

## 재밍하에서의 디지털 무선통신신호의 오류특성

\*고봉진\*\* 김상범\* 강희조\*\* 조성준\*

\* 한국항공대학 항공통신정보공학과  
\*\* 한국항공대학 항공전자공학과Error Rate Performance of Digital Radio Communication Signal  
in Jamming Environment

\*Bong-Jin KO\*\* Sang-Bum KIM\* Hee-Jo KANG\*\* Sung-Joon CHO\*

\* Dept. of Telecom. and Information Eng., Hankuk Aviation University  
\*\* Dept. of Avionics Eng., Hankuk Aviation University

**ABSTRACT** : The error rate equation of digital communication systems (M-ary PSK, MSK, Multi-level QAM) has been derived in the environment of Gaussian noise and jamming. The error rate performance has been evaluated and the results are represented in graphs as a function of carrier-to-noise ratio, jamming-to-carrier ratio, and figure of jamming envelope(m).

The results show that noise jamming and one-sided Gaussian tone jamming affects seriously the performance of digital communication systems.

## 1. 서론

무선통신방식이 실용화된 이래 고속, 고품질의 통신에 대한 수요가 증가함에 따라 여러가지 디지털 변조방식이 제안되었다[1]. 그러나 한정된 주파수 자원의 고갈로 인한 간섭뿐만 아니라 의도적인 전파 방해(jamming)등에 의해 각종 디지털 통신 시스템이 받는 영향이 문제가 되어 이에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다[2][3].

본 논문에서는 디지털 변조 방식중 대표적인 PSK, MSK, QAM 방식을 택하여 여러가지 jamming 에 의한 영향에 대하여 이론적인 분석을 행하였다. 이를 위해 jamming 의 모델로서 noise jamming 신호와 tone jamming 신호외에 진폭이 변화하는 m 분포 tone jamming 신호를 도입하였다. 그리고 본 논문에서는 특별한 경우로서 반 Gaussian jamming의 경우도 해석을 행하고자 한다.

해석결과 얻은 오율식을 이용하여 수치계산한 결과를 반송파대 잡음 전력비, jamming대 반송파 전력비, 그리고 jamming 신호의 진폭변화지수를 함수로 하여 그래프로 나타내고 검토를 행하기로 한다.

## 2. Jamming 의 유형

일반적인 대역 통과 동일 채널 Jamming 신호는 다음과 같이

표현된다.

$$j(t) = J \cos(\omega_c t + \phi) \\ = j_c \cos \omega_c t - j_s \sin \omega_c t \quad (1)$$

단,  $j_c$  는 In-phase,  $j_s$  는 Quadrature-phase 성분이다.

본 논문에서 해석할 여러가지 jamming 에 대한 분류를 행하면 noise jamming 신호는 가우스 잡음과 동일하게 간주되는 경우로  $j_c$  와  $j_s$  에 대한 확률 밀도 함수는 다음식으로 주어진다.

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

$$P(j_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_j} \exp \left[ -\frac{j_s^2}{2\sigma_j^2} \right] \quad (3)$$

단,  $\sigma_j^2$  은 noise jamming 신호의 전력이다.

jamming 의 두번째 형태로서 tone jamming 신호를 고려한다. 일정한 진폭을 가지는 tone jamming 신호는 식(1)에서 J 가 일정한 크기인 경우이다.

1) M - ary PSK 시스템

jamming과 잡음의 영향을 받았을때 기준반송파의 합성 신호의 페이저도는 그림 3과 같다. 여기서 판정 레벨(threshold level)은 인접 부호점간의 거리의 반(dw/2)으로 잡는다. N은 잡음, J는 jamming의 크기를, 그리고  $\xi$ 는 jamming의 위상을,  $\phi$ 는 잡음의 위상을 각각 나타낸다.

그러나 jammer의 입장에서 보면 jamming 신호의 진폭을 변화시킨다면 더 효과적인 jamming 효과를 얻을 수 있을 것이다. 이를 고려하여 jamming 신호의 진폭변화를 나타낼 수 있는 m 분포[4]를 도입하여 jamming 신호의 포락선이 m 분포하는 tone jamming 신호를 생각하면 신호의 위상  $\phi$ 와 진폭의 포락선 J는 다음과 같은 분포를 한다.

$$P(\phi) = 1/2\pi, \quad 0 \leq \phi < 2\pi \quad (4)$$

$$P(J) = \frac{2m^m J^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \exp\left[-\frac{mJ^2}{\Omega}\right] \quad (5)$$

$$\Omega = \langle J^2 \rangle, \quad m \geq 1/2$$

단,  $\Gamma(\cdot)$ 은 Gamma 함수  
 $\Omega/2$ 는 jamming 신호의 평균전력  
 $m$ 은 진폭의 포락선 변화 정도를 나타내는 지수.

