

각 디지털 변조방식에 미치는 Jamming의 영향

김 승 신* 조 성 준**
한국항공대학 통신정보공학과

Effect of Jamming on digital modulation systems

Sung Gin KIM, Sung Joon CHO**

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

ABSTRACT : The error rate equations of digital modulation techniques (M-ary PSK, MSK, Multi-level QAM) have been derived in the environment of Gaussian noise and Jamming. And the results are shown in the figures as parameters of carrier power to noise power ratio(CNR), carrier power to Jamming power ratio(CJR), Jamming power to carrier power ratio(JCR), alteration figure of envelope of Jamming(m). As the results of analysis, the system performance is more deereeded by Gaussian Jamming than Tone Jamming. In case that envelope of Jamming has m distribution, the system performance is deereeded in the deep alteration of envelope.

1. 서 론

최근 사회 경제활동의 여러 분야에서 컴퓨터의 사용이 급속히 증가하고 있고 통신 회선과 결합한 데이터 통신의 수요가 늘어나는 추세에 있기 때문에 모든 통신망의 디지털화가 요청되었고 점차 디지털화가 실현되어 가고 있다. 그러나 늘어나는 통신 수요에 비해 주파수대는 한정되어 있어 전송 회선상에 존재하는 고유의 잡음뿐만 아니라 인접 신호간의 간섭 신호등이 통신의 품질에 영향을 미치는 경우가 있게 된다. 또한 인위적인 방해전파(Jamming)[1]의 영향도 무시할 수가 없는데 특히 우리나라와 같은 특수한 상황에서는 그에 대한 연구가 필요하다 하겠다. 따라서 본 연구에서는 진폭이 시간에 따라 변화하는 인위적인 간섭파와 가우스 잡음이 존재하는 환경하에서 각 디지털 변조방식의 성능을 오율의 관점에서 알아 보았다.

디지털 변조방식으로는 대표적인 위상 변조(PSK)방식, 최소 편이 주파수 변조(MSK)방식, 직교 진폭 변조(QAM)방식을 선택하였다.

2. 해석 모델

그림 1.에 본 연구에 있어서의 일반적인 해석 모델을 나타내었다.

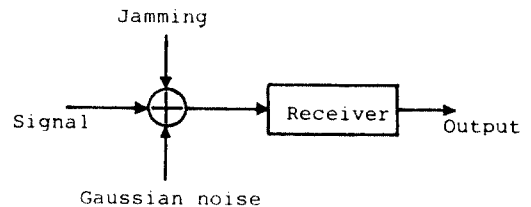


그림 1. 해석 모델
Analysis model.

2.1 신호

(1) M-ary PSK 신호

M-ary PSK 신호는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$s_p(t) = C \cos(\omega_c t + \theta), \quad \theta = 2\pi\lambda/M \quad (1)$$

단, C : 신호의 진폭

ω_c : 수신기의 이상적인 대역통과 필터의 중심 각주파수

λ ($=0, 1, \dots, M-1$) : 다상 정보

M : 레벨의 수(상의 수)

(2) MSK 신호

MSK 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s_m(t) = \sum_{k:\text{even}} a_k P(t-kT) \cos \omega_c t \cos \omega_s t + \sum_{k:\text{odd}} a_k P(t-kT) \sin \omega_c t \sin \omega_s t \quad (2)$$

단, $a_k = \pm 1$

C : 신호의 진폭

$$P(t) = \begin{cases} 0 & -T \leq t \leq T \\ 1 & \text{그 외} \end{cases}$$

$\omega_c = 2\pi f_c$

(3) Multi-level QAM 신호

Multi-level QAM 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s_q(t) = a(t) \cos \omega_c t + b(t) \sin \omega_c t \quad (3)$$

단, $a(t)$: 동상 채널(I-ch)에서의 정보원 신호

$b(t)$: 역상 채널(Q-ch)에서의 정보원 신호

2.2 잡음

평균이 "0"인 협대역 가우스성 잡음은 다음과 같이 표현된다.

$$n(t) = N \cos(\omega_c t + \lambda) \quad (4)$$

단, N : 잡음의 진폭

λ : 잡음의 위상

임의의 시간 t 에 있어서의 $n(t)$ 의 값 x 는 가우시안 랜덤 변수가 되며 그에 대한 확률 밀도 함수(probability-density function)는 다음과 같다.

