

# M진 위상 천이 변조 심볼 오류 확률의 간단한 하한식

## Simple Lower Bound for MPSK Symbol Error Probability

윤 동 원

Dong-Weon Yoon

### 요 약

이 논문에서는 동기 MPSK 신호에 대하여 새로운 간단한 심볼 오류 확률 하한식을 유도하고 분석한다. 보통 심볼 오류 확률 유도는 먼저 덧셈꼴 백색 정규잡음(AWGN) 환경에서 유도하고 이에 대한 결과를 바탕으로 여러 페이딩 환경에서의 심볼 오류 확률을 구하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 동기 MPSK의 경우는 여러 페이딩 환경에서의 오류 확률 식이 구해져 있으나 가장 기본이 되는 덧셈꼴 백색 정규 잡음 환경에서는 정확히 closed-form으로 유도하지 못하는 것으로 알려져 있다. 여기서는 먼저 나카가미 페이딩 환경에서 동기 MPSK 신호의 심볼 오류 확률식을 이용하여 나카가미 페이딩 지수가 무한대로 감에 따라 페이딩이 없는 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널로 돌아가는 성질을 이용하여 새로운 근사식을 유도하고 분석한다.

### Abstract

The symbol error probability for the coherent detection of MPSK signals in additive white Gaussian noise(AWGN) can be evaluated exactly for  $M = 2$  and  $M = 4$ . The MPSK symbol error probability bounds obtained in the past are simple to calculate, but not accurate. More recently, very tight bounds have been proposed, but they are complex to calculate.

In this paper to obtain a simple and accurate lower bound for coherent MPSK symbol error probability in AWGN, we consider the symbol error probability for MPSK in Nakagami fading case first. Then as the Nakagami fading index  $m$  approaches to infinity, we obtain the symbol error probability for the MPSK in AWGN.

### I. 서 론

오늘날 빠른 속도로 변화해 가는 디지털 이동통신 분야에서 현재 풀 수 없는 과제로 남아 있는 것 중 하나가 덧셈꼴 백색 정규 잡음 환경에서 동기 MPSK 신호에 대한 정확한 심볼 오류 확률을 구하는 것이다. 디지털 통신에서 성능 평가에 가장 주된 척도가 되는 것이 오류 확률이다. 보통 심볼 오류 확률 유도는 먼저 덧셈꼴 백색 정규 잡음 환경에서 유도하고 이에 대한 결과를 바탕으로 여러 페이딩 환

경에서의 심볼 오류 확률을 구하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 동기 MPSK의 경우는 여러 페이딩 환경에서의 오류 확률식이 구하여져 있으나<sup>[1],[2]</sup> 가장 기본이 되는 덧셈꼴 백색 정규 잡음 환경에서는  $M$ 이 2일 때와  $M$ 이 4일 때만 정확한 식으로 구해지며 나머지  $M$ 진 신호에 대하여는 closed-form으로 구할 수 없다고 알려져 있다. 이와 관련하여 여러 근사식과 상한, 하한에 대한 연구가 진행되어왔다<sup>[3]~[5]</sup>. 이제까지의 결과들을 살펴보면 정확성을 높이기 위하여는 무한 급수 형태 등 복잡하게 전개되

대전대학교 정보통신공학과(Dept. of Information & Communication Eng., Taejon Univ.)

· 논문 번호 : 990917-079

· 수정완료일자 : 1999년 12월 28일

어 실제 계산상에 많은 시간이 소요되며<sup>[4],[5]</sup>, 간단한 근사식들의 경우 계산은 간단하나 어느 정도의 오차를 수반하게 된다<sup>[3]</sup>.

이 논문에서는 동기 MPSK 신호에 대하여 새로운 형태의 간단한 오류 확률 하한식을 유도하고 분석한다. 먼저 나카가미 페이딩 환경에서 동기 MPSK 신호의 심볼 오류 확률 식으로부터 나카가미 페이딩 지수가 무한대로 감에 따라 페이딩이 없는 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널로 돌아가는 성질을 이용하여 새로운 근사식을 구한다.