진폭의 포락선 J에 관한 분포를 나타내면 그림 1과 같다.

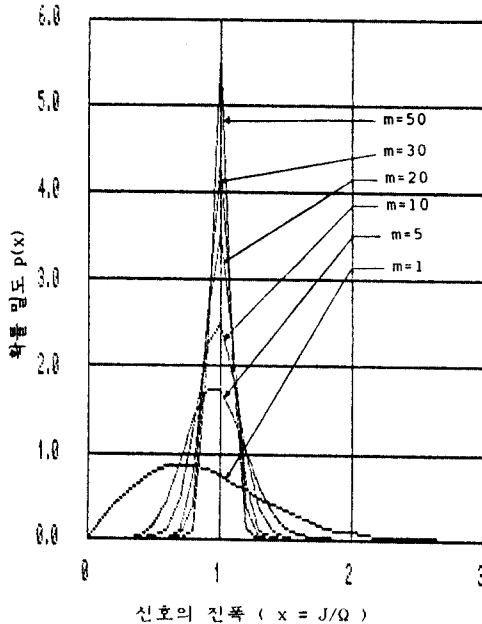


그림 1. m 분포

3. 대표적인 디지털 통신 시스템의 오율 특성 해석

각 시스템은 이상적이고 수신기와 송신기는 완전히 동기되었다고 가정하여 그림 2에 일반적인 해석모델을 나타낸다.

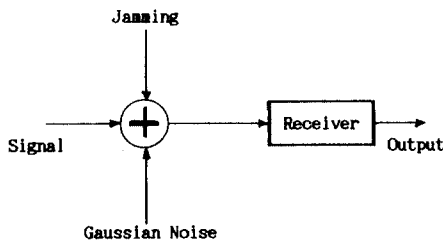
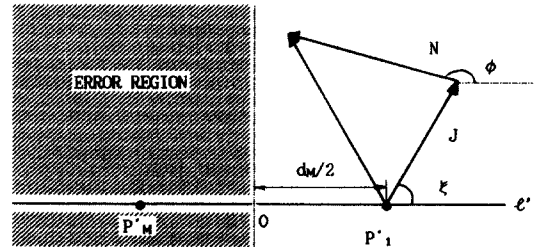


그림 2. 해석 모델



판정 레벨

그림 3. 수신 PSK 신호의 합성 페이저도

noise jamming 신호와 잡음에 의한 오율식은 가우스 잡음만에 의한 오율식에서  $\sigma_n^2$ 을  $\sigma_n^2 + \sigma_j^2$ 으로 치환하면 구해 지는데 결과는 다음과 같다.

$$PE_n = \text{erfc} \left[ \frac{\sin \frac{\pi}{M}}{\sqrt{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\nu}}} \right] \quad (M \geq 2) \quad (6)$$

$\alpha$ ; 평균 반송파 대 잡음비 (CNR)  
 $\nu$ ; 평균 반송파 대 noise jamming 비 (CJR).

일정 진폭 tone jamming 신호와 잡음에 의한 에러는 그림 3의 페이저도에서 합성신호가 판정레벨을 넘어 에러 영역으로 들어갈때 발생한다 [5].

$$PE_t = \text{prob.} (N \cos \xi + J \cos \phi < -dw/2) \quad (7)$$

식(7)을 정리하면 오율식이 다음과 같이 유도된다.

$$PE_t = \text{erfc} \left[ \sqrt{\alpha} \sin \frac{\pi}{M} \right] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ \alpha \left( -\sin^2 \frac{\pi}{M} \right) \right] \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left( \sqrt{\alpha} \sin \frac{\pi}{M} \right) \frac{1}{(k!)^2} \left( \frac{\alpha}{4\beta} \right)^k \quad (M \geq 2) \quad (8)$$

단,  $\beta$ : 반송파대 일정 진폭 tone jamming 신호비  
 $H_{2k-1}(\cdot)$ : 에르미트 (Hermit) 다항식.