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (5)$$

2.3 Jamming 신호

(1) Gaussian Jamming 신호 (Gaussian noise상의 Jamming)

Jamming 신호가 가우스성 잡음과 동일하게 간주되는 경우로서 Jamming 신호는 잡음의 형태와 똑같이 표현된다.

$$j_c(t) = J \cos(\omega_c t + \lambda) \quad (6)$$

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (7)$$

(2) Tone Jamming 신호

본 연구에서는 동일 채널 간섭파인 Tone Jamming 신호를 고려하였다. 이때 Jamming 신호의 포락선 분포는 Jammer측에서 임의로 조절이 가능하다고 생각할 수 있으므로 Jamming 신호에 여러 종류의 분포를 표현할 수 있는 확률 밀도 함수로서 나카가미 교수가 제안한 m -분포를 도입한다. [2]

Tone Jamming 신호는 식(6)과 같이 나타낼 수 있는데 이때 신호의 위상은 식(9)와 같이 $[0, 2\pi]$ 사이에서 일양 분포를 하며 포락선은 식(10)과 같이 m -분포를 한다.

$$j_c(t) = J \cos(\omega_c t + \phi) \quad (8)$$

$$P(\phi) = 1/2\pi, \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (9)$$

$$P(J) = \frac{2m^m J^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^{2m}} \exp\left(-\frac{mJ^2}{\Omega^2}\right) \quad (10)$$

여기서 $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이고 $\Omega^2/2$ 는 신호의 평균 전력이다. m 은 진폭의 포락선 변화 정도를 나타내는 지수이다.

m 에 따른 분포 곡선은 그림 2.와 같다. 이 그림에서 $m=1/2$ 이면 가우스 분포, $m=1$ 이면 레일리 분포가 되며 $m \rightarrow \infty$ 일때는 일정 진폭의 경우가 된다.

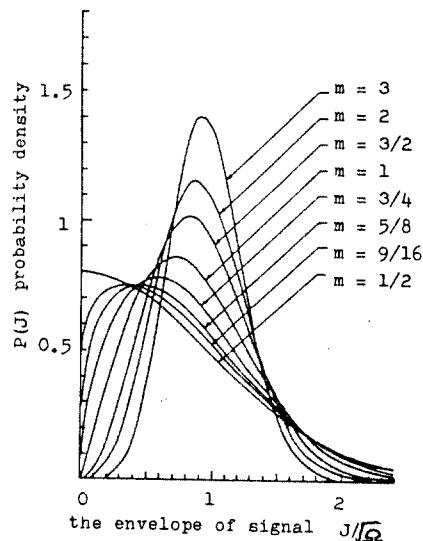


그림 2. m -분포

m -distribution curve.

3. 각 변조 방식의 오율 특성 해석

3.1 M-ary PSK 방식

PSK 수신기의 해석 모델은 그림 3.과 같다.

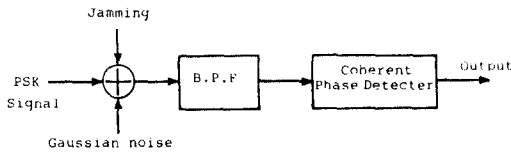


그림 3. PSK 수신기의 해석 모델
Analysis model of PSK receiver.

여기에서 대역 통과 필터 및 수신기의 감파기는 이상적인 것으로 가정하였고 송신기와 수신기 사이에는 완전한 동기화 이루어졌다고 가정하였다.

