

가우스성 잡음과 임펄스성 잡음이 혼재하는 다중
전파 페이딩 전송로상에서의 제반 디지털 통신
시스템 특성의 종합분석 및 비교에 관한
연구(제 2 부)

正會員 金 鉉 哲* 正會員 高 鳳 震* 正會員 孔 炳 玉* 正會員 趙 成 俊*

(Comprehensive Performance Analysis and
Comparison of various Digital Communication
Systems in an Multipath Fading Channel with
additive Mixture of Gaussian and Impulsive
Noise [Part-2])

Hyun Cheol KIM*, Bong Jin KO*, Byung Ock KONG*,

Sung Joon CHO* *Regular Members*

要 約 본 논문에서는 본 논문의 제 1 부에서 다룬 디지털 통신시스템인 ASK, QAM, CPSK, DPSK, FSK 및 MSK 시스템이 가우스성잡음 및 임펄스성잡음만이 아니라 페이딩으로부터 영향을 받았을 때의 오율에 관한 식을 유도하여 반송파전력 대 잡음전력의 비(CNR), 임펄스지수 및 임펄스성 잡음전력 대 가우스성 잡음전력 비 뿐만 아니라 페이딩 지수 등을 함수로 하여 각각의 시스템의 성능을 구하고 이를 비교하였다. 해석결과, 제 1 부의 결과와는 달리 신호가 강한 페이딩을 받았을 때는 임펄스성 잡음의 영향보다 가우스성잡음의 영향이 크다는 것을 알 수 있었고 시스템의 비교에서는 약한 페이딩에서나 강한 페이딩 모두에 있어서 위상변조시스템의 성능이 가장 양호하다는 것을 확인할 수 있었다.

*韓國航空大學大學院 航空電子工學科
Dept. of Avionics Engineering, Graduate School
of Hankuk Aviation University.

論文番號 : 89-27 (接受 1989. 3. 31)

ABSTRACT In this paper, the error rate equations of digitally modulated signals transmitted through the channel which is not only Gaussian / Impulsive noise but also multi-path fading have been derived. Using the derived equations for the error probabilities of ASK, QAM, CPSK, DPSK, FSK, and MSK signals, the error rate performances of digital modulation systems have been evaluated and represented in the graphs as the functions of CNR, Impulsive index, the ratio of Gaussian noise power component to Impulsive noise power component, and fading figures.

The results show that, in the deep fading environment, the error is occurred more frequently by Gaussian noise than Impulsive noise. And the comparison of various systems certifies that PSK is superior to the other systems in the deep fading or shallow fading environment.

I. 서 론

제1부에서 다룬 제반 잡음환경⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾ 뿐만 아니라 무선통신의 경우 회선의 특성상 신호는 다중로를 거치게 되며 이로 인하여 간섭성페이딩 현상이 일어난다. 이와같은 페이딩현상은 잡음과 함께 시스템의 주요 열화의 요인이 되고 있으며⁽⁸⁾⁻⁽¹²⁾ 많은 연구자들의 연구대상이 되어 왔다.

특히 이동체 통신에서는 종래의 아날로그 통신을 이용하던 선박통신이나 항공통신에서도 데이터의 전송이 요구되어 점차 디지털화 되어 가고 있으며 보급이 급증하고 있는 자동차에 탑재되는 자동차 전화에서도 디지털화의 연구가 세계적으로 진행되고 있다.⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁵⁾ 더우기 이러한 이동체 통신의 경우에는 가장 영향이 큰 것이 페이딩 현상이며 또한 열악한 임펄스성 잡음환경의 전송로를 거치게 되므로 이에 대한 종합적인 해석과 비교가 필요하다.

이와 같은 시점에서 제1부에서 다룬 잡음환경에 덧붙여서 페이딩의 영향을 받는 각종 디지털 변조 신호의 특성이 어떻게 변하는가를 종합적으로 분석하고 검토, 비교하여 최적 시스템의 선택 및 운용자료를 얻고자 한다.

본 논문에서는 가우스성 잡음과 임펄스성 잡음을 종합적으로 다루는 잡음모델을 도입하여 해석한 제1부의 내용에 덧붙여서 페이딩의 강약에 따라 대표적인 디지털 통신 시스템이 어떠한 영향을 받는가를 연구, 검토하여 비교, 판단할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

제1부에서 제시한 디지털 변조방식(ASK, QAM, CPSK, DPSK, FSK 및 MSK)을 선택하여^{(13), (16)} 이들이 가우스성 / 임펄스성 잡음과 페이딩

의 종합적인 환경하에서 제반 디지털 통신 시스템의 열화특성에 대해 해석하고, 분석 검토 및 비교를 행한다.

이를 위해 제1부에서 다룬 각종 디지털 변조 신호가 잡음환경을 거치고 페이딩의 영향을 받아 최종 수신기에서 검출된다고 가정하여 이에 대한 오율식을 유도한 후, 반송파전력 대 잡음전력 비(CNR), 임펄스 지수, 임펄스성 잡음전력에 대한 가우스성 잡음전력의 비 및 페이딩 지수 등을 함수로 하여 컴퓨터에 의해 수치 계산한 후 그 결과를 그래프로 나타내어 이를 기반으로 페이딩 환경하에서 각 시스템에서 성능을 비교, 검토한다.

II. 해석모델

본 논문에서는 제1부에서 다룬 잡음환경에 덧붙여서 다중 전파로 페이딩이 제반 디지털통신시스템에 미치는 영향을 고찰하기 위해 그림1과 같은 일반적인 해석모델을 설정한다. 여기서는 전송로상에서의 영향만을 고려하므로 각 통신시스템의 송수신기는 동기가 완전하고 각 여파기는 이상적이며 제반 검출기도 이상적으로 동작한다고 가정한다. 또한 페이딩 채널은 다중로 페이딩 특성을 해석하는 m-분포 페이딩 채널로 가정한다.^{(9)-(12), (14), (15)}

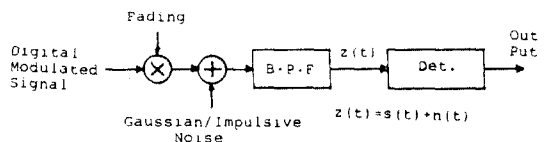


그림 1. 일반적인 해석모델
Generalized analysis model.

