

디지털 위성통신시스템에서 위상 잡음으로 인한 성능 손실 예측

Prediction of Performance Loss Due to Phase Noise in Digital Satellite Communication System

김 영 완 · 박 동 철*

Young-Wan Kim · Dong-Chul Park*

요 약

본 논문에서는 PSK 변조 신호에 대한 위상 잡음 성능 특성을 무한 급수로 전개하여 위상 잡음 분포 함수인 Tikhonov 함수와 Gaussian 함수에 대한 오율 특성을 평가하였으며, 위상 잡음에 의한 성능 손실 분석을 통하여 Tikhonov 함수와 Gaussian 함수에 의한 위상 잡음 영향이 일치하는 복원 반송파 신호대 잡음비 범위를 고찰하였다. 그리고, 주파수 변조 신호의 변조 지수와 위상 잡음의 상관 정의에 의해 $1/f^2$ 특성을 갖는 위상 잡음 신호를 발생하였으며, 발생한 위상 잡음 신호를 디지털 위성통신시스템 수신기에 적용하여 측정된 위상 잡음에 의한 성능 손실과 위상 잡음 분포 함수에 의해 분석된 성능 열화를 평가하였다.

Abstract

Based on the alternating series expansion of error probability function due to phase noise in PSK systems, the performance evaluations for Tikhonov and Gaussian probability density functions were performed in this paper. The range of the signal-to-noise ratio of recovered carrier signal which provides the same dependency between the error performances by Tikhonov function and Gaussian function was analyzed via loss evaluation due to phase noise. The phase noise with $1/f^2$ characteristic was generated based on the relationship of the phase noise spectral density and the modulation index for frequency modulation signal. Using the generated phase noise as the input signal for digital satellite communication receiver, the performance losses due to the phase noise were measured and evaluated with the analyzed performance characteristics.

Key words : Phase Noise, Phase Noise Distribution Function, Digital Satellite Communication System, Phase Noise Effect

I. 서 론

PSK 신호는 반송파 복원 회로에 의해 복원된 반송파 신호를 사용하여 복조된다. 복원된 반송파 신호는 시스템의 주파수 신호원에서 발생한 위상 잡음과 전송 링크상에서 발생한 백색 잡음에 의해 영향을 받는다. 즉, 위상 잡음의 영향을 받는 반송파

위상 신호는 전송 신호의 열화 요인으로 작용한다^{[1],[2]}. 이러한, 위상 잡음에 의한 성능 평가는 위상 잡음에 대한 조건 오율 함수(conditional probability of error)를 구하여 위상 잡음의 분포 함수에 따라 평균 오율 특성(average probability of error)으로 구함으로써 수행될 수 있다.

반송파 복원 회로에서 위상 잡음의 분포 함수로

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20020315-037

· 수정완료일자 : 2002년 6월 7일

는 Tikhonov pdf (probability density function) 또는 Gaussian pdf 함수를 사용하고 있으며^{[3],[4]}, Tikhonov 함수는 1차 PLL 회로를 적용한 시스템에서 주로 이용되어지고 있으나, 2차 PLL 회로를 적용한 시스템에 대한 영향 분석에서도 적용되고도 있다^[5]. 또한, 반송파 복원 회로를 선형적으로 해석하여 위상 잡음 분포를 Gaussian pdf 함수로 적용하여 평균 오율 특성을 구하기도 하며, Tikhonov 함수 또는 Gaussian 함수를 적용한 위상 잡음에 의한 영향 분석들은 적분형의 평균 오율 함수를 이용하여 발표되고 있다^{[6],[7]}. 이러한, 위상 잡음 분포 함수들의 성능 손실은 반송파 복원 회로의 신호대 잡음비에 따라 다르게 나타난다. 즉, 수신 신호의 신호대 잡음비에 따라 Gaussian pdf 함수와 Tikhonov pdf 함수를 적용한 위상 잡음 영향이 다르게 나타나므로, 위상 잡음 분포 함수들의 영향도를 각각 분석 평가하여 위상 잡음에 의한 성능 손실을 예측할 수 있도록 하여야 한다.