M-ary PSK 신호의 부호 배치는 그림 4.와 같이 위상 평면상에서 신호 진폭 s 를 반경으로 하는 원주에 등간격으로 부호점이 배치된 형태가 된다. [3]

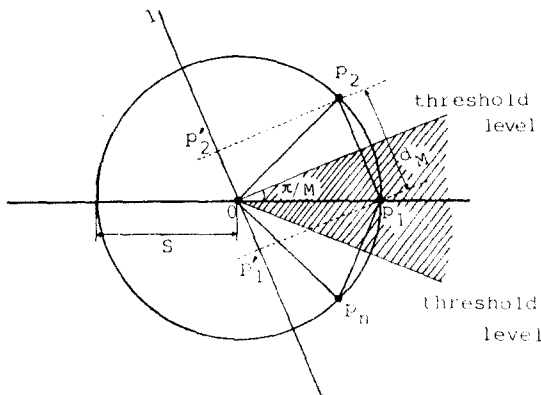


그림 4. M-ary PSK 신호의 부호 배치
Constellation for M-ary PSK signal.

그림 4.에서 인접 부호점간의 거리 d_M 은

$$d_M = 2s \sin \frac{\pi}{M} \text{ 이다.}$$

인접 부호점간의 오율을 고려하여 그림 5.에 Jamming과 잡음의 영향을 받았을 때의 합성 신호의 페이저도를 나타냈다. 여기서 판정 레벨(threshold level)은 인접 부호점간의 거리의 반으로 잡았다.

(1) Gaussian Jamming

그림 5.의 페이저도에서 합성 신호가 여러 영역에 들어갈 확률이 오율이 된다.

$$P_{er} = \text{erfc} \left(\frac{\sin \frac{\pi}{M}}{\sqrt{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}}} \right)$$

[11]

만,

$$\alpha(\text{CNR}) = S^2 / 2\sigma_n^2$$

$$\beta(\text{CJR}) = S^2 / 2\sigma_j^2$$

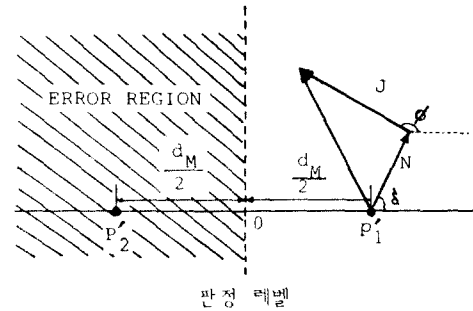


그림 5. 수신 PSK 신호의 합성 페이저도
Composite phasor diagram of received PSK signal.

(2) Tone Jamming

역시 그림 5.에서 합성 신호가 여러 영역에 들어가면 에러가 발생하므로 오율은 다음과 같다.

$$P_{er} = \text{erfc} \left(\sqrt{\alpha} \cdot \sin \frac{\pi}{M} \right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp \left(\alpha \left(\sin^2 \frac{\pi}{M} \right) \right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left(\sqrt{\alpha} \cdot \sin \frac{\pi}{M} \right) \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{2\sqrt{\beta}} \right)^{2k} \dots (12)$$

만, $\alpha(\text{CNR}) = S^2 / 2\sigma_n^2$
 $\beta(\text{CJR}) = S^2 / J^2$

Jamming 신호 진폭의 포락선이 m 분포를 할 경우의 오율은 식 (12)에서 진폭 J 에 대해 식 (10)의 m 분포 α, β 를 이용하여 평균을 취해주면 되므로 최종 오율식은 다음과 같다.

$$P_{em} = \text{erfc} \left(\sqrt{\alpha} \cdot \sin \frac{\pi}{M} \right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\alpha \left(\sin^2 \frac{\pi}{M} \right) \right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left(\sqrt{\alpha} \cdot \sin \frac{\pi}{M} \right) \frac{\Gamma(m+k)}{\Gamma^2(k+1)\Gamma(m)} \frac{1}{(4m)^k} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^k \dots (13)$$

3.2 PSK 방식

PSK 신호는 PSK의 특수한 예로서 일정 진폭을 가지며 대역폭 특성이 우수한 변조 방식이다. PSK 신호에 대한 해석 모델은 그림 6.과 같다.