## II. MPSK 신호 심볼 오류 확률 해석 모델

덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널 환경에서 위상의 흔들림으로 일어나는 위상의 확률 밀도 함수는 다음과 같다<sup>[6],[7]</sup>.

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi} [e^{-k\gamma + \sqrt{4\pi k\gamma} \cos \theta} e^{-k\gamma \sin^2 \theta} - \sqrt{\pi k\gamma} \cos \theta e^{-k\gamma \sin^2 \theta} \operatorname{erfc}(\sqrt{k\gamma} \cos \theta)] \quad (1)$$

여기서  $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 는 상보 오차 함수이며,<sup>[8]</sup>  $\gamma$ 는 비트당 신호대 잡음비, 그리고  $k = \log_2 M$ 으로 심볼당 비트수이다. 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널에서 동기 MPSK 신호의 평균 심볼 오류 확률은 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[6],[7]</sup>.

$$P(M) = 1 - \int_{-\frac{\pi}{M}}^{\frac{\pi}{M}} f(\theta) d\theta \quad (2)$$

일반적으로 식 (2)는  $M=2$ 일 때와  $M=4$ 일 때를 제외하고는 closed-form으로 나타낼 수 없다고 알려져 있다. 이 논문에서는 식 (2)의 간단한 하한식을 유도하고 분석한다. 나카가미 페이딩 채널에서의 오류 확률 식을 이용하여 페이딩 지수가 무한대로 감에 따라 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널의 오류 확률 식으로 돌아가는 성질을 이용하여 근사식을 유도한다. 나카가미 페이딩 채널에서 동기 MPSK 신호의 평균 심볼 오류 확률은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

$$P_n(M) = P_{n1}(M) - P_{n2}(M) \quad (3)$$

여기서

$$P_{n1}(M) = A(m) \frac{\alpha}{(\alpha^2 + m)^{1/2}} \left( \frac{m}{\alpha^2 + m} \right)^m \cdot {}_2F_1\left(1, m + \frac{1}{2}; m + 1; \frac{m}{\alpha^2 + m}\right) \quad (4)$$

$$P_{n2}(M) = A(m) \frac{m}{\pi} \left( \frac{m}{k\gamma_0 + m} \right)^m \cdot \int_0^1 \frac{t^{m-1} v(t)}{\sqrt{1-t}} \tan^{-1}\left(v(t) \tan \frac{\pi}{M}\right) dt \quad (5)$$

이며  $\alpha^2 = k\gamma_0 \sin^2 \frac{\pi}{M}$ ,

$$v(t) = \sqrt{\frac{(k\gamma_0 + m)(1-t)}{k\gamma_0 + m(1-t)}}$$

$$A(m) = \frac{\Gamma(2m)}{2^{2m-1} \Gamma(m) \Gamma(m+1)}$$

이고  ${}_2F_1(\cdot)$ 는 초기하 함수로 다음과 같이 정의된다<sup>[8]</sup>.

$${}_2F_1(a, b, c, x) = \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma(a+n)\Gamma(b+n)}{\Gamma(c+n)} \frac{x^n}{n!} \quad (6)$$

$\gamma_0$ 는 나카가미 페이딩 채널에서 비트당 평균 신호대 잡음비이며 이것은 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널에서는  $\gamma$ 와 같다. 식 (6)을 이용하여 식 (4)를 다시 쓰면

$$P_{n1}(M) = B(m) \frac{\alpha}{(\alpha^2 + m)^{1/2}} \left( \frac{m}{\alpha^2 + m} \right)^m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} C(m, n) \left( \frac{m}{\alpha^2 + m} \right)^n \quad (7)$$

이 되며 여기서

$$B(m) = \frac{\Gamma(2m)}{2^{2m-1} \Gamma(m) \Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)},$$

$$C(m, n) = \frac{\Gamma\left(m + n + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma(m + n + 1)}$$

이다. 나카가미 페이딩 지수  $m$ 이 무한대로 감에 따라 페이딩 환경에서의 심볼 오류 확률 식 (3)은 페이딩이 없는 상태의 덧셈꼴 백색 정규 잡음에서의 심볼 오류 확률 식 (2)가 되므로 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_n(M) &= \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n1}(M) - \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M) \\ &= P(M) \end{aligned} \quad (8)$$