본 논문에서는 PSK 시스템의 위상 잡음에 의한 Tikhonov 함수와 Gaussian 함수에 대한 적분 형태의 오율 특성을 무한 급수로 전개하여 비교적 간단한 계산 구조로 유도하였으며, 유도된 PSK 변조 방식의 오율 특성에 의해 위상 잡음 분포 함수들에 대한 영향도를 분석하였다. 분석된 결과는 위상 잡음에 의해 발생하는 디지털 위성통신 수신기의 성능 손실을 측정하여 비교 분석되었으며, 이를 통하여 분석된 결과의 타당성을 평가하였다. 위상 잡음은 주파수 변조 신호의 변조 지수와의 상호 관계에 의해 정의되며, 넓은 주파수 영역의 잡음 발생을 위하여 백색 잡음원을 이용하였으며, 이로부터 발생하는 $1/f^2$ 분포의 위상 잡음을 갖는 신호가 발생되었다. 발생한 위상 잡음은 디지털 위성통신시스템 수신기에 인가되어 위상 잡음에 의한 성능 손실이 측정되도록 하였다. 또한, 분석 과정을 통하여 복원 반송파 신호대 잡음비에 따라 두 분포 함수에 의한 영향이 거의 일치하는 범위를 고찰하였으며, 이와 같은 특성은 위상 잡음에 의한 열화가 비교적 작게 설계되는 디지털 위성통신시스템의 성능 손실 예측에 적용할 수 있다.

II. PSK 시스템

2-1 PSK BER 특성

전송 신호에 위상 잡음이 포함되어 있을 경우, 수신된 신호는 그림 1과 같이 위상 잡음에 의해 판단 영역 경계선으로 접근하여 전송 오율을 증가시킨다.

그림 1은 QPSK 신호에 대한 신호 영역(S)과 위상 잡음에 의한 신호 영향을 보여준다.

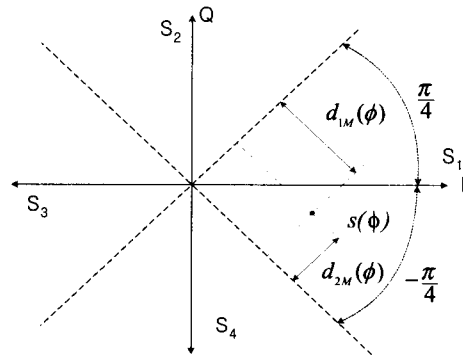


그림 1. QPSK 신호의 신호 영역도

Fig. 1. Signal space diagram for QPSK.

전송 데이터의 신호대 잡음비가 큰 경우, 위상 잡음을 포함하고 있는 M-ary PSK 신호에 대한 오율 특성은 그림 1로 부터 Q 함수로 표현된다.

$$P_k(b) = \frac{c}{k} h_M, \quad c=1 \text{ for } M=2, \quad c=2 \text{ for } M>2$$

$$h_M = \frac{1}{2} [Q(\sqrt{2k\rho} d_{1M}) + Q(\sqrt{2k\rho} d_{2M})] \quad (1)$$

여기서, $\rho = E_b/N_o$, $k = \log_2 M$ 이다. 그리고, 판단 영역 경계선까지의 거리는 각각 다음과 같다.

$$d_{1M}(\phi) = \text{Im}[s(\phi) \exp(j\pi/M)],$$

$$d_{2M}(\phi) = -\text{Im}[s(\phi) \exp(-j\pi/M)] \quad (2)$$

여기서, $s(\phi)$ 는 위상 잡음을 포함한 입력 신호를 나타낸다.

식 (1)과 (2)를 적용하여 위성통신서비스의 변조 방식으로 사용하는 BPSK와 QPSK 신호에 대한 위상 잡음에 대한 조건 오율 함수를 구하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_2(\phi) = \frac{1}{2} [\text{erfc}(\sqrt{\rho} \cos \phi)] \quad \text{for BPSK}$$

$$P_4(\phi) = \frac{1}{4} [\operatorname{erfc}(\sqrt{\rho}(\cos \phi + \sin \phi)) + \operatorname{erfc}(\sqrt{\rho}(\cos \phi - \sin \phi))] \quad \text{for QPSK} \quad (3)$$

여기서, $\operatorname{erfc}(y) = 2Q(\sqrt{2}y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^\infty e^{-z^2} dz$ 이다.