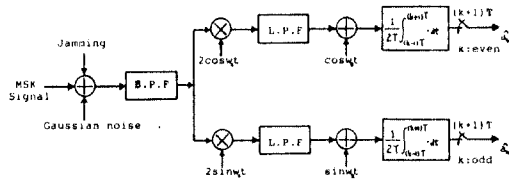


그림 6. MSK 수신기의 해석 모델
Analysis model of MSK receiver.

그림 6.에서와 같이 식 (2)에서의 디지털 정보 신호인 a_k 가 채널상에서 Jamming과 잡음의 영향을 받아 \hat{a}_k 로 최종 복원되며 이때 a_k 는 \hat{a}_k 로 되어 에러가 발생할 수 있다. 2개의 채널에 인가되는 디지털 정보중 "1"이나 "0"의 발생 확률이 같다고 가정하면 하나의 채널에 대해서만 해석해도 충분하다. 해석 모델에서 최종 검출된 수신 합성파는 그림 7.과 같은 합성 페이저로도 나타낼 수 있다.

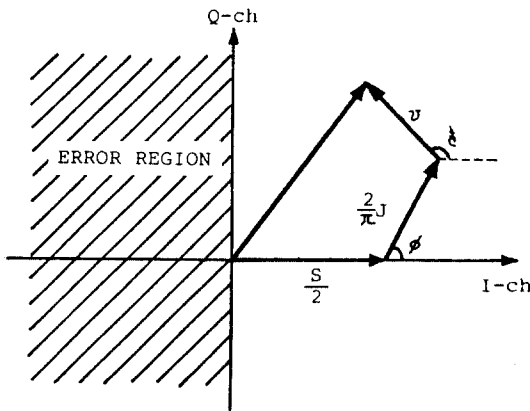


그림 7. 수신 MSK 신호의 합성 페이저도
Composite phasor diagram of received MSK signal.

(1) Gaussian Jamming

그림 7.에서 에러 영역에 들어가면 에러가 발생한다.

$$P_{eq} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\pi}{4\sqrt{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}}} \right) \quad (14)$$

단, $\alpha(\text{CNR}) = S^2/2\sigma_n^2$, $\beta(\text{CJR}) = S^2/2\sigma_j^2$

(2) Tone Jamming

PSK의 경우와 같이 유도하면 Tone Jamming과 Jamming 신호 진폭의 포락선이 m -분포를 하는 경우의 오류는 식 (15), (16)과 같다.

$$P_{er} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\pi\sqrt{\alpha}}{4} \right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{\pi^2\alpha}{16} \right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{2k} H_{2k-1} \left(\frac{\pi\sqrt{\alpha}}{4} \right) \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{\alpha}{4\beta} \right)^k \quad (15)$$

$$P_{em} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\pi\sqrt{\alpha}}{4} \right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{\pi^2\alpha}{16} \right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k H_{2k-1} \left(\frac{\pi\sqrt{\alpha}}{4} \right) \frac{\Gamma(m+k)}{\Gamma^2(k+1)\Gamma(m)} \frac{1}{(4m)^k} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^k \quad (16)$$

단, $\alpha(\text{CNR}) = S^2/2\sigma_n^2$
 $\beta(\text{CJR}) = S^2/\sigma_j^2$

3.3 Multi-level QAM 방식

Multi-level QAM 수신기의 해석 모델은 그림 8.과 같다.

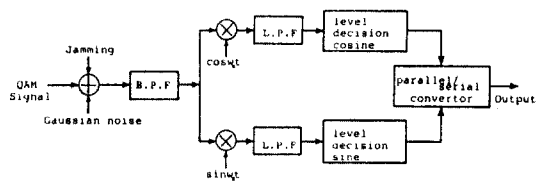


그림 8. QAM 수신기의 해석 모델
Analysis model of QAM receiver.

격자상 부호 배치를 갖는 Multi-level QAM 신호의 부호점을 신호공간상에 표시하면 그림 9.와 같다.

