

페이딩 환경 하에서의 디지털 위상-주파수 혼합 변조 방식의 성능에 관한 연구

홍 현 성*, 조 성 준**, 김 원 후***

*,** 한국항공대학 통신정보공학과, *** 한국항공대학 전자공학과

A Study on the Performance of Digital Phase-Frequency Hybrid Modulation System in Fading Environments

Hyeon Seong Hong*, Sung Joan Cho**, Won Hoo Kim***

*** Dept. of Telecomm. and Information Eng., Hankuk Aviation College

*** Dept. of Avionic Eng., Hankuk Aviation College

A B S T R A C T

In this paper, we have proposed the digital phase - frequency hybrid modulation system, and derived the error rate and the outage rate of this system in the noise and fading environments.

The error rate performance shows that the digital phase - frequency hybrid modulation system is superior to the QDPSK system in the relatively deep fading environments.

1. 서 문

오늘날 정보화 시대를 맞이하여 많은 양의 데이터를 보다 신속하고도 정확하게 전송해야 할 필요성을 느끼게 되었다. 그러나, 한정된 주파수 자원으로는 이와 같은 요구를 충족시킬 수 없게 되었다. 더우기 이동 무선 통신에 있어서는, 음성외의 전송뿐만 아니라 이동체의 위치 검출이나 동화에 필요한 각종 정보를 제공하기 위한 데이터의 전송을 동시에 수행해야만 한다. 이와 같은 요구에 부응하여, 기존의 통신 장비와 양립할 수 있고, 단일 파라미터 방식(AM, FM, FM)보다 주파수 이용 면에서 효율적이고, 하나의 반송파로 2개의 데이터를 동시에 전송할 수 있는 혼합 변조 방식^{[1],[2]}을 필요로 하게 되었다.

이동 무선 통신에 있어서는, 이러한 주파수 유효

이용 문제 외에도, 자동차가 주로 도심내에서 운행되고 있는 관계상 기존 방식에 있어서의 페이딩과는 다른 다중 전파로(multi-path) 페이딩에 의한 시스템의 성능 열화가 문제가 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 주파수 이용면에서 효율적이고, 데이터의 처리 속도가 빠른 디지털 위상 - 주파수 혼합 변조(이하 PFSK라 한다.) 방식을 제안하고, m 분포 페이딩 환경^{[3],[4]} 하에서의 오율식을 유도하여, QDPSK(Quarternary Differentially PSK) 방식과 비교하여, 오율 및 중단율의 측면에서 시스템의 성능을 평가한다.

2. 잡음 및 페이딩 환경

본 장에서는 협대역 가우스성 잡음 및 m 분포 페이딩의 성질과 분포식을 설명한다.

1) 가우스성 잡음

0 평균 협대역 가우스성 잡음^[6]은 다음과 같이 표현된다.

$$n(t) = R_n(t) \cos[\omega_c t + \phi_n(t)]$$

$$= n_c(t) \cos \omega_c t - n_s(t) \sin \omega_c t \quad (1)$$

그런데, $n(t)$ 가 랜덤 신호이므로, $R_n(t)$, $\phi_n(t)$, $n_c(t)$ 및 $n_s(t)$ 또한 랜덤 신호이다. 그러므로, 이들 변수의 통계적 평균과 확률 밀도 함수(probability density function)가 중요한 역할을 한다. 식 (1)에서 잡음의 진폭 $R_n(t)$ 는 Rayleigh 분포를 하고, 잡음의 위상 $\phi_n(t)$ 는 일양 분포(uniform distribution)한다. 그러나, 신호에 가우스성 잡음이 추가된 경우의 진폭은 Rice 분포를 한다.

따라서, $n_c(t)$ 와 $n_s(t)$ 의 확률 밀도 함수(pdf)를 나타내면, 다음과 같다.

$$p(n_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left(-\frac{n_c^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (2)$$

$$p(n_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left(-\frac{n_s^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (3)$$

여기서, σ_n^2 은 잡음의 분산(variance)이다.