m 분포 tone jamming 신호에 대한 오율은 식(8)에서의 진폭 J에 대해 식(5)의 m 분포 확률 밀도 함수를 이용하여 평균을 취하여 정리하면 다음과 같이 구해진다[6].

$$PE_m = \text{erfc} \left[ \sqrt{\alpha} \sin \frac{\pi}{M} \right] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ \alpha \left( -\sin^2 \frac{\pi}{M} \right) \right] \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left( \sqrt{\alpha} \sin \frac{\pi}{M} \right) \cdot \frac{\Gamma(m+k)}{\Gamma^2(k+1) \Gamma(m)} \cdot \frac{1}{(4m)^k} \left( \frac{\alpha}{\gamma} \right)^k \quad (9)$$

단,  $\gamma$ : 반송파대 m 분포 tone jamming 신호비.

2) MSK 시스템

가우스 잡음만에 의한 오율식에서 식(2), (3)의 확률 밀도 함수를 이용하여 noise jamming 신호와 잡음에 의한 오율식을 구할 수 있는데 다음과 같다.

$$PE_n = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\pi}{4 \sqrt{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}}} \right] \quad (M \geq 2) \quad (10)$$

식(7)에서와 같은 방법으로 tone jamming에 대한 MSK 신호의 오율식을 구하면 다음과 같다.

$$PE_t = \operatorname{prob.} \left[ \frac{S}{2} + \frac{2}{\pi} N \cos \xi + \frac{2}{\pi} J \cos \phi < 0 \right]$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{4} \right] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ -\frac{\pi^2 \alpha}{16} \right]$$

$$\cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left[ \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{4} \right] \cdot \frac{1}{(k!)^2} \left( \frac{\alpha}{4\beta} \right)^k \quad (M \geq 2) \quad (11)$$

식(9)에서와 마찬가지로 식(5)의 m 분포 확률 밀도 함수를 이용하여 m 분포 tone jamming 신호와 잡음에 의한 오율식을 구하면 다음과 같다.

$$PE_m = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{4} \right] + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ -\frac{\pi^2 \alpha}{16} \right]$$

$$\cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left[ \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{4} \right] \cdot \frac{\Gamma(m+k)}{\Gamma^2(k+1)\Gamma(m)} \cdot \frac{1}{(4m)^k} \left( \frac{\alpha}{\gamma} \right)^k \quad (12)$$

3) QAM 시스템

noise jamming 신호와 잡음에 의한 오율식은, 16, 64, 256QAM 각각의 평균 전력이 다르기 때문에 평균 방송파에 잡음 전력비를 서로 다르게 잡아 주어야 한다. 이들을 고려하여 오율식을 구하면 다음과 같다.

$$PE_n = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\pi}{4 \sqrt{k \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right)}} \right] \quad (13)$$

단, k값은 16, 64, 256 QAM인 경우 각각 10, 32, 170 이다.

M 치 QAM에 있어서는 각 부호점의 위치에 따라 인접 부호점의 수가 다르므로 부호 오율도 달라지게 된다. 그리고 1-ch 과 Q-ch에서의 중복에러를 제외한 최종 오율식은

$$PE_n = \left[ \frac{4(M - \sqrt{M})}{M} \cdot PE_n \right]$$

$$- \frac{1}{4} \left[ \frac{4(M - \sqrt{M})}{M} \cdot PE_n \right]^2 \quad (14)$$

식(7)에서와 같은 방법으로 tone jamming에 의한 QAM 신호의 오율식은 다음과 같다.

$$PE_t = \operatorname{prob.} (N \cos \xi + J \cos \phi > d_M/2)$$

$$= \frac{4(M - \sqrt{M})}{M} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\sqrt{2} S}{2 \sqrt{\gamma} (\sqrt{M} - 1)} \right] \right]$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ -\left( \frac{\sqrt{2} S}{2 \sqrt{\gamma} (\sqrt{M} - 1)} \right)^2 \right] \cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left[ \frac{\sqrt{2} S}{2 \sqrt{\gamma} (\sqrt{M} - 1)} \right]$$

$$+ \frac{1}{(k!)^2} \left[ \frac{\sqrt{2} S}{2 \sqrt{\gamma} (\sqrt{M} - 1)} \right]^{2k} \quad (15)$$

단, S는 신호전력, σ는 잡음전력.