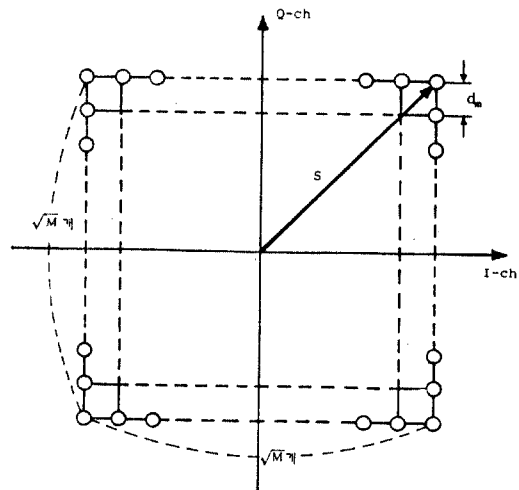


그림 9. M차 QAM 신호의 신호 공간상에서의 표현
Representation of Multi-level QAM signal in signal space.

그림 9.에서 수신 신호의 최대 진폭을 S 라 하면 최소 부호점간의 거리 d_m 은

$$d_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1} S \text{ 이다.}$$

인접 부호점간 오차를 고려하여 그림 10.에 QAM 신호가 Jammins과 잡음의 영향을 받았을 때의 합성 신호의 페이저도를 나타내었다. 여기서 판정 레벨(threshold level)은 최소부호점간의 거리의 반($d_m/2$)으로 잡았다.

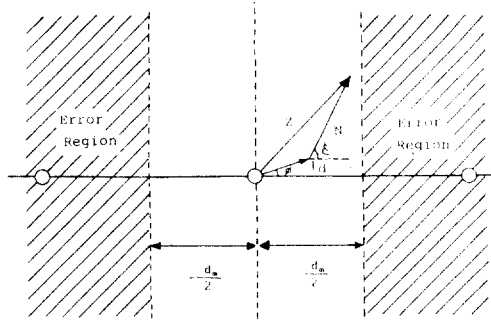


그림 10. M차 QAM 신호의 수신 합성 페이저도
Composite phasor diagram of received Multi-level QAM signal.

(1) Gaussian Jammins

그림 10.에서 합성 신호가 판정 레벨을 넘어 에러 영역에 들어가면 에러가 발생한다. 그러므로 오율은 다음과 같다.

$$P_{eQ} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}}{2\sqrt{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\gamma}}} \right) \quad (17)$$

$$\text{단, } \alpha(\text{CNR}) = S^2/2\sigma_n^2, \quad \gamma(\text{CJR}) = S^2/2\sigma_s^2$$

M차 QAM에 있어서 각 부호점의 위치에 따라 거리 d_m 인 곳에 있는 인접 부호점의 수가 다르므로 부호 오율도 달라지게 된다. 따라서 이의 평균을 취하면 다음과 같다.

$$P_{eQ} = \frac{4(M-\sqrt{M})}{M} P_{e0Q} \quad (18)$$

I-ch과 Q-ch에서 동시에 발생된 중복된 에러 오율은 필요치 않기 때문에 전체 오율에서 빼어준다. 따라서 최종적인 평균 오율식은 다음과 같다.

$$P_{E_Q} = P_{eQ} - \frac{1}{4} P_{eQ}^2 \quad (19)$$

(2) Tone Jammins

앞에서의 방법과 마찬가지로 오율식을 유도하면 Tone Jammins인 경우의 오율은 다음과 같다.

$$P_{eT} = \frac{2(M-\sqrt{M})}{M} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\alpha}{2} \right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{-\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\right)\alpha}{4} \right) \right. \\ \left. \cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\alpha}{2} \right) \frac{1}{(k!)^2} \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\alpha}{2\sqrt{\beta}} \right)^{2k} \right] \quad (20)$$

여기 중복에러를 고려하면 최종 오율식은 다음과 같다.

$$P_{E_T} = P_{eT} - \frac{1}{4} P_{eT}^2 \quad (21)$$

Jammins 신호 진폭의 포락선이 m 분포를 하는 경우도 마찬가지로 유도하면 다음 식과 같이 된다.