2-1  $\lim_{m \rightarrow \infty} P_{n1}(M)$ 의 결정

$M=2$ 일 때 식 (5)는 다음 관계식을<sup>[8]</sup> 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(b)\Gamma(c-b)} \int_0^1 t^{b-1}(1-t)^{c-b-1} \cdot \\ (1-xt)^{-a} dt = {}_2F_1(a, b, c, x) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (5)는

$$P_{n2}(2) = \frac{1}{2} P_{n1}(2) \quad (10)$$

이 되며 식 (10)과 식 (3)을 이용하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$P_n(2) = \frac{1}{2} P_{n1}(2) \quad (11)$$

식 (11)과 식 (8)을 이용하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있으며 이는 잘 알려진 BPSK의 오류 확률 식과 같아야 하므로

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_n(2) &= \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{2} P_{n1}(2) \\ &= P(2) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (12)$$

가 된다. 식 (7)과 식 (12)을 이용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n1}(2) &= e^{-\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} B(m) \frac{\sqrt{\gamma}}{(\gamma+m)^{1/2}} \cdot \\ \sum_{n=0}^{\infty} C(m, n) \left( \frac{m}{\gamma+m} \right)^n &= \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (13)$$

이 되며 이는 항등식이므로 식 (13)으로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n1}(M) &= e^{-k\gamma \sin^2 \frac{\pi}{M}} \lim_{m \rightarrow \infty} B(m) \cdot \\ \frac{\sqrt{k\gamma \sin \frac{\pi}{M}}}{\left( k\gamma \sin^2 \frac{\pi}{M} + m \right)^{1/2}} \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} C(m, n) \left( \frac{m}{k\gamma \sin^2 \frac{\pi}{M} + m} \right)^n \cdot \\ = \operatorname{erfc} \left( \sqrt{k\gamma \sin \frac{\pi}{M}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)를 식 (8)에 대입하면

$$\begin{aligned} P(M) &= \lim_{m \rightarrow \infty} P_n(M) = \operatorname{erfc} \left( \sqrt{k\gamma \sin \frac{\pi}{M}} \right) \\ &- \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M) \end{aligned} \quad (15)$$

가 된다.

2-2  $\lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M)$ 의 결정

$M=2$  일 때 식 (15)는

$$\begin{aligned} P(2) &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) = \lim_{m \rightarrow \infty} P_n(2) \\ &= \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) - \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(2) \end{aligned} \quad (16)$$

이 되며 식 (5)와 식 (16)을 이용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(2) &= e^{-\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \\ \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(\gamma+m)(1-t)}{\gamma+m(1-t)}} \cdot \\ \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(\gamma+m)(1-t)}{\gamma+m(1-t)}} \tan \frac{\pi}{2} \right) dt \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (17)$$

을 얻는다.  $M=4$ 일 때, 식 (15)는 잘 알려진 QPSK의 오류 확률 식이며 이를 이용하면

$$\begin{aligned} P(4) &= \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \left[ 1 - \frac{1}{4} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) \right] \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} P_n(4) = \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}) - \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(4) \end{aligned} \quad (18)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 식 (5)와 식 (18)을 이용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(4) &= e^{-2\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \\ \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(2\gamma+m)(1-t)}{2\gamma+m(1-t)}} \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{(2\gamma+m)(1-t)}{2\gamma+m(1-t)}} \tan \frac{\pi}{4}\right) dt \\ &= \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2(\sqrt{\gamma}) \end{aligned} \quad (19)$$

가 된다. 이는 항등식이므로 식 (19)로부터 우리는 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & e^{-k\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \\ & \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} \cdot \\ & \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} \tan \frac{\pi}{4}\right) dt \\ &= \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{k\gamma}{2}}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

그러나 식 (17)과 식 (19)의 결과만으로는  $\lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M)$ 의 정확한 값을 구할 수 없다. 따라서  $\lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M)$ 의 계산에는 근사식을 사용한다.