2) 다중 전파로 페이딩

이동 통신 채널상에서 일어날 수 있는 문제의 하나로 다중 전파로 페이딩이 있다. 이 현상은 빌딩이나 산 등 장애물에 반사되어 전송 신호가 송신단과 수신단 사이를 서로 다른 경로를 통하여 다른 강도로서 전파함으로써 발생한다. 이 때의 수신 신호 강도는 다중 경로를 통하여 더해지거나 상쇄되어 랜덤하게 변화하게 된다. 신호의 강도는 이동체가 신호 파장의 반이 되는 거리(약 3/16m)를 움직이는 것을 주기로 증가하거나 감소한다. 이러한 현상을 fast 페이딩 또는 Rayleigh 페이딩이라 하며,^[7] 신호의 진폭 R은 다음과 같이 Rayleigh 분포를 한다.

$$p(R) = \frac{2R}{\Omega} \exp\left(-\frac{R^2}{\Omega}\right)$$

$$\Omega = \langle R^2 \rangle \quad (4)$$

여기서, $\langle \cdot \rangle$ 는 시간 평균을 의미한다.

그러나, 실제 채널의 페이딩은 Rayleigh 페이딩보다 약하거나 강하게 일어날 수 있으므로, 거의 모든 페이딩을 포함하는 보다 넓은 의미의 페이딩 모델인 m 분포 페이딩에 대하여 고려하기로 한다.

페이딩을 받는 신호의 진폭 R의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 정의된다.^[4]

$$p(R) = \frac{2 m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \exp\left(-\frac{m R^2}{\Omega}\right) \quad (5)$$

여기서, $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이고, $\frac{\Omega}{m}$ 은 신호의 평균 전력이다. m은 페이딩의 정도를 나타내는 페이딩 지수(fading figure)이다.

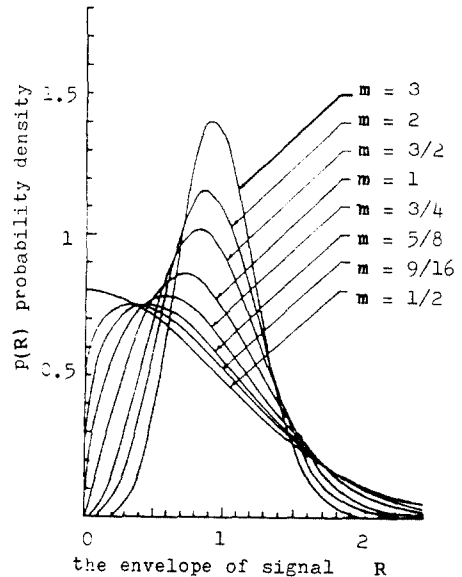


그림 1. m 분포

그림 1.은 페이딩 지수 m 을 파라미터로 하여 나타낸 m 분포 곡선이다. m 이 1인 경우는 Rayleigh 페이딩의 경우와 같고, $\frac{1}{2} \leq m < 1$ 인 경우는 Rayleigh 페이딩보다 강한 상태, $m > 1$ 인 경우는 약한 상태를 나타낸다. $m = \infty$ 일 때는 페이딩이 없는 경우와 같게 된다.

3. 예시 모델

본 장에서는 PFSK 방식의 변조 블록도를 나타내고, 가우스성 잡음 및 m 분포 페이딩 환경하에서의 PFSK 방식의 오율식을 유도한다.

1) PFSK 방식

이 방식은 주파수 변조(FSK)된 신호를 다시 위상 변조(PSK)시킨 것으로, 하나의 반송파에 2개의 데이터를 전송할 수 있는 방식이다.

그림 2. (a)는 PFSK 방식의 변조 블록도를, 그림 2 (b)는 PFSK 신호의 파형을 나타낸 것이다.

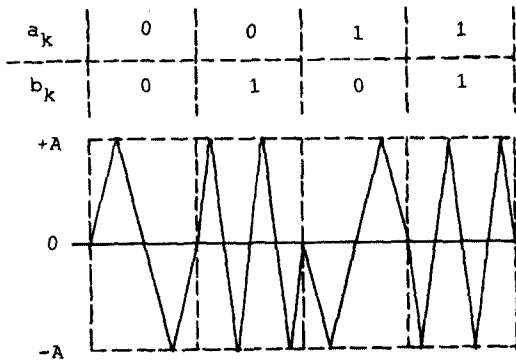
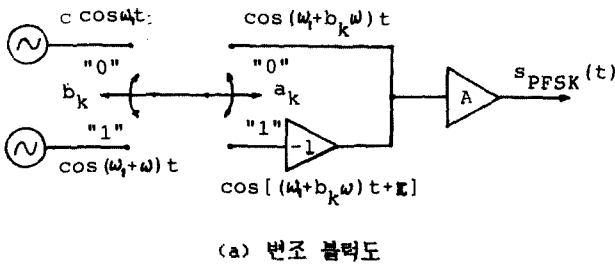