$$P_{em} = \frac{4(M-\sqrt{M})}{M} \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\alpha}{2} \right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\right)\alpha}{4} \right) \right. \\ \left. \cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1}\alpha}{2} \right) \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{M}-1} \right)^{2k} \frac{\Gamma(m+k)}{\Gamma^2(k+1)\Gamma(m)} \frac{1}{(4m)^k} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^k \right\} \quad (22)$$

중복에러를 고려하면 최종 오율식은 다음과 같이 된다.

$$P_{E_m} = P_{em} - \frac{1}{4} P_{em}^2 \quad (23)$$

$$\text{단, } \alpha(\text{CNR}) = 50^2/4\sigma_n^2 \text{ (평균 신호전력대 잡음전력비)} \\ \beta(\text{CJR}) = S^2/J^2$$

4. 오율 특성의 비교

앞 절에서 유도한 각 방식의 일반 오율식을 이용하여 4PSK, MSK, 16QAM 방식에 대해 수치 계산을 한 결과를 반송파대 잡음 전력비(CNR), 반송파대 Jammins 전력비(CJR), Jammins대 반송파 전력비(JCR), Jammins 신호 진폭의 포락선 변화 지수(m) 등을 파라미터로 하여 성능 곡선을 그림 11. 그림 10.에 나타내었다.

그림 11. 그림 13에서는 m값의 변화에 따른 각 방식들의 오율 특성을 나타내었는데 MSK 방식이 가장 양호한 성능을 보이고 있다.

그림 14.는 Gaussian Jammins과 Tone Jammins의 영향을 비교하여 나타낸 그림으로서 Gaussian Jammins이 Tone Jammins보다 더 시스템의 성능을 열화시킨다는 사실을 알 수 있다.

그림 15.와 그림 16.은 m 의 값에 따른 각 방식의 오율 특성을 CJR을 파라미터로 하여 나타낸 그림으로서 쉽게 Jamming의 영향을 알아 볼 수가 있다. $m=1$ 일 때 가 $m \rightarrow \infty$ (tone)인 경우보다 더 성능이 열화됨을 알 수 있다.

5. 검토 및 결론

M-ary PSK 신호, MSK 신호, Multi-Level QAM 신호에 대한 일반 오율식을 유도하여 수치 계산을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 어떤 환경에서든지 MCK 시스템이 가장 양호한 성능을 보이고 있고 4PSK, 16QAM의 순이 되었다.
- Gaussian Jamming과 Tone Jamming의 영향을 비교해 보면 Gaussian Jamming이 더 시스템의 성능을 열화시킨다.
- 진폭이 m -분포 하는 Jamming의 경우 m 의 값이 작은 경우 즉, Jamming 신호 진폭의 변화폭이 큰 경우 시스템의 성능이 열화 되었고 그 열화 정도는 CJR의 값이 작을 경우 큰 폭으로 나타났다. 결국 Jammer측에서 m 의 값을 상당히 작게 조정하면 시스템의 성능에 심각한 영향을 줄 수가 있게 된다.

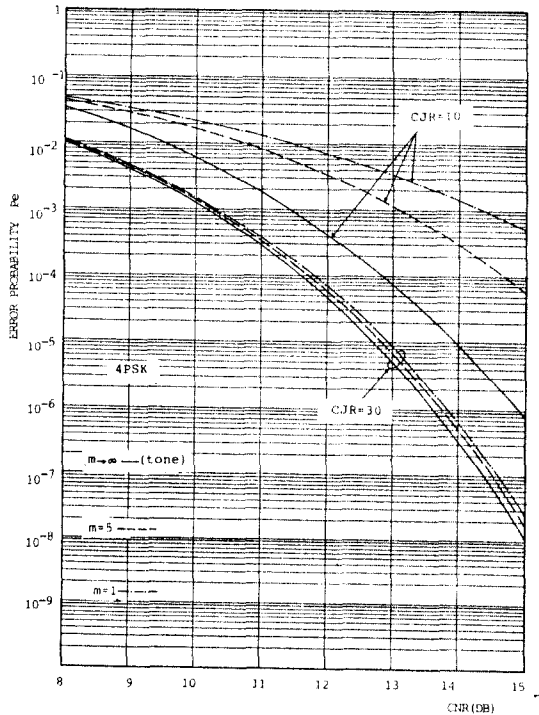


그림 11. m 의 변화에 따른 4PSK의 오율 특성
Error rate performance of 4PSK with various alteration figure m .