BPSK와 QPSK 신호에 대한 위상 잡음의 영향을 수치적으로 해석하기 위하여 식 (3)을 무한 급수식으로 변환하고 $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{Erfc}(z)$ 정의를 이용하면, 에러 함수는 식 (4)와 같이 전개된다^[8].

$$\operatorname{Erfc}(z \sin \theta) = \frac{z}{2} \sum_{n=0}^{\infty} k_n \left(\frac{\sin(2n+1)\theta}{2n+1} + \frac{\sin(2n-1)\theta}{2n-1} \right) e^{-\frac{1}{2}z^2} I_n\left(\frac{z^2}{2}\right) \\ k_n = 1 \quad \text{for } n=0, \quad k_n = 2 \quad \text{for } n \neq 0 \quad (4)$$

여기서, $\operatorname{Erfc}(z) = \int_z^\infty e^{-t^2} dt = \frac{1}{2}\sqrt{\pi} - \operatorname{Erf}(z)$ 이다.

삼각함수 $\cos \theta = \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right)$ 에 의해 식 (4)에 $\theta = \theta + \frac{\pi}{2}$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$\operatorname{Erfc}(z \cos \theta) = \frac{z}{2} e^{-\frac{1}{2}z^2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n k_n \left(\frac{\cos(2n+1)\theta}{2n+1} + \frac{\cos(2n-1)\theta}{2n-1} \right) I_n\left(\frac{z^2}{2}\right) \quad (5)$$

즉, 식 (3)의 함수를 식 (5)를 이용하여 전개할 수 있다. 여기서, $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{Erfc}(z)$ 정의에 의해 $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \operatorname{Erf}(z)$ 이므로 식 (5)를 이용한 BPSK와 QPSK 위상 잡음에 의한 조건 오율 식과 다음 식을 이용하여 각 위상 잡음 분포 함수에 대한 평균 오율식을 구할 수 있다.

$$P_{2(4)}(\epsilon) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{2(4)}(\phi) P(\phi) d\phi \quad (6)$$

여기서, ϵ 는 위상 에러를 나타내며, $P(\phi)$ 는 확률 분포 함수이다. 확률 분포는 다음의 Tikhonov pdf와 Gaussian pdf 함수를 사용한다.

$$P(\phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\epsilon} e^{-\frac{\phi^2}{2\sigma_\epsilon^2}} \quad \text{for Gaussian pdf} \\ = \frac{1}{2\pi I_0(a)} e^{(a \cos \phi)} \quad \text{for Tikhonov pdf} \quad (7)$$

여기서, σ_ϵ^2 는 위상 잡음의 분산(variance)이며, PLL에서의 복원 반송파 신호대 잡음비(a)의 역수 ($\sigma_\epsilon^2 \cong \frac{1}{(S/N)} = \frac{1}{a}$)이다. 또한, $I_0(\cdot)$ 는 1종 영차 수정 베셀(zeroth order modified Bessel) 함수이다.

BPSK와 QPSK에 대한 Tikhonov pdf와 Gaussian pdf에 대한 위상 잡음의 영향을 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

Tikhonov pdf에 대하여

$$P_2(\epsilon) = \frac{1}{2} - \frac{1}{I_0(a)} K [I_0\left(\frac{\rho}{2}\right) I_1(a) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n I_n\left(\frac{\rho}{2}\right) \{ A I_{2n+1}(a) - B I_{2n-1}(a) \}] \\ P_4(\epsilon) = \frac{1}{2} - \frac{1}{I_0(a)} K [I_0\left(\frac{\rho}{2}\right) I_1(a) \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n I_n\left(\frac{\rho}{2}\right) [A \cos\{(2n+1)\frac{\pi}{4}\} I_{2n+1}(a) - B \cos\{(2n-1)\frac{\pi}{4}\} I_{2n-1}(a)]] \quad (8)$$

이다. 여기서,

$$K = \sqrt{\frac{\rho}{\pi}} e^{-\frac{\rho}{2}} \text{이며, } A = \frac{1}{2n+1}, \quad B = \frac{1}{2n-1}$$

이다.

또한, $I_n(\cdot)$, $I_{n+1}(\cdot)$ 는 각각 1종 n 차, $n+1$ 차 수정 베셀 함수이다.