II-1. 제반 디지털 변조신호

본 논문에서 취급할 디지털 변조신호는 본 논문 제1부의 내용과 같다.^{(7), (17)-(24)}

II-2. 다중 전파로 페이딩 환경

전파가 전파하는 공간의상태가 변화하면 수신전력이 감소하고 전송 특성에 변화가 생겨서 무선중계방식의 회선품질이 열화한다.

본 논문에서는 페이딩 세기의 정도를 나타낼 수 있는 나카가미(仲上)교수의 m-분포 페이딩 모델을 도입한다. 이 분포식은 HF대로부터 가시거리 마이크로파대에 걸친 무선통신에 잘 적용된다는 것이 실험적으로 증명되어 있다.⁽⁹⁾

m-분포 페이딩을 받은 신호의 포락선 S의 확률밀도함수 p(S)는 다음 식과 같다.⁽⁹⁾

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

단, $\Gamma(\cdot)$: 감마 함수,

$\frac{\Omega}{2}$: 평균 반송파 전력,

$\Omega = \bar{S}^2$: 페이딩을 받은 신호의 평균전력,

m: 페이딩지수(m=1일 때는 레일리 페이딩에 해당).

그림2는 페이딩 지수를 변수로 하여 나타낸 m-분포곡선이다. m=1인 경우는 레일리 페이딩의 경우와 같고 $1/2 < m < 1$ 인 경우는 페이딩이 매우 강한 상태를 나타낸다. m=∞일 때는 페이딩이 없는 경우에 해당한다.

III. 오류 특성 해석

신호가 페이딩을 받게 되면 수신신호의 강도가 시간에 따라 변화한다. 이때 수신신호의 진폭 S의 확률밀도 함수는 m-분포를 하게 된다. 따라서 이때의 오류식은 P_{EF} 는 잡음만에 의한 오류 P_E 를 S에 관하여 평균을 취하면 구할 수 있다.

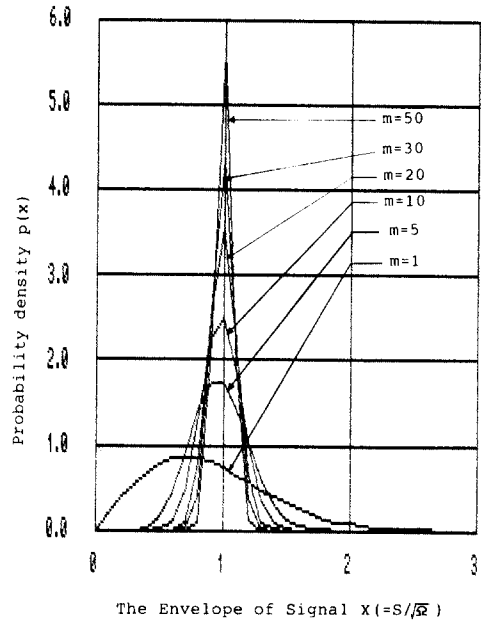


그림 2. m-분포 m-distribution.

$$P_{EF} = \int_0^{\infty} p(S) P_E dS \quad (2)$$

III-1. 2L-레벨 ASK 시스템의 특성

III-1-1. 가우스성 잡음의 영향

신호가 페이딩을 받을 경우 각 부호점에 해당하는 신호는 각 부호점을 중심으로 하여 신호의 크기가 m-분포를 한다. 이에 대한 영향을 받는 ASK 신호에 대해 그림3에 나타냈다.

본 해석에 있어서는 신호가 페이딩을 받았을 때 L번째 부호점에 대한 신호 S_L 의 평균진폭 $\sqrt{\Omega_L}$ 이 페이딩이 없었을 때의 L번째 부호점의 신호진폭과 같을 경우를 가정한다.

그림3과 식(2)를 이용하여 L번째 부호점의 부호오율을 구하면 다음과 같이 된다.⁽¹⁵⁾

$$P_{EGFI} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\frac{|S_L - A_L|}{\sqrt{2} \sigma_c}\right) \frac{2m^m S_L^{2m-1}}{\Gamma(m) (A_L + d)^{2m}}$$

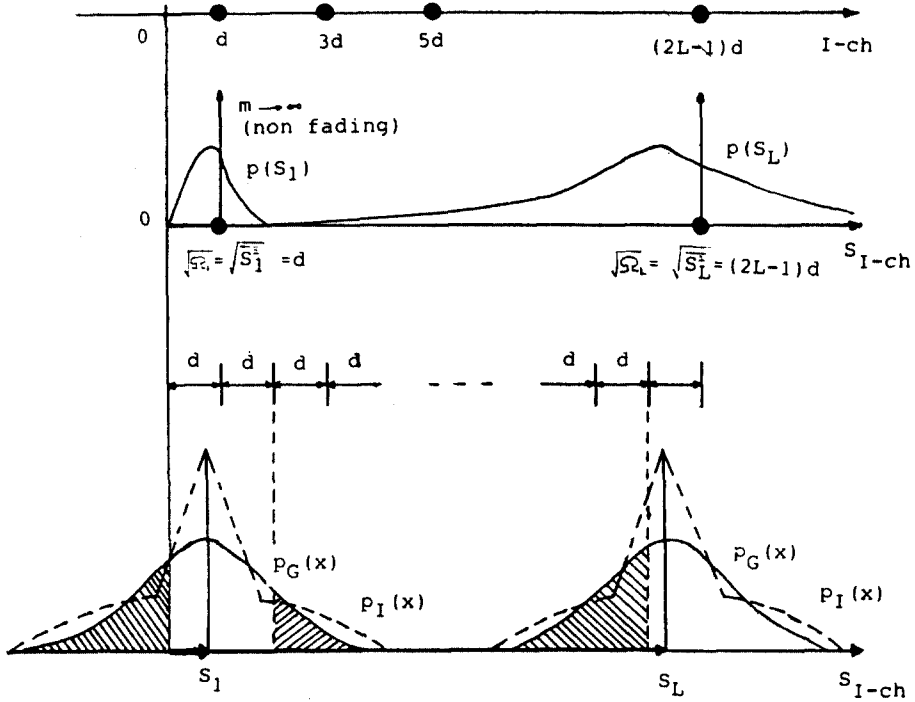


그림 3. 페이딩과 잡음의 영향을 받은 2L-레벨 ASK 신호
2L-level ASK signal influenced by fading and noise.

$$\exp\left(-\frac{mS_L^2}{(A_L+d)^2}\right)dS_L + \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc}\left(\frac{|(A_L+2d)-S_L|}{\sqrt{2}\sigma_c}\right) \frac{2m^m S_L^{2m-1}}{\Gamma(m)(A_L+d)^{2m}} \cdot \exp\left(-\frac{mS_L^2}{(A_L+d)^2}\right)dS_L. \quad (3)$$

여기서 $A_L = (2L-1)d - d$ 이다.