따라서 중복에러를 제외한 최종 오율식은

$$PE_t = PE_t - \frac{1}{4} PE_t^2 \quad (16)$$

식(9)에서와 같이 식(5)의 m 분포 확률 밀도함수와 식(15)을 이용하여 16, 64, 256 QAM일때의 오율식을 구하면 다음과 같다.

$$PE_m = \frac{4(M - \sqrt{M})}{M} \left[ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha}) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\alpha) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} H_{2k-1} \left( \frac{\Gamma(m+k)}{\Gamma^2(k+1)\Gamma(m)} \cdot \frac{1}{(4m)^k} (\alpha)^k \right) \right] \quad (17)$$

단, 위 식에서의 계수 a, b, c는 표 1과 같다.

표 1. 식(17)의 a, b, c 값

parameter system	a	b	c
16 QAM	α/10	√2/3	9α/5γ
64 QAM	α/42	√2/7	7α/3γ
256 QAM	α/170	√2/15	45α/17γ

그러고 최종적인 평균 오율식은 다음과 같다.

$$PE_m = PE_m - \frac{1}{4} PE_m^2 \quad (18)$$

4. 검토 및 결론

여러가지 디지털 통신 시스템이 여러형태의 jamming으로 부터 어떤 영향을 받을까를 살펴보고자 오율식을 유도한 후 수치계산을 행하여 그 결과를 그래프로 나타내고 비교, 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 반 Gaussian jamming (m = 1/2) 일 때의 성능을 분석해보면 JCR이 -20dB 이하에서는 MSK, 4 PSK, 8 PSK, 16 QAM 순으로 성능의 열화되나, -20dB 이상에서는 MSK 보다 4 PSK 방식이 성능이 더 좋음을 알수 있었다. (그림 4 참조)
- 2) Rayleigh jamming (m = 1)인 경우에는 JCR이 12dB 이상에서는 4 PSK 방식이, -12dB 이하에서는 MSK 방식이 양호하고, 이들 방식에 비해서 8 PSK 방식과 16 QAM 방식은 성능이 크게 열화됨을 알 수 있었다. (그림 5 참조)
- 3) 일반적으로, tone jamming 신호보다는 noise jamming 신호에 의한 영향이 크나 CJR을 증가시키면 noise jamming 신호가 tone jamming 신호 보다 성능의 개선 정도가 커진다. (그림 6 참조)
- 4) tone jamming 신호라 할지라도 일정진폭 tone jamming 신호 보다 m 분포 tone jamming 신호가 더욱 시스템을 열화시키는데, m 값이 작을 수록 즉, jamming 신호의 진폭의 변화가 심하면 심할 수록 성능의 열화가 크다.