또한, Gaussian pdf에 대한 오율 특성은 다음과 같다.

$$P_2(\epsilon) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} K \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n k_n I_n\left(\frac{\rho}{2}\right) \left[A e^{-\frac{(2n+1)^2 \sigma_\epsilon^2}{2}} - B e^{-\frac{(2n-1)^2 \sigma_\epsilon^2}{2}} \right] \\ P_4(\epsilon) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} K \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n k_n I_n\left(\frac{\rho}{2}\right) \left[A \cos\{(2n+1)\frac{\pi}{4}\} e^{-\frac{(2n+1)^2 \sigma_\epsilon^2}{2}} - B \cos\{(2n-1)\frac{\pi}{4}\} e^{-\frac{(2n-1)^2 \sigma_\epsilon^2}{2}} \right] \quad (9)$$

2-2 위상 잡음에 의한 성능 손실 분석

PSK에 대한 오율 식은 수렴하는 특성을 가지며, 최종값의 1% 이내의 값을 갖는 항으로 구성하여 오율을 계산한다. 유한 급수에 의한 위상 잡음 특성

에 대한 오율 특성 및 성능 손실 값들은 적분에 의한 오율 특성과 10^{-14} 내에서 일치하였으며, Tikhonov pdf(그림에서 점선으로 표시)와 Gaussian pdf(그림에서 실선으로 표시)에 의한 BPSK와 QPSK의 위상 잡음 영향에 대한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림과 같이 복원 반송파 신호대 잡음비가 낮을수록 Gaussian pdf와 Tikhonov pdf에 의한 영향이 다르게 나타나고 있으나 신호대 잡음비가 증가하여 위상 잡음에 의한 영향이 적을 경우, Gaussian pdf와 Tikhonov pdf에 의한 영향이 거의 일치하고 있다.

위상 잡음에 의한 성능 손실은 각 pdf에 대한 오율 특성을 적용한다. 위상 잡음에 의한 열화 특성은 $P(\epsilon) = f(\rho, a)$ 이므로, 위상 잡음에 의해 열화된 오율 특성이 위상 잡음이 없는 경우의 오율 특성과 동

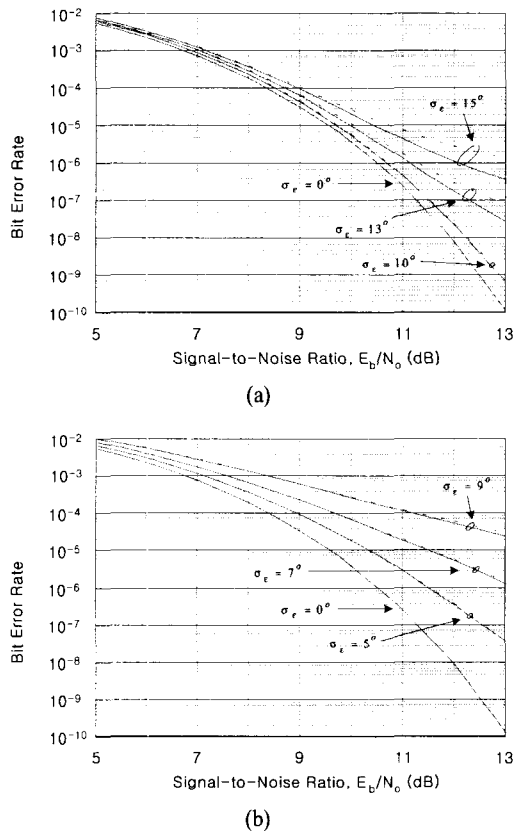


그림 2. 위상 잡음에 의한 오율 특성 (a) BPSK, (b) QPSK(점선:Tikhonov pdf, 실선:Gaussian pdf)
Fig. 2. Error performance due to phase noise, (a) BPSK, (b) QPSK(dashed line : Tikhonov pdf, solid line: Gaussian pdf).

일하게 되기 위해서는 신호대 잡음비가 증가되어야 한다. 즉, $f_{\phi=0}(\rho, a) = f_{\phi=\phi}(\rho + \delta\rho, a)$ 의 관계가 성립되어야 한다. 여기서, $\delta\rho$ 는 위상 잡음에 의한 성능 손실이다. 따라서, 위상 잡음의 성능 손실을 분석하기 위하여 다음과 같은 관계를 이용한다.

$$f(\rho) = \max \left\{ \frac{P_{\phi}(\rho + \delta\rho, a)}{P_0(\rho, a)}, \frac{P_0(\rho, a)}{P_{\phi}(\rho + \delta\rho, a)} \right\} \quad (10)$$

여기서, $\max\{a,b\}$ 는 a와 b중 큰 값을 결과 값으로 사용한다. 또한, $P_{\phi}(\rho + \delta\rho, a)$, $P_0(\rho, a)$ 는 위상 잡음이 있을 경우와 위상 잡음이 없을 경우의 오율 특성을 각각 나타내며, 성능 손실은 $f(\rho)$ 가 1이 되는 $\delta\rho$ 값이다.