$$\tan^{-1}\left(v(t) \tan \frac{\pi}{M}\right) \leq \frac{\pi}{M} \quad (21)$$

의 관계가 성립하므로 식 (19)와 식 (21)을 이용하면

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(4) &= e^{-2\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \\ & \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(2\gamma+m)(1-t)}{2\gamma+m(1-t)}} \cdot \\ & \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{(2\gamma+m)(1-t)}{2\gamma+m(1-t)}} \tan \frac{\pi}{4}\right) dt \\ &= \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2(\sqrt{\gamma}) \\ &\leq e^{-2\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \cdot \\ & \sqrt{\frac{(2\gamma+m)(1-t)}{2\gamma+m(1-t)}} dt \end{aligned} \quad (22)$$

식 (20)과 식 (22)를 이용하면

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{k\gamma}{2}}\right) &\leq e^{-k\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \frac{\pi}{4} \\ & \cdot \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} dt \end{aligned} \quad (23)$$

이 되며 식 (23)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{k\gamma}{2}}\right) &\leq e^{-k\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \\ & \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} dt \end{aligned} \quad (24)$$

가 된다. 한편 식 (21)과 식 (5)를 이용하면

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M) &= e^{-k\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \cdot \\ & \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} \cdot \\ & \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} \tan \frac{\pi}{M}\right) dt \\ &\leq e^{-k\gamma} \lim_{m \rightarrow \infty} A(m) \frac{m}{\pi} \\ & \cdot \frac{\pi}{M} \int_0^1 \frac{t^{m-1}}{\sqrt{1-t}} \sqrt{\frac{(k\gamma+m)(1-t)}{k\gamma+m(1-t)}} dt \end{aligned} \quad (25)$$

가 된다. 그런데

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M) > \lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(2M) \quad (26)$$

의 관계가 성립하며 식 (24)는  $M=4$ 인 경우에서 유도된 것이므로 이러한 성질들을 고려하여야 한다.  $M$ 이 8 이상인 경우에 식 (24)와 (26)을 고려하여 식 (25)를 정리하면

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P_{n2}(M) < \frac{1}{M} \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{k\gamma}{2}}\right) \quad (27)$$

이 된다.

### III. 결과 및 검토

최종적으로 식 (8), (14) 그리고 (27)로부터 덧셈 풀 백색 정규 잡음 채널에서 동기 MPSK 신호의 심볼 오류 확률,  $P(M)$ 의 간단한 하한식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} P(M) &= \lim_{m \rightarrow \infty} P_n(M) > \operatorname{erfc}\left(\sqrt{k\gamma} \sin \frac{\pi}{M}\right) \\ & - \frac{1}{M} \operatorname{erfc}^2\left(\sqrt{\frac{k\gamma}{2}}\right) \end{aligned} \quad (28)$$

이 근사식은  $M$ 이 4이상 일 때 성립하며  $M=4$ 일 때는 정확한 QPSK의 심볼 오류 확률이 된다.  $M$ 이 매우 크고, 높은 신호대 잡음비에 대하여 식 (28)의

두 번째항은 첫 번째 항에 비하여 무시될 수 있으므로 이 경우 다음과 같은 잘 알려진 근사식을 얻을 수 있다<sup>[6],[7]</sup>.

$$P(M) \approx \operatorname{erfc} \left( \sqrt{k\gamma} \sin \frac{\pi}{M} \right) \quad (29)$$

표 1에는  $M$ 이 8일 때 8-PSK에 대하여 신호대 잡음비에 따른 심볼 오류 확률을 식 (2)로부터 구한 것과 식 (28)로부터 구한 것, 그리고 참고문헌 [3]에서 유도한 간단한 근사식과 비교하여 나타내었다. 참고문헌 [3]의 근사식은 다음과 같다.

$$P(M) > \operatorname{erfc} \left( \sqrt{k\gamma} \sin \frac{\pi}{M} \right) - \frac{\tan \left( \frac{\pi}{M} \right)}{2\pi k\gamma} \exp(-k\gamma) \quad (30)$$

표 1로부터 이 논문에서 구한 식 (28)이 [3]에서의 근사식 (30)보다 신호대 잡음비가 4dB 이하에서 실제값에 더 가까움을 볼 수 있다. 신호대 잡음비가 높아질수록 (28)과 (30) 모두 두 번째항이 첫 번째항에 비하여 매우 작아지므로 무시되어 식 (29)로 표현될 수 있으므로 같은 결과식이 나오며 이는 식 (2)에서 구한 실제값과도 일치한다.

