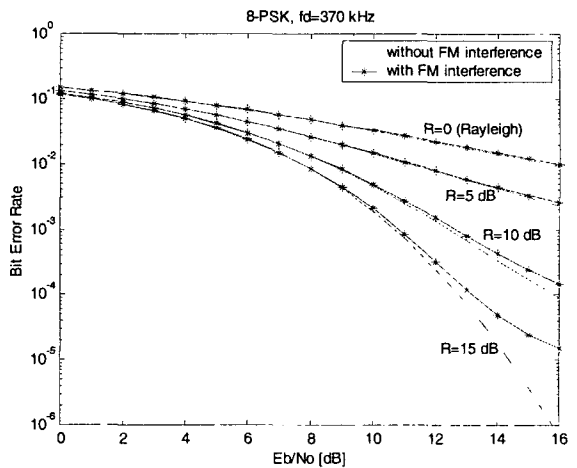


그림 4. 8-PSK의 평균 비트 오류율 ( $f_d = 370$  kHz)

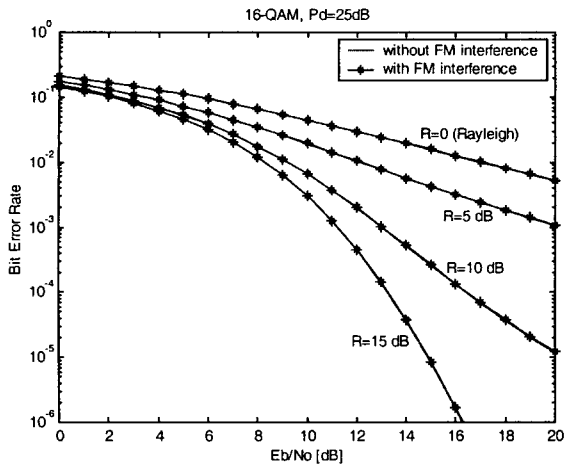


그림 5. 16-QAM의 평균 비트 오류율 ( $P_d = 25$  dB)

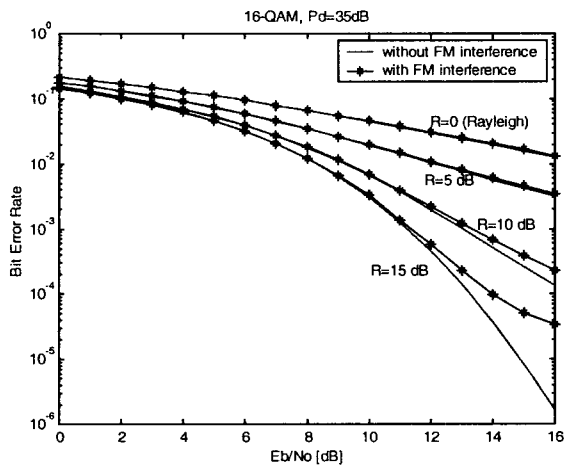


그림 6. 16-QAM의 평균 비트 오류율 ( $P_d = 35$  dB)

## V 결론

본 논문에서는 아날로그 FM 간섭하에서의 In-band DAB 시스템의 성능을 이론적 배경을 통한 비트 오류율을 계산하였다. 성능분석에 사용된 시스템은 변조 방식으로 M-PSK, M-QAM을 사용하며, 특히 OFDM 변조 방식을 사용한다. 성능분석은 주파수 비선택적 리시언 페이딩 채널에 대해 실시하였다. 성능분석 결과, DAB 신호의 방송파와 FM 신호의 반송파 간의 주파수 이격이 작아 질수록 FM 간섭 영향이 증가하여 DAB 시스템의 성능 저하가 심해짐을 알 수 있었다. 또한 DAB 신호의 평균 전력 스펙트럼 밀도와 FM 신호의 스펙트럼

피크 레벨차가 클수록 DAB 신호의 평균전력이 작아지게 되고, 따라서 상대적으로 FM 신호의 간섭 영향이 증가하여 DAB 시스템의 성능 저하가 심해진다는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Jianhua Lu, K. B. Letaief, "M-PSK and M-QAM BER Computation Using Signal-Space Concepts," IEEE Trans. Commn., vol. 47, No 2, Feb. 1999
- [2] John G Proakis, DIGITAL COMMUNICATIONS, Mcgraw-Hill, Third Ed.
- [3] Alex W. Lam and Sawasd Tantaratana, THEORY AND APPLICATIONS OF SPREAD-SPECTRUM SYSTEMS, IEEE Pub. Study Guide
- [4] Michael Chrysochoos, Yulin Guo and Junghwan Kim, "Performance of an In-Band Adjacent-Channel DAB System for Frequency-Selective Rayleigh and Rician Fading Channels under Analog FM Interference," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 44, No. 2, June 1998