따라서, 식 (10)을 사용한 BPSK와 QPSK에 대한

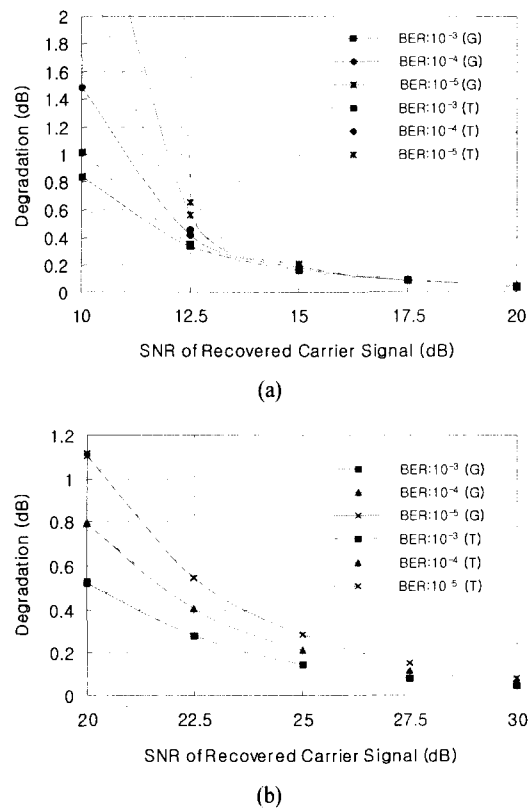


그림 3. 위상 잡음에 의한 성능 손실 특성 (a) BPSK, (b) QPSK (G : Gaussian, T : Tikhonov)
Fig. 3. Performance loss due to phase noise, (a) BPSK, (b) QPSK (G : Gaussian, T : Tikhonov).

위상 잡음 성능 손실 결과를 구하면 그림 3과 같다. 10^{-5} BER에 대하여 BPSK는 15 dB 이상의 신호대 잡음비에서는 Tikhonov pdf와 Gaussian pdf에 의한 영향이 4% 이내로 일치하는 특성을 나타내고 있으며, 신호대 잡음비가 증가할수록 각 pdf에 의한 영향이 거의 일치하는 특성을 나타내고 있다. 또한, QPSK에 대한 영향은 BPSK와 동일한 성능 손실 특성을 갖기 위해서는 신호대 잡음비가 큰 경우이므로, 1% 이내의 값에서 각 pdf의 영향이 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 10^{-3} BER 기준으로 위상 잡음에 의한 성능 손실을 0.2 dB 이내로 할 경우, 복원 반송파 신호는 BPSK에 대하여 14 dB 그리고 QPSK인 경우 23.5 dB의 신호대 잡음비를 가져야 한다.

III. 위상 잡음 발생 및 영향 평가

위상 잡음을 갖는 신호를 식 (11)과 같이 위상 변조된 신호로 표현할 수 있다^[9].

$$V(t) = V_o \sin(2\pi f_o t + \sqrt{2} \Delta\Phi_{rms} \sin 2\pi f_m t) \quad (11)$$

$$= V_o \sin(2\pi f_o t + \sqrt{2} \frac{\Delta f_{rms}}{f_m} \sin 2\pi f_m t)$$

여기서, $\sqrt{2} \Delta\Phi_{rms}$ 는 최대 위상 변위이며, f_m 은 변조 신호 또는 윌셀 주파수(offset frequency)이며, 그리고 V_o 는 신호 크기이다.

식 (11)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = V_o \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\sqrt{2} \Delta\Phi_{rms}) \sin 2\pi(f_o + n f_m)t \quad (12)$$

여기서, J_n 은 n차 제 1종 베셀 함수이다.