#### IV. 결 론

이 논문에서는 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널에서 동기 MPSK 신호 심볼 오류 확률의 간단한 하한식

을 유도하였다. 먼저 나카가미 채널 환경에서의 심볼 오류 확률을 이용하여 이로부터 페이딩 지수  $m$ 을 무한대로 근접시켜 페이딩이 없는 상태, 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널에서의 심볼 오류 확률을 구하는 새로운 방법을 시도하였다.

이 논문에서 유도한 근사식은 신호대 잡음비가 4 dB 이하에서 기존에 유도된 간단한 근사식보다 정확도가 뛰어난 것을 확인하였다. 신호대 잡음비가 높아질수록 식 (28)과 (30) 모두 둘째 항이 첫째 항보다 매우 작아짐으로 둘째 항이 무시되어 식 (29)로 표현될 수 있으므로 같은 결과 식이 나오게 된다.

앞으로 이 논문에서의 해석 방법 등을 이용하여 덧셈꼴 백색 정규 잡음 채널에서 동기 MPSK 신호의 정확한 오류 확률 식을 구하려는 노력이 계속되어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. K. Paww and D. L. Schilling, "Probability of error for M-ary PSK and DPSK on a Rayleigh fading channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 36, pp. 755-756, June, 1988.
- [2] V. Aalo, and S. Pattaramalai, "Average error rate for coherent MPSK signals in Nakagami fading channels," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1538-1539, Aug., 1996
- [3] V. K. Prabhu and J. Salz, "On the per-

표 1. 덧셈꼴 백색 정규 잡음에서 8-PSK의 심볼 오류 확률  
Table 1. Symbol Error Probability for 8-PSK in AWGN.

비트당 신호대 잡음비 (dB)	식 (2)로 구한 실제값	식 (28)로 구한 근사값	식 (30)으로 구한 근사값
0	3.47801 E-1	3.47697 E-1	3.47469 E-1
1	2.92616 E-1	2.92574 E-1	2.92512 E-1
2	2.37872 E-1	2.37857 E-1	2.37846 E-1
3	1.85453 E-1	1.85449 E-1	1.85448 E-1
4	1.37369 E-1	1.373683 E-1	1.373682 E-1
5	9.55297 E-2	9.55294 E-2	9.55294 E-2
:	:	:	:
10	3.03419 E-3	3.03419 E-3	3.03419 E-3

formance of phase-shift keying systems”, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 60, pp. 2307-2343, Dec., 1969.

[4] C. M. Chie, “Bounds and approximations for rapid evaluation of coherent MPSK error probabilities,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, pp. 271-273, Mar., 1985.

[5] J. J. Komo and K. D. Barnett, “Improved bounds for coherent M-ary PSK symbol error

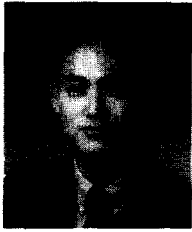
probability”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 46, pp. 396-399, May, 1997.

[6] R. W. Lucky, J. Salz and E. J. Weldon Jr., *Principle of Data Communication*, McGraw-Hill, 1968.

[7] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 1995.

[8] I. S. Gradshteyn, and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*, Academic, 1980.

### 윤 동 원



1966년 1월 22일 생  
 1989년: 한양대학교 전자통신공학과(공학사)  
 1992년: 한양대학교 전자통신공학과(공학석사)  
 1995년: 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)

1995년 3월~1997년 8월: 동서대학교 정보통신공학과 전임강사  
 1997년 9월~현재: 대전대학교 정보통신공학과 조교수  
 [주 관심분야] 디지털 통신, 확산대역통신, 이동통신