일반적으로 $\operatorname{erfc}(x)$ 에서 x 는 음수이나 양수의 그 어느값을 가질 수 있으나 본 해석에 있어서의 오율 P_{EGFL} 은 페이딩을 받은 신호가 원래의 부호점 좌우에 설정된 기준의 판정레벨을 넘어갈 확률 즉, 가우스 pdf의 tail 면적에 해당되므로 $\operatorname{erfc}(x)$ 의 값으로 양수의 값만을 취했다.

단, 최외각 부호점은 인접부호점이 있는 안쪽의

한 방향으로만 에러가 발생한다. 각 부호점에 대한 오율의 합을 구하여 전체 부호점의 수로 나누면 2L-레벨 ASK 신호의 평균부호 오율 $P_{EGF(ASK)}$ 는

$$P_{EGF(ASK)} = \frac{1}{L} \sum_L P_{EGFL}. \quad (4)$$

4-레벨 ASK의 경우는 위 식에서 $L=2$ 인 경우로서 다음과 같이 된다.⁽¹⁵⁾

$$P_{EGF(4ASK)} = \frac{1}{4} \int_0^\infty \left\{ \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_c}{5}}R_1\right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \cdot \exp(-mR_1^2) dR_1 \right\} + \left\{ \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_c}{5}}|2-R_1|\right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \right.$$

$$\cdot \exp(-mz_1^2) dR_1 \} + \left\{ \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\rho_G}{5}} |3R_2 - 2| \right) \cdot \frac{2m^m R_2^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mZ_2^2) dR_2 \right\} \quad (5)$$

단, $\rho_G (= \frac{5d^2}{2\sigma_G^2})$: 평균 반송파전력 대 잡음전력의

비,
 $R_1 = \frac{S_1}{d}, R_2 = \frac{S_2}{3d}.$

III-1-2. 임펄스성 잡음의 영향

식(5)를 이용하여 제1부에서와 같은 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{\text{EIF(ASK)}} = \frac{e^{-A}}{4} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \int_0^{\infty} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\rho_1}{5\sigma_j^2}} R_1 \right) \cdot \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_1^2) dR_1 \right. \\ \left. + \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\rho_1}{5\sigma_j^2}} |2 - R_1| \right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \cdot \exp(-mR_1^2) dR_1 \right\} + \left\{ \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\rho_1}{5\sigma_j^2}} |3R_2 - 2| \right) \cdot \frac{2m^m R_2^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_2^2) dR_2 \right\} \quad (6)$$

단, $\rho_1 (= \frac{5d^2}{2W})$: 평균 반송파전력 대 잡음전력의

비,
 $R_1 = \frac{S_1}{d}, R_2 = \frac{S_2}{3d}.$

III-2. N-ary QAM 시스템의 특성

III-2-1. 가우스성 잡음의 영향

신호가 페이딩을 받을 경우 신호 크기의 변동폭이 각 부호점에 따라 달라지게 되는데 이를 그림 4에 나타냈다. 그림4에서 페이딩을 받은 각 부호점의 부호 오류율 $P_{\text{EF}}(X, Y)$ 라고 표시하면 이는 I-ch에서의 부호오류율 $P_{\text{EF}}(X)$ 와 Q-ch에서의 부호오류

$P_{\text{EF}}(Y)$ 의 합으로 나타낼 수 있는데 $P_{\text{EF}}(X)$ 와 $P_{\text{EF}}(Y)$ 는 동일한 형태가 되므로 ASK의 해석과 같다.

$$P_{\text{EGF}}(X) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left(\frac{|S_X - A_X|}{\sqrt{2}\sigma_G} \right) \cdot \frac{2m^m S_X^{2m-1}}{\Gamma(m) (A_X + d)^{2m}} \exp \left(-\frac{mS_X^2}{(A_X + d)^2} \right) dS_X \\ + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left(\frac{|(A_X + 2d) - S_X|}{\sqrt{2}\sigma_G} \right) \cdot \frac{2m^m S_X^{2m-1}}{\Gamma(m) (A_X + d)^{2m}} \exp \left(-\frac{mS_X^2}{(A_X + d)^2} \right) dS_X \quad (7)$$

최외각 부호점 $X (= \frac{\sqrt{N}}{2})$ 의 오류율 $P_{\text{EGF}}(\frac{\sqrt{N}}{2})$ 은 식 (8)과 같다.⁴⁵⁾

$$P_{\text{EGF}} \left(\frac{\sqrt{N}}{2} \right) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left(\frac{|S_{\sqrt{N}/2} - A_{\sqrt{N}/2}|}{\sqrt{2}\sigma_G} \right) \cdot \frac{2m^m S^{2m-1}}{\Gamma(m) (A_{\sqrt{N}/2} + d)^{2m}} \cdot \exp \left(-\frac{mS_{\sqrt{N}/2}^2}{(A_{\sqrt{N}/2} + d)^2} \right) dS_{\sqrt{N}/2} \quad (8)$$

N-ary QAM 신호는 부호점의 위치에 따라 에러 발생 방향의 수가 다르므로 전체부호점에 대한 최종 평균 오류율 $P_{\text{EGF(QAM)}}$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{\text{EGF(QAM)}} = \frac{4}{N} \left\{ \sum_{x=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}-1} \sum_{y=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}-1} P_{\text{EGF}}(X, Y) + \sum_{x=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}-1} P_{\text{EGF}} \left(X, \frac{\sqrt{N}}{2} \right) + \sum_{y=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}-1} P_{\text{EGF}} \left(\frac{\sqrt{N}}{2}, Y \right) + P_{\text{EGF}} \left(\frac{\sqrt{N}}{2}, \frac{\sqrt{N}}{2} \right) \right\} \quad (9)$$