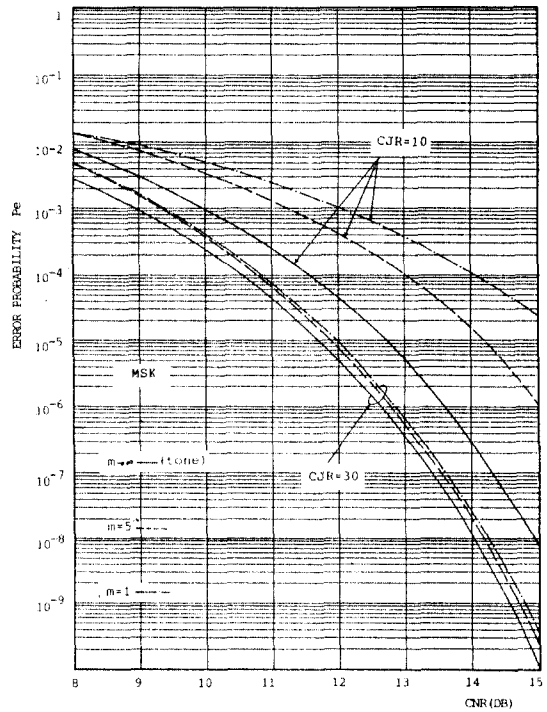


그림 12. m 의 변화에 따른 MCK의 오율 특성
Error rate performance of MCK with various alteration figure m

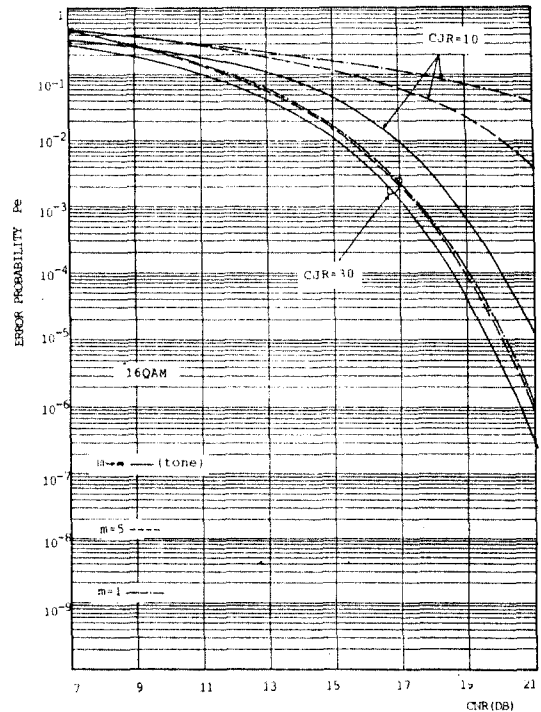


그림 13. m 의 변화에 따른 16QAM의 오율 특성
Error rate performance of 16QAM with various alteration figure m .

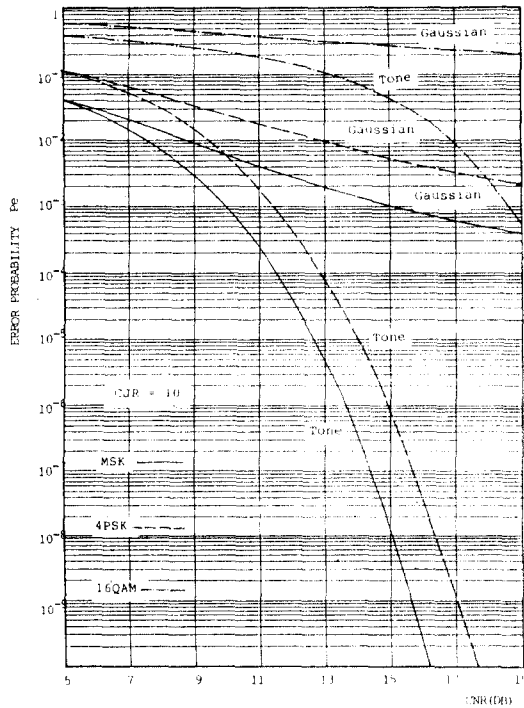


그림 14. Gaussian Jamming과 Tone Jamming 환경 하에서의 오류 특성 비교
Comparison of error rate performance in the Gaussian and Tone Jamming environment.