그림 2 변조 블록도 및 피변조 파형

그림 2에서 알 수 있듯이 PFSK 신호 $s(t)$ 는 다음과 같다.

$$S(t) = A \cos\{(\omega_1 + b_k \omega)t + a_k \pi\} \quad (6)$$

여기서, a_k 와 b_k 는 각각 0과 1의 값을 갖는다. 또한, $\omega_1 + \omega = \omega_c$ 로 가정하였다. a_k 의 0과 1의 발생

확률과, b_k 의 0과 1의 발생 확률은 각각 1/2 이라 가정한다.

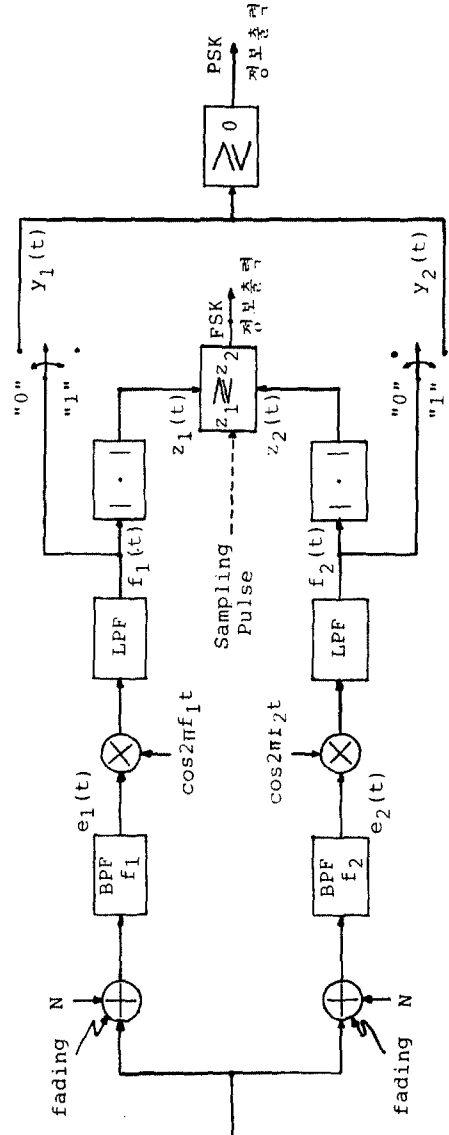


그림 3은 PFSK 시스템의 복조 블록도를 나타낸 것이다.

2) 오울 해석

본 절에서는 가우스성 잡음 및 m 분포 페이딩 환경하에서의 오울식을 각각 유도한다. 본 해석에서는 $b_K=0$ 인 경우로 가정한다.

i) 가우스성 잡음

주파수 정보가 0 ($b_K=0$)인 경우, 윗 지로의 BPF 출력 신호 $e_1(t)$ 와 아랫 지로의 BPF 출력 신호 $e_2(t)$ 는 각각 다음과 같다.

$$e_1(t) = A \cos(\omega_c t + a_K \pi) + n_{i1} \cos(\omega_c t + a_K \pi) - n_{g1} \sin(\omega_c t + a_K \pi) \quad (7)$$

$$e_2(t) = n_{i2} \cos(\omega_c t + a_K \pi) - n_{g2} \sin(\omega_c t + a_K \pi) \quad (8)$$

등기 검파를 하기 위하여 $s_1(t)$ 와 $s_2(t)$ 에 $\cos \omega_c t$ 와 $\cos \omega_c t$ 를 각각 곱하고, 위상 변조에 따른 위상 반전을 고려하여 LPF 뒷 단의 $| \cdot |$ 를 통과시키면, 최대치 판별기의 입력 $z_1(t)$ 와 $z_2(t)$ 는 각각

$$z_1(t) = (A + n_{i1})/2 \quad (9)$$

$$z_2(t) = n_{i2}/2 \quad (10)$$

로 나타내어진다.

따라서, FSK의 오울 P_{EF} 는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{EF} = \text{Prob}(A + n_{i1} < n_{i2}) \\ = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\sqrt{\gamma}}{2}\right) \quad (11)$$

여기서, γ 는 반송파 전력 대 잡음 전력비 ($\text{CNR} = \frac{A^2}{2N}$)이다.