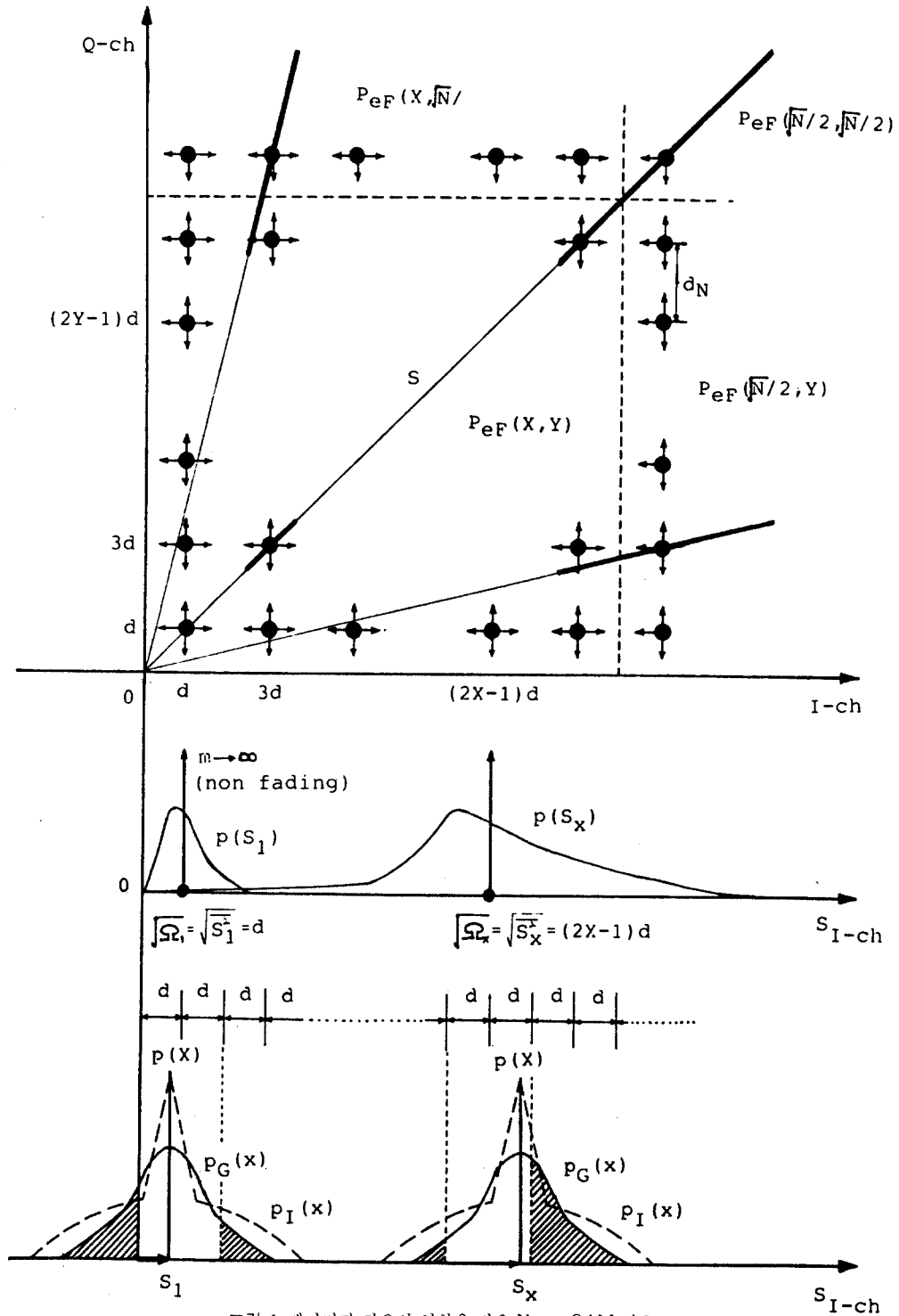


그림 4. 페이딩과 잡음의 영향을 받은 N-ary QAM 신호
N-ary QAM signal influenced by fading and noise.

$P_{eGF}(X, Y) = P_{eGF}(X) + P_{eGF}(Y)$ 가 되고 같은 X 나 Y 값에 대해서는 $P_{eGF}(X) = P_{eGF}(Y)$ 가 되므로 식(9)는 다음과 같이 된다.

$$P_{eGF(16QAM)} = \frac{4\sqrt{N}}{N} \left[\sum_{x=1}^{\frac{\sqrt{N}}{2}-1} P_{eGF}(X) + P_{eGF}\left(\frac{\sqrt{N}}{2}\right) \right] \quad (10)$$

예로서 $N=16$ 인 경우 즉, 16 QAM의 평균오율은 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$P_{eGF(16QAM)} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_G}{10}} R_1\right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \cdot \exp(-mR_1^2) dR_1 \right. \\ \left. + \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_G}{10}} |2-R_1|\right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_1^2) dR_1 \right. \\ \left. + \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_G}{10}} |3R_2-2|\right) \frac{2m^m R_2^{2m-1}}{\Gamma(m)} \cdot \exp(-mR_2^2) dR_2 \right] \quad (11)$$

단, $\rho_G (= \frac{5d^2}{\sigma_G^2})$; 평균 반송파전력 대 잡음전력의

$$\text{비, } R_1 = \frac{S_1}{d}, R_2 = \frac{S_2}{3d}$$

III-2-2. 임펄스성 잡음의 영향

식(11)로부터 앞에서와 같은 방법을 이용하면 임펄스성 잡음과 페이딩하에서의 오율은 다음과 같이 구해진다.

$$P_{EIF(16QAM)} = \frac{e^{-A}}{2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \int_0^\infty \left[\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_I}{10\sigma_I^2}} R_1\right) \cdot \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_1^2) dR_1 \right. \\ \left. + \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_I}{10\sigma_I^2}} |2-R_1|\right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_1^2) dR_1 \right. \\ \left. + \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_I}{10\sigma_I^2}} |3R_2-2|\right) \frac{2m^m R_2^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_2^2) dR_2 \right] \quad (12)$$

$$\left. + \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_I}{10\sigma_I^2}} |2-R_1|\right) \frac{2m^m R_1^{2m-1}}{\Gamma(m)} \cdot \exp(-mR_1^2) dR_1 \right. \\ \left. + \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\rho_I}{10\sigma_I^2}} |3R_2-2|\right) \frac{2m^m R_2^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp(-mR_2^2) dR_2 \right] \quad (12)$$