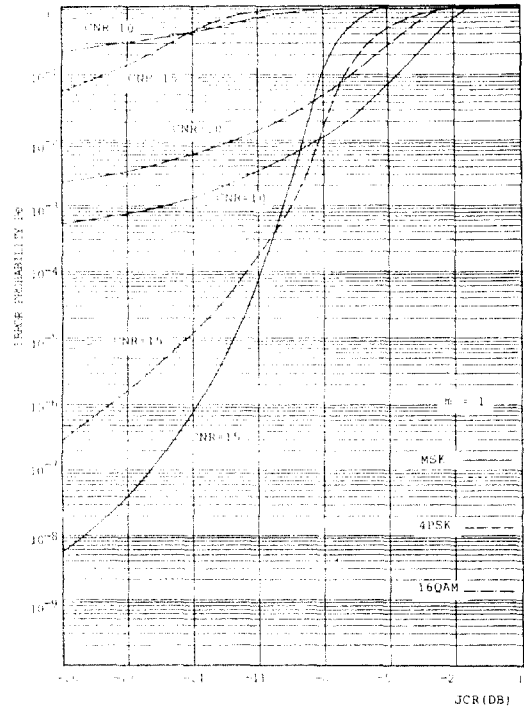


그림 16. $m=1$ 인 경우의 오류 특성 비교
Comparison of error rate performance with $m=1$.

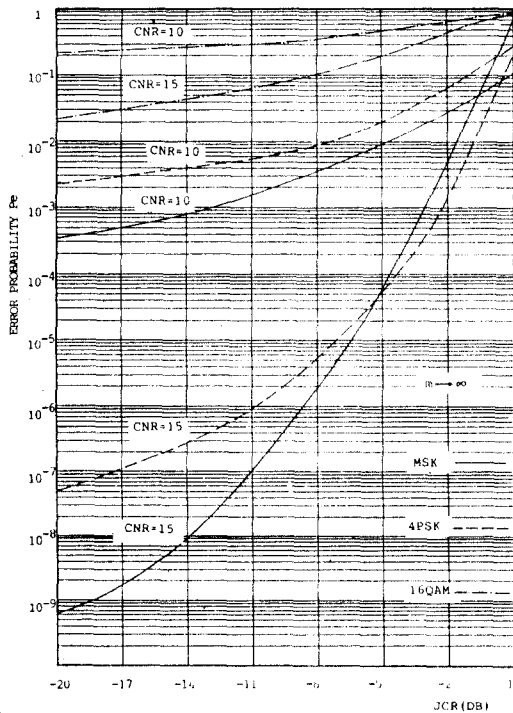


그림 15. Tone Jamming 환경하에서의 오류 특성 비교
Comparison of error rate performance in the Tone Jamming environment.

참고 문헌

- [1] M. Marcus, "Analysis of tactical communications jamming problems," IEEE Trans. Commun., vol. Com 20, pp. 1025-1030, Sep. 1970.
- [2] M. Nakasami, "The m -distribution - A general formula of intensity distribution of rapid fading," in Statistical Method in Radio Waves Propagation, W. C. Hoffman ed., New York: Pergamon Press, 1960.
- [3] 桑原守ニ 整修, デジタルマイクロ波通信, 企画センター(株): 東京, 1984.
- [4] W. Magnus and F. Oberhettinger and R. P. Coni, Formulas and theorems for the special functions of mathematical physics, 3rd ed., New York: Springer-Verlag, 1966.
- [5] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, Tables of integrals of series and products, New York: Academic Press, 1980.
- [6] D. J. Torrieri, Principles of secure communication systems, Washington: Artech house, 1985.