이와 같이 검출된 주파수 정보는 대응하는 스위치를 연동시켜 PSK 복조단에, 해당되는 지로의 수신 신호를 접속시킨다. 따라서, 극성 판별기의 입력 신호 $y_1(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_1(t) = (A + n_{i1})/2 \quad (12)$$

따라서, FSK가 올바르게 복조되었을 경우의 PSK 오울 P_{EP} 는 다음과 같다.

$$P_{EP} = \text{Prob}(A + n_{i1} < 0) \\ = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad (13)$$

복조 블록도에서 알 수 있듯이 위상 정보의 검출은 주파수 정보의 검출 후에 이루어진다. 따라서, 주파수 정보의 검출 과정에서 에러가 발생하면, 위상 정보는 검출할 수 없을 것이다.

그러므로, 전체 시스템의 오울 P_{EPF} 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{EPF} = P_{EF} + P_{EP} \cdot (1 - P_{EF}) \\ = P_{EF} + P_{EP} - P_{EF} \cdot P_{EP} \quad (14)$$

ii) 페이딩 환경하에서 잡음에 의한 영향
페이딩 환경하에서의 평균 오울은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\langle P_E \rangle = \int_0^\infty P_E \cdot p(A) dA \quad (15)$$

① FSK 방식의 경우 :

$$\langle P_{EF} \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{2m^m A^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \exp\left(-\frac{mA^2}{\Omega^2}\right) \\ \cdot \text{erfc}\left(\frac{A}{2\alpha n}\right) dA \\ = \frac{1}{2} - \frac{\Gamma(m+\frac{1}{2})}{\sqrt{2\pi m} \Gamma(m)} \sqrt{\gamma_0} \left(1 + \frac{\gamma_0}{2m}\right)^{-(m+\frac{1}{2})} \\ \cdot {}_2F_1\left(1, m+\frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\gamma_0}{2m+\gamma_0}\right) \quad (16)$$

윗 식에서 γ_0 는 평균 CNR, ${}_2F_1(\alpha, \beta; \gamma; x)$ 은 Gauss의 초기하 함수이다.

② PSK 방식의 경우 :

$$\langle P_{EP} \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{2m^m A^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \exp\left(-\frac{mA^2}{\Omega^2}\right) \text{erfc}\left(\frac{A}{\sqrt{2}\alpha n}\right) dA \\ = \frac{1}{2} - \frac{\Gamma(m+\frac{1}{2})}{\sqrt{\pi m} \Gamma(m)} \sqrt{\gamma_0} \left(1 + \frac{\gamma_0}{m}\right)^{-(m+\frac{1}{2})} \\ \cdot {}_2F_1\left(1, m+\frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\gamma_0}{m+\gamma_0}\right) \quad (17)$$

③ FFSK 방식의 평균 오울은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\langle P_E \rangle = \langle P_{EF} \rangle + \langle P_{EP} \rangle - \langle P_{EF} \rangle \cdot \langle P_{EP} \rangle \quad (18)$$

iii) QDPSK 방식의 오율 특성

가우스성 잡음 및 m 본포 페이딩 환경하에서의 오율

식은 아래와 같다.

① 가우스성 잡음의 경우^[8],

$$P_{\text{EAD}} = \exp(-\gamma) \quad (19)$$

② m 본포 페이딩의 경우 :

$$\langle P_{\text{EAD}} \rangle = \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma}{m}\right)^m} \quad (20)$$

iv) 중단율 (Outage Rate)

중단율은 오율 P_e 가 임의의 특정값 P_e^* 를 초과할 때의 시간율(%)로 정의된다. 중단율 T는 페이딩 신호 진폭 $R(t)$ 가 P_e^* 를 제공하는 레벨 R^* 이하로 떨어질 확률과 같다.

중단율 T는 다음과 같이 구해진다.^[8]

$$T = \int_0^{R^*} p(A) dA \quad (21)$$

여기서, $P_e(R^*) = P_e^*$ 이다.

식 (5)와 식 (21)로부터, 중단율 T는

$$T = \frac{1}{\Gamma(m)} i\left(m, \frac{m R^*}{\gamma}\right) \quad (22)$$

$$= \frac{1}{\Gamma(m)} i\left(m, m \frac{\gamma}{\gamma}\right) \quad (23)$$

로 된다. 여기서, $i(\cdot, \cdot)$ 는 불완전 감마 함수 (incomplete gamma function)이다.

$$i(m, \chi) = \int_0^\chi t^{m-1} \exp(-t) dt \quad (24)$$

식 (23)으로부터 PSK와 FSK 경우의 중단율은 다음과 같다.