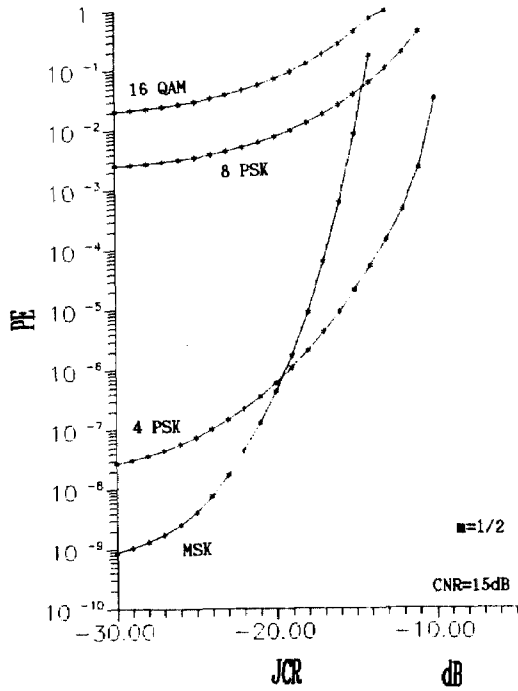


그림 4. 반 gaussian tone jamming 환경하에서의 각 디지털 통신 시스템의 오율 특성

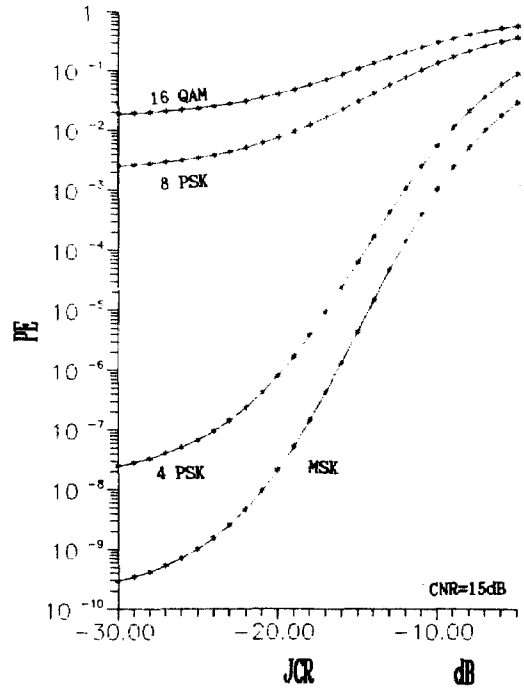


그림 6. noise jamming 환경하에서의 각 디지털 통신 시스템의 오율 특성

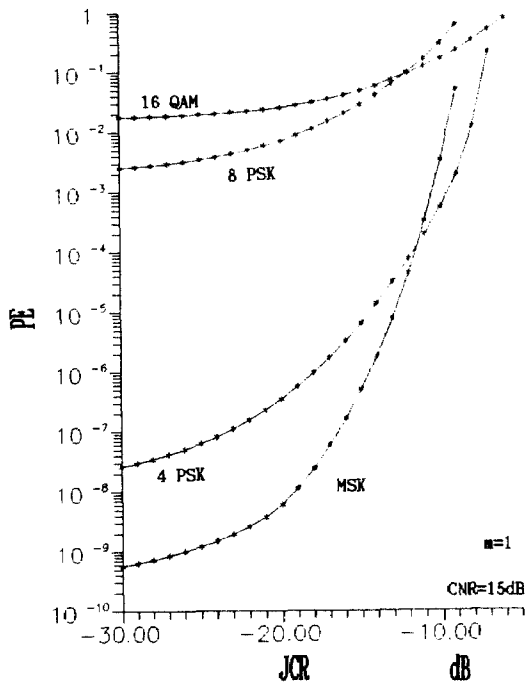


그림 5. m = 1 - 본포 tone jamming 환경 하에서의 각 디지털 통신 시스템의 오율 특성

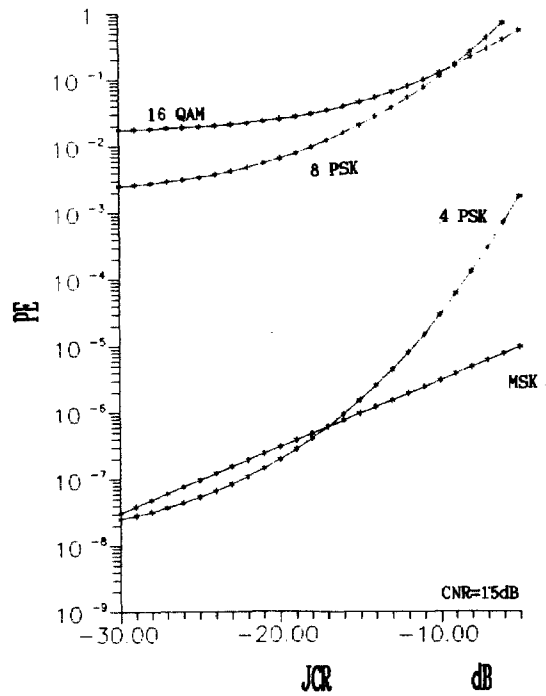


그림 7. 일정 진폭 tone jamming 환경 하에서의 각 디지털 통신 시스템의 오율 특성

참 고 문 헌

- [1] 조 성준 역, 디지털 마이크로파 통신, 대광문화사, 1989.
- [2] 김 송신, 조 성준, "제한 디지털 통신 시스템에 미치는 의도적인 방해전파의 영향," 한국항공대학 대학원 석사 학위 논문, 1988.2.
- [3] D.J.Torrieri, *Principles of secure communication systems*, Washington: Artech house, 1985.
- [4] M.Nagakami, *The m-distribution-ageneral formula of intensity distribution of rapid fading, statistical methods in radio wave propagation*, W.C.Hoffman. Ed, New York: pergamon Press, 1960.
- [5] 김 송신, 조 성준, "각 디지털 변조 방식에 미치는 jamming 의 영향," 한국통신학회 추계학술발표논문집, pp. 212-218, 1987년 5월.
- [6] W.Magnus, F.Oberhettinger, R.P.Soni, *Formulas and theorems for the special functions of mathematical physics*, 3'rd ed., New York: Springer-Verlag, 1966.