단, $\rho_{IF} (= \frac{5d^2}{W})$; 평균 반송파전력 대 잡음전력의

$$\text{비, } R_1 = \frac{S_1}{d}, R_2 = \frac{S_2}{3d}$$

III-3. M-ary CPSK 시스템의 특성

III-3-1. 가우스성 잡음의 영향

M-ary CPSK 시스템에 있어서 신호가 페이딩을 받는 경우의 오율식은 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$P_{eGF(CPSK)} = \int_0^\infty p(S) P_{eG(CPSK)} dS \\ = \int_0^\infty \frac{2m^m S^{2m-1}}{\Gamma(m) \Omega^m} \exp\left(-\frac{mS^2}{\Omega}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{S}{\sqrt{2}\sigma_G} \sin \frac{\pi}{M}\right) dS \quad (13)$$

식(13)을 부록의 식(2)-(4)를 이용하여 적분을 풀면 다음과 같이 된다.

$$P_{eGF(CPSK)} = 1 - \frac{\sqrt{4 \sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{GF}} \Gamma(m + \frac{1}{2})}{\pi m \Gamma(m)} \\ \cdot \left(1 + \frac{\sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{GF}}{m}\right)^{-(m+\frac{1}{2})} \\ \cdot {}_2F_1\left(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{GF}}{m + \sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{GF}}\right) \quad (14)$$

단, $\rho_{GF} (= \frac{P}{\sigma_G^2} = \frac{\Omega}{2\sigma_G^2})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비

$$\cdot {}_2F_1\left(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\sin^2 \rho_{GF}}{m + \sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{GF}}\right). \quad (17)$$

III-3-2. 임펄스성 잡음의 영향

식(14)로부터 곧바로 다음과 같이 구해진다.

$$P_{EIF(CPSK)} = e^{-A} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \left[1 - \sqrt{\frac{4 \sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{IF}}{\pi m \sigma_j^2}} \right] \cdot \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \left(1 + \frac{\sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{IF}}{m \sigma_j^2} \right)^{-(m + \frac{1}{2})} \cdot {}_2F_1\left(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{IF}}{m \sigma_j^2 + \sin^2 \frac{\pi}{M} \rho_{IF}}\right). \quad (15)$$

단, $\rho_{IF} (= \frac{P_T}{W} = \frac{\Omega}{2W})$; 평균 반송전파전력 대 잡음 전력의 비

III-4. M-ary DPSK 시스템의 특성

III-4-1. 가우스성 잡음의 영향

제1부에서 구한 DPSK 시스템의 오류식과 식(1) 및 식(2)를 이용하여 풀면 페이딩과 가우스잡음하의 오류식을 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$P_{EGF(BDPSK)} = \frac{1}{2(1 + \frac{\rho_{GF}}{m})^m} \quad (16)$$

$$P_{EGF(MDPSK)} = 1 - \frac{\sqrt{4 \sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{GF}}}{\pi m} \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \cdot \left(1 + \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{GF}}{m} \right)^{-(m + \frac{1}{2})}$$

단, $\rho_{GF} (= \frac{P}{\sigma_G^2} = \frac{\Omega}{2\sigma_G^2})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비.

III-4-2. 임펄스성 잡음의 영향

식(16) 및 식(17)을 이용하여 앞에서와 같은 방법으로 풀면 다음과 같이 구해진다.

$$P_{EIF(BDPSK)} = \frac{e^{-A}}{2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \frac{1}{(1 + \frac{\rho_{IF}}{m \sigma_j^2})^m} \quad (18)$$

$$P_{EIF(MDPSK)} = e^{-A} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \left[1 - \sqrt{\frac{4 \sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{IF}}{\pi m \sigma_j^2}} \right] \cdot \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \left(1 + \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{IF}}{m \sigma_j^2} \right)^{-(m + \frac{1}{2})} \cdot {}_2F_1\left(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{IF}}{m \sigma_j^2 + \sin^2 \frac{\pi}{2M} \rho_{IF}}\right). \quad (19)$$

단, $\rho_{IF} (= \frac{P}{W} = \frac{\Omega}{2W})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비.

III-5. FSK 시스템의 특성

III-5-1. 가우스성 잡음의 영향

제1부에서 구한 오류식과 식(1) 및 식(2)를 이용하여 적분을 풀면 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$P_{EGF(FSK)} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho_{GF}}{2\pi m}} \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} (1 + \frac{\rho_{IF}}{2m})^{-(m + \frac{1}{2})}$$

$$\cdot {}_2F_1(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\rho_{GF}}{2m + \rho_{IF}}) \quad (20)$$

단, $\rho_{GF} (= \frac{P}{\sigma_G^2} = \frac{\Omega}{2\sigma_G^2})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비.

III-5-2. 임펄스성 잡음의 영향

식(20)으로부터 곧바로 다음과 같이 얻어진다.

$$P_{EIF(FSK)} = \frac{e^{-A}}{2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \left[1 - \sqrt{\frac{2\rho_{IF}}{\pi m \sigma_I^2}} \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right.$$

$$\cdot \left(1 + \frac{\rho_{IF}}{2m \sigma_I^2} \right)^{-(m + \frac{1}{2})}$$

$$\left. \cdot {}_2F_1(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\rho_{IF}}{2m \sigma_I^2 + \rho_{IF}}) \right] \quad (21)$$

단, $\rho_{IF} (= \frac{P}{W} = \frac{\Omega}{2W})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비.

III-6. MSK 시스템의 특성

제1의 오율식과 식(1) 및 식(2)를 이용하면 다음과 같이 페이딩 및 잡음환경하에서 MSK 시스템의 오율식을 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$P_{EGF(MSK)} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \rho_{GF}}{16m}} \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)}$$

$$\cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \rho_{GF}}{16m} \right)^{-(m + \frac{1}{2})}$$

$$\cdot {}_2F_1(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\pi^2 \rho_{GF}}{16m + \pi^2 \rho_{GF}}) \quad (22)$$

단, $\rho_{GF} (= \frac{P}{\sigma_G^2} = \frac{\Omega}{2\sigma_G^2})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비

III-6-2 임펄스성 잡음의 영향

식(22)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{EIF(MSK)} = \frac{e^{-A}}{2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j}{j!} \left[1 - \sqrt{\frac{\pi \rho_{IF}}{4m \sigma_I^2}} \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \right.$$

$$\left. \left(1 + \frac{\pi^2 \rho_{IF}}{6m \sigma_I^2} \right)^{-(m + \frac{1}{2})} \cdot {}_2F_1(1, m + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{\pi^2 \rho_{IF}}{16m \sigma_I^2 + \pi^2 \rho_{IF}}) \right] \quad (23)$$

단, $\rho_{IF} (= \frac{P}{W} = \frac{\Omega}{2W})$; 평균 반송파전력 대 잡음 전력의 비.