① PSK의 경우 :

$$T_P = \frac{1}{\Gamma(m)} i\left(m, m \frac{[\text{erfc}^{-1}(2P_e^*)]^2}{\gamma}\right) \quad (25)$$

② FSK의 경우 :

$$T_F = \frac{1}{\Gamma(m)} i\left(m, m \frac{2[\text{erfc}^{-1}(2P_e^*)]^2}{\gamma}\right) \quad (26)$$

윗 식에서 $\text{erfc}^{-1}(\cdot)$ 는 $\text{erfc}(x)$ 의 역함수이다.

4. 수치 계산 및 검토

가우스성 잡음 및 m 본포 페이딩 환경하에서 FSK와 PSK에 대한 오율식 및 중단율에 관한 식을 구하여, 각 변수를 변화시키며 수치계산을 하여 QDPSK 방식과 비교하였다. 여기서 변수로서는 반송파 전력 대 잡음 전력비 (CNR), 페이딩 지수 (m), 특정 오율값 (P_e^*)을 택하였다.

그림 4.는 가우스성 잡음 환경하에서의 FSK, PSK, PFSK 및 QDPSK 방식의 오율을 나타낸 것이고,

그림 5.는 m 본포 페이딩 환경하에서의 페이딩 지수의 변화에 따른 각 변조 방식의 오율을 나타낸 것이다.

그림 6.은 페이딩 지수와 특정 오율값의 변화에 따른 FSK, PSK 방식의 중단율을 나타낸 것이다.

그래프로 나타낸 오율 및 중단율로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 가우스성 잡음 환경하에서 10^{-4} 이하의 오율이 요구된다면 약 13dB 이상의 CNR이 필요하다.

또한, 낮은 신호 전력에 대해서는 PFSK가 QDPSK보다 성능이 좋다.

둘째, 비교적 강한 페이딩이 존재하는 경우에는, PFSK가 QDPSK에 대해 CNR 면에서 개선 효과가 있다. 특히, Rayleigh 페이딩의 경우는 약 3dB의 개선 효과가 있다.

약한 페이딩일 경우에는 CNR이 증가함에 따라 QDPSK가 PFSK에 비해 점차 좋은 성능을 나타낸다.

셋째, $P_e^* = 10^{-4}$ 인 경우에 있어서, 시간율이 1 (%) 이하가 되려면, Rayleigh 페이딩의 경우 PSK는 약 28dB, FSK는 약 31dB 정도의 CNR이 요구된다.

또한, 일정한 시간율이 요구될 때, 페이딩이 약해짐에 따라, 요구되는 CNR은 점차 작아진다.

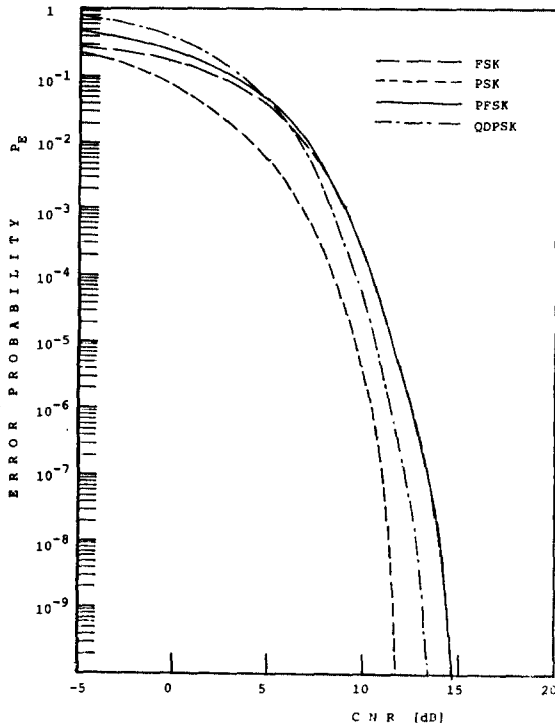


그림 4 가우스성 잡음하에서의 오율 특성 비교
(FSK, PSK, PFSK, QDPSK)