IV. 수치계산 및 검토

제III장에서 구한 오율식에 의해 반송파 대 잡음 전력의 비(CNR), 임펄스지수(A), 가우스성잡음 대 임펄스성잡음 전력의 비(Γ) 및 페이딩지수(m) 등을 함수로 하여 수치 계산한 결과를 그림5~그림12에 시스템별로 나타냈다.

그림5와 그림6은 m-분포 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음과 A=0.1이고 $\Gamma=0.1$ 인 임펄스성잡음의 영향을 받았을 경우의 4-레벨 ASK 신호의 오율특성을 m을 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 그림5 및 그림6에서와 동일한 환경하에서의 16 QAM 신호의 오율특성을 그림7 및 그림8에 보였다.

m-분포 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음과 A=0.01이고 $\Gamma=0.001$ 인 임펄스성잡음의 영향을 받았을 경우 m=1, 5 일때 4상 CPSK 신호의 오율특성을 그림9에, 4상 DPSK 신호의 오율특성을 그림10에, FSK 신호의 오율특성을 그림11에, MSK 신호의 오율특성을 그림12에 각각 나타냈

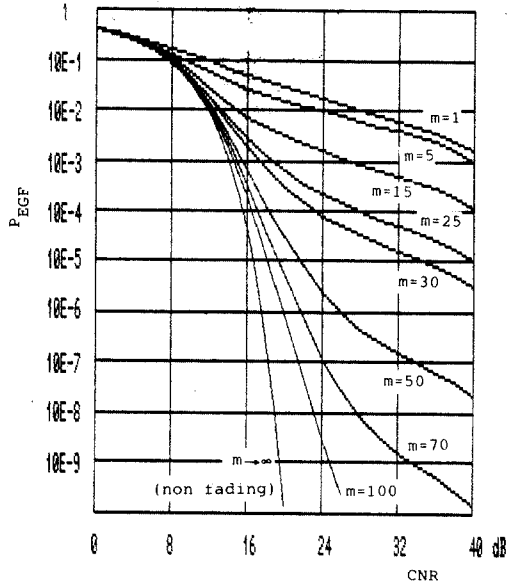


그림 5. 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음의 영향을 받는 4-레벨 ASK 신호의 오율특성
Error rate characteristic of 4-level ASK signal influenced by Gaussian noise in fading channel.

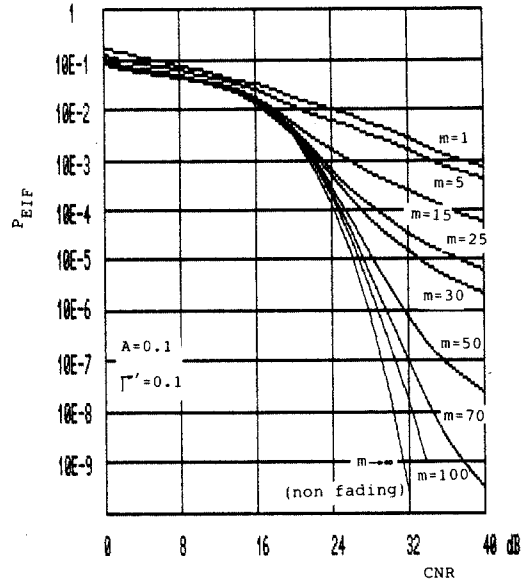


그림 6. 페이딩 채널상에서 임펄스성 잡음의 영향을 받는 4-레벨 ASK 신호의 오율특성
Error rate characteristic of 4-level ASK signal influenced by Impulsive noise in fading channel.

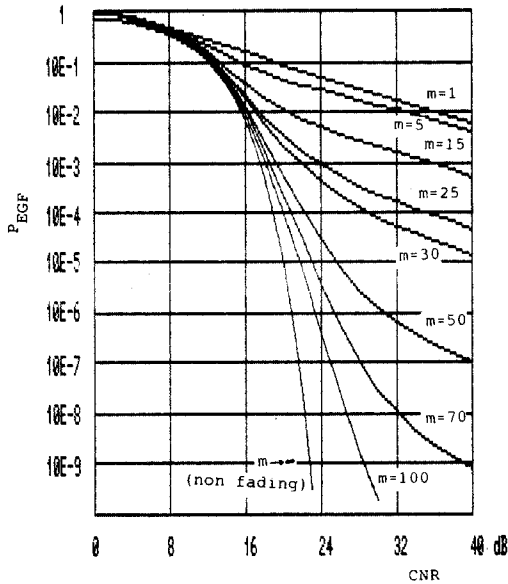


그림 7. 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음의 영향을 받는 16 QAM 신호의 오율특성
Error rate characteristic of 16 QAM signal influenced by Gaussian noise in fading channel.

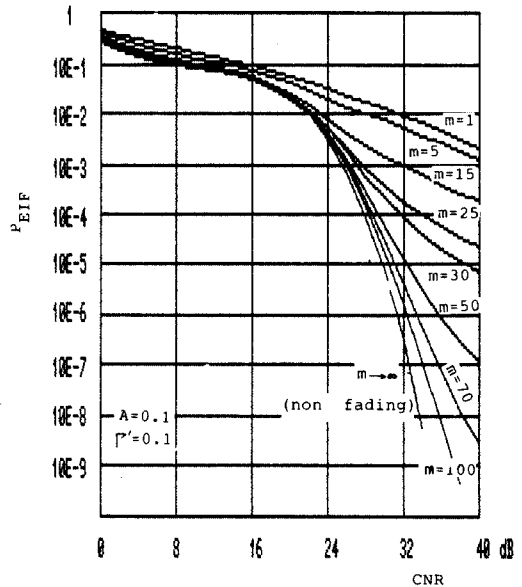


그림 8. 페이딩 채널상에서 임펄스성 잡음의 영향을 받는 16 QAM 신호의 오율특성
Error rate characteristic of 16 QAM signal influenced by Impulsive noise in fading channel.

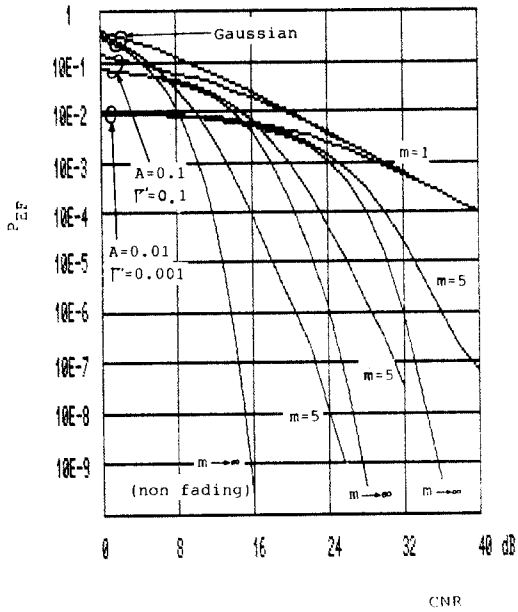


그림 9. 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음과 임펄스성 잡음의 영향을 받는 4상 CPSK 신호의 오율특성
Error rate characteristic of 4-ary CPSK signal influenced by Gaussian / Impulsive noise in fading channel.

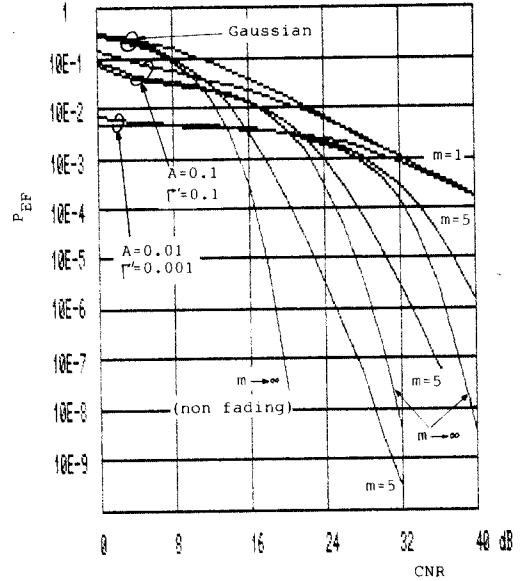


그림 10. 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음과 임펄스성 잡음의 영향을 받는 4상 DPSK 신호의 오율특성
Error rate characteristic of 4-ary DPSK signal influenced by Gaussian / Impulsive noise in fading channel.

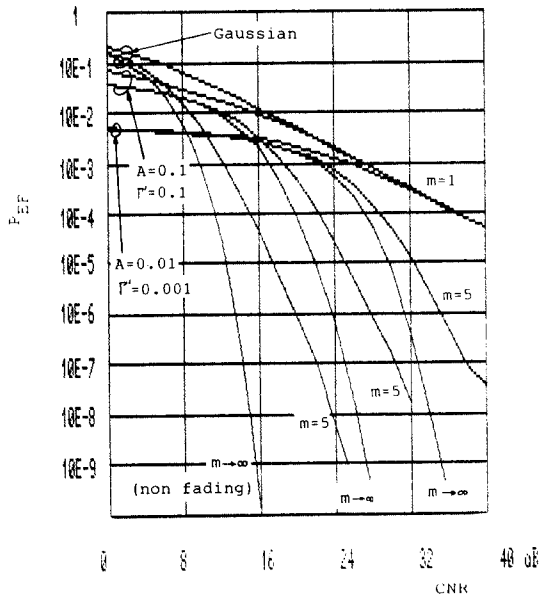


그림 11. 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음과 임펄스성 잡음의 영향을 받는 FSK 신호의 오율특성
Error rate characteristic of FSK signal influenced by Gaussian / Impulsive noise in fading channel.

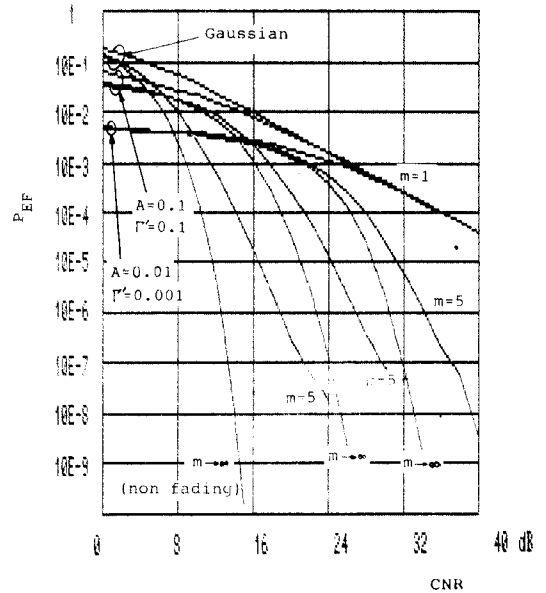


그림 12. 페이딩 채널상에서 가우스성 잡음과 임펄스성 잡음의 영향을 받는 MSK 신호의 오율특성
Error rate characteristic of MSK signal influenced by Gaussian / Impulsive noise in fading channel.

다.

신호가 레일리 페이딩($m=1$ 인 경우)을 받을 경우에는 CNR이 높은 곳에서도 가우스성 잡음에 의한 오율특성이 임펄스성 잡음에 의한 오율 특성보다 더욱 열화된다. 그러므로 신호가 강한 페이딩을 받게 되면 에러는 주로 가우스성 잡음에 의해 발생된다고 할 수 있다. 그러나 페이딩이 점차 약해짐에 따라(즉, m 의 값이 커짐에 따라) 가우스성 잡음에 의한 영향은 크게 줄어드는 반면 임펄스성 잡음에 의한 영향은 그대로 남는다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 본 논문의 제1부에서 다룬 잡음 환경에 덧붙여 페이딩까지를 고려한 종합환경하에서 2L-레벨 ASK, N-ary QAM, M-ary CPSK, M-ary DPSK, FSK 및 MSK 시스템의 성능을 오율의 관점에서 고찰하였다.