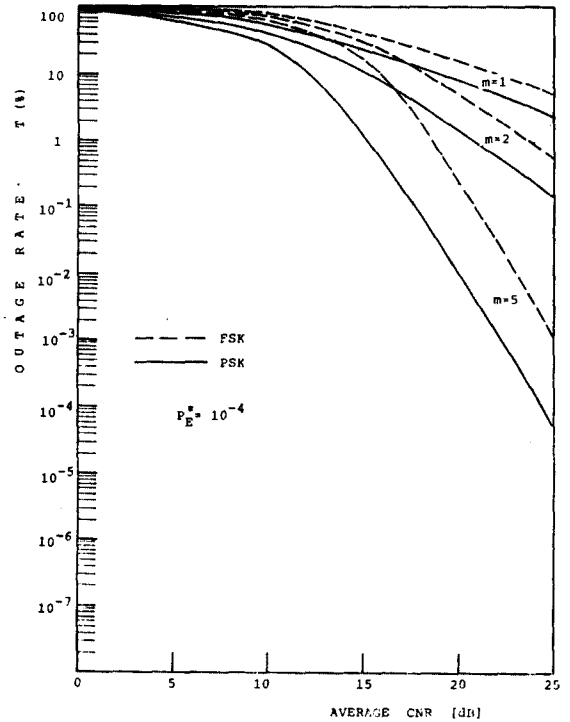


그림 6 m의 변화에 따른 중단을 특성 비교
(FSK, PSK) ($P_E^* = 10^{-4}$ 일 때)

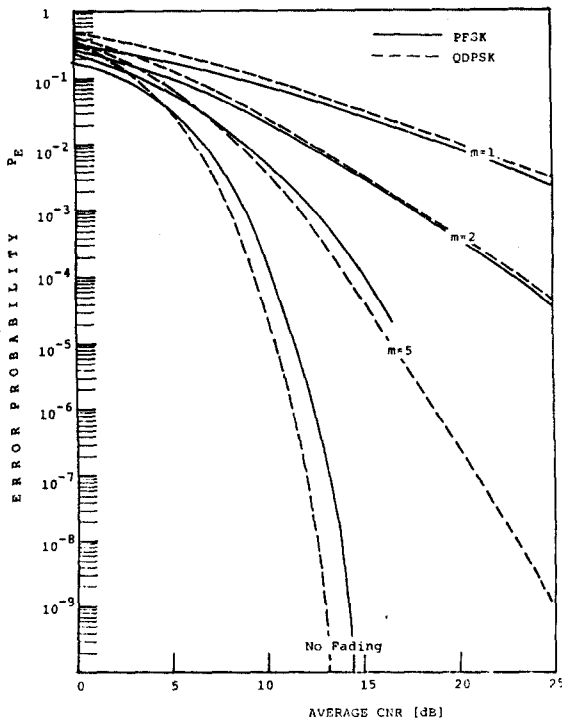


그림 5 페이딩 환경하에서 m의 변화에 따른 오율
특성 (PFSK, QDPSK)

참 고 문 헌

- [1] 吉川憲昭, 公衆自動車電話方式に関する研究
- [2] C.R.Cahn, "Combined digital phase and amplitude modulation communication systems," IRE Trans. Commun. Syst., vol.CS-8, pp.150-155, Sept. 1960.
- [3] J.C.Hancock and R.W.Lucky, "Performance of combined amplitude and phase modulated communication systems," IRE Trans. Commun. Syst., vol.CS-8, pp.232-237, Dec. 1960.
- [4] M.Nakagami, "The m-distribution - A general formular of intensity distribution of rapid fading," in Statistical Method in Radio Waves Propagation, W.C.Hoffman Ed. New York: Pergamon Press, 1960.

- [5] Y.Miyagaki, N.Morinaga, & T.Namekawa, " Error probability characteristics for CPSK signal through M-distributed fading channel," IEEE Trans. Commun., vol. COM-26, no. 1, pp. 88-100, Jan. 1978.
- [6] A.B.Carlson, Communication systems, New York : McGraw-Hill Inc., 1975.
- [7] G.R.Cooper, R.W.Nettleton, "Cellular mobile technology : the great multiplier," IEEE Spectrum, vol. 20, no. 6, pp.30-37, June 1983.
- [8] W.C.Y.Lee, Mobile communication engineering, New york : McGraw-Hill Inc., 1982.
- [9] W.Magnus, F.Oberhettinger, R.P.Soni, Formulas and theorems for the special functions of mathematical physics, 3rd ed. New York : Springer-Verlag, 1960.