먼저 다중로 페이딩 현상의 특성을 고찰하고 제1부에서 구한 오율식을 이용하여 페이딩채널이 부가된 환경하에서의 오율식을 구한 후 수치계산한 결과를 그래프로 나타내고 각각의 성능을 비교, 검토한 결과 다음과 같은 점을 확인할 수 있었다.

1. 페이딩의 영향이 작을 때, 가우스성 잡음에 의해 영향은 CNR이 증가하면 쉽게 감소하지만 잡음이 강한 임펄스성을 떨수록 CNR이 증가해도 오율이 크게 개선되지 않는다.
2. 강한 페이딩 환경하에서의 에러는 주로 가우스성 잡음에 의해 발생하나, 페이딩이 약해짐에 따라 가우스성 잡음의 영향이 크게 줄어드는 반면 임펄스성 잡음의 영향은 그대로 남아 시스템의 성능을 저하시킨다.
3. 페이딩의 영향을 작게 받는 시스템은 2차 전송의 경우 위상변조방식, 주파수변조방식, 진폭 변조방식 순이다.

감사의 말씀

이 논문은 1987년도 한국과학재단의 기초연구(일반연구)비에 의해 수행된 연구의 결과입니다. 연구비를 지원하여 주신 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

부 록*

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt \quad (1)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2x}{\sqrt{\pi}} {}_1F_1\left(\frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -x^2\right) \quad (2)$$

$${}_1F_1\left(K+1; \frac{3}{2}; -x^2\right) = e^{-x^2} {}_1F_1\left(\frac{1}{2}-K; \frac{3}{2}; x^2\right) \quad (3)$$

$$g(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$$

$$f(t) = t^{a-1} {}_mF_n(a_1, \dots, a_m; b_1, \dots, b_n; \lambda t)$$

$$g(t) = \Gamma(\sigma) P^{-a} {}_{m+1}F_n(a_1, \dots, a_m, \sigma; b_1, \dots, b_n; \lambda/P) \quad (4)$$

*W. Magnus, F. Oberhettinger, R.P. Soni, "Formulas and theorems for the special functions of mathematical physics," 3rd ed., New York: Springer-Verlag, 1966.

참 고 문 헌

참고문헌 번호는 제 1부에서와 같음.

1. Theodore Brening, "Data transmission for mobile radio," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. VT-27, no. 3, pp. 77-85, Aug. 1978.

2. K. Feher, V.K. Prabhu, "Digital communication by radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-27, no. 12, Dec 1979.
3. A.D. Spaulding, D.Middleton, "Optimum reception in impulsive interference environment-Part I: Coherent detection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, no. 9, Sep. 1977.
4. 조성준, 공병욱, "임펄스성 잡음(상), (하)," 무선 제8호, pp. 24-27, 1983년 6월. 무선 제9호, pp. 33-38, 1983년 9월, 한국무선종사자협회.
5. D.Middleton, "Statistical models of electromagnetic interference," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-19, no. 3, pp. 106-127, Aug. 1977.
6. K. Feher, "Digital modulation techniques and interference environment," Gainville, VA: Don white consultant, 1977.
7. 조성준, 공병욱, "전자간섭환경하에서 임펄스성 랜덤잡음이 디지털변조 방식에 미치는 영향," 한국통신학회 논문지, 제10권 제1호, pp. 17-30. 1985년 2월.
8. W.C Jakes, ed., "Microwave mobile communications," New York: John Wiley, 1974.
9. M. Nakagami, "The m-distribution-A general formula of intensity distribution of rapid fading," in *Statistical Methods in Radio Waves Propagation*, W.C. Hoffman ed., New York: Pergamon Press, 1960.
10. R. Maciejko, "Digital modulation in Rayleigh fading in the presence of cochannel interference and noise," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-29, no. 9, pp. 1379-1386, Sep. 1981.
11. Richard C. French, "The effect of fading and shadowing on channel reuse in mobile radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-28, no. 3, pp. 171-181. Aug, 1979.
12. 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.
13. J.D. Oetting, "A comparison of modulation techniques for digital radio," *IEEE Trans. Commun.* vol. COM-27, no. 12, pp. 1752-1758, Dec. 1979.
14. 김현철, 조성준, "가우스성 / 비가우스성 잡음과 페이딩 환경하에서의 제반 디지털 통신방식의 오율특성," 한국통신학회 춘계학술발표집, pp. 223-229, 1987년 5월.
15. 김현철, 조성준, "N-ary QAM 시스템에 미치는 가우스성 / 임펄스성 잡음과 페이딩의 영향분석," 대한전자공학회 추계학술 발표집, pp. 40-43, 1987년 11월.
16. B. Sklar, "A structured overview of digital communications," *IEEE Commun. Magazine*, Aug. 1983.
17. K. Miyauchi, S. Seki, H. Ishio, "New technique for generating and detecting multilevel signal formats," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-24, no. 2, pp. 263-267, Feb. 1976.
18. 조성준, "16 QAM(직교 진폭 변조) 디지털 마이크로파 통신방식," 무선 제19호, pp. 37-41. 1986년 3월.
19. K. Kohiyama, S. Komaki, "64 / 256 QAM digital microwave radio," *IEECE of Japan*, vol. 68, pp. 889-895, Oct. 1985.
20. B.O. Kong S.J. Cho, "PSK error performance with impulsive noise and cochannel interference," 대한전자공학회논문지 제20권1호, pp. 55-62, 1983년 1월.
21. S.J. Cho, N. Morinaga, T. Namekawa, "M-ary DPSK error performance with noise and interference," 대한전자공학회논문지 제16권5호, pp. 12-17. 1979년 10월.
22. W.P. Osborne, "Coherent and noncoherent detection of CPFASK," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-22, no. 8, pp. 1023-1036, Aug. 1974.
23. 손승완, 공병욱, 조성준, "이동체 통신에 미치는 제반 간섭잡음의 해석," 한국통신학회논문지제10권3호, pp. 135-146. 1985년 6월.
24. Rodger E. Ziemer and Carl R.Ryan, "Minimum-shift keyed modem implementation for high data rates," *IEEE Commun., Mag.*, Oct. 1983.
25. A. Papouois, "Probability, random variables, and stochastic process," New York: McGraw-Hill, 1968.

※ 저자 소개는 본 논문지에 함께 실린 본 연구 제 1부를 보십시오.