$\Delta\Phi_{rms} \ll 1$ 이라면, 식 (12)는 다음과 같다.

$$V(t) = V_o \sin 2\pi f_o t + \frac{1}{2} V_o \sqrt{2} \Delta\Phi_{rms} \sin 2\pi(f_o + f_m)t - \frac{1}{2} V_o \sqrt{2} \Delta\Phi_{rms} \sin 2\pi(f_o - f_m)t \quad (13)$$

즉, 반송파 신호와 $f_o \pm f_m$ 대역의 측파대(side-band) 신호로 구성된다. 따라서, 위상 잡음의 전력 스펙트럴 밀도(PSD: power spectral density)를 반송파 신호대 상(하)측파대(single sided-band) 신호 전력비로 정의하면, 위상 잡음 세기는 주파수 변조 신

호의 변조 지수($m = \sqrt{2} \frac{\Delta f_{rms}}{f_m}$)에 연관된다.

$$PSD \text{ of phase noise} = 20 \log\left(\frac{m}{2}\right) \text{ for SSB} \quad (14)$$

따라서, 위상 잡음 신호를 그림 4와 같은 주파수 변조 신호 발생기를 이용하여 발생시킬 수 있다.

즉, 그림과 같이 FM 변조기를 통하여 백색 잡음의 변조 신호(f_m)와 위상 변위 Δf_{rms} 를 갖는 신호로 위상 변조하면 그림 5와 같은 위상 잡음을 갖는 신호가 발생되며, 백색 잡음에 의한 위상 잡음은 $1/f^2$ 전달 특성에 의해 $1/f^2$ 스펙트럴 함수 분포를 갖는다.

그림 5는 주파수 윌셀 (Hz)에 대한 1.5 kHz, 3.5 kHz 그리고 5.5 kHz 위상 변위에 대하여 각각 $1/f^2$ 특성의 발생된 위상 잡음 (L(f), dBc/Hz)을 나타낸다. 발생된 위상 잡음 분산은 위상 변위에 따라 각각 20.4 mrd², 105.8 mrd² 그리고 267.7 mrd²로 증

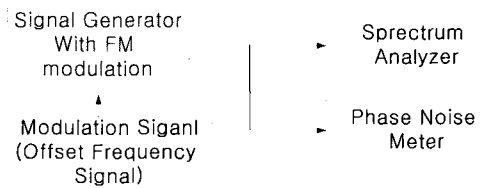


그림 4. 위상 잡음 발생도

Fig. 4. Block diagram for phase noise generation.

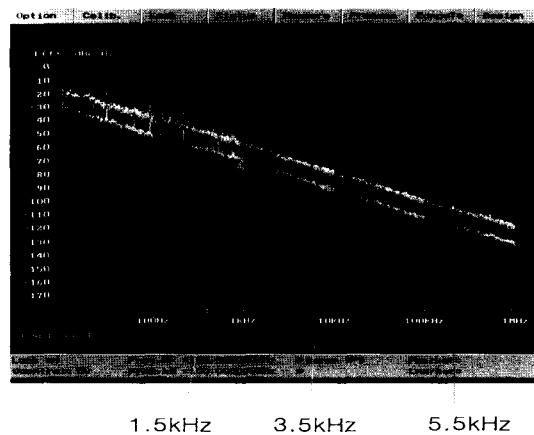


그림 5. 변조 신호에 따른 발생된 위상 잡음

Fig. 5. Generated phase noises according to modulation signals.

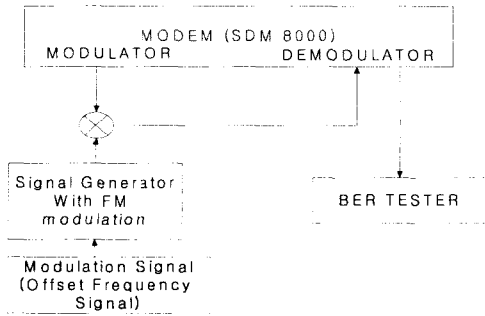


그림 6. 수신기 반송파 복원 회로의 위상 에러 특성 측정도
 Fig. 6. Block diagram for phase error response measurement of carrier recovery circuit.

가하고 있다. 또한, 변조 신호에 따라 발생된 위상 잡음은 그림 6과 같이 수신기 입력 신호에 인가하여 위상통신시스템의 수신기 특성을 측정할 수 있다. 수신 성능이 일정한 비트 오류 값(10^{-5} BER)을 갖도록 주파수 변조기의 주파수 변위 크기를 조절하여 수신기 반송파 복원 회로의 위상 잡음 억압 특성을 측정한다. 즉, 각 변조 신호에 대한 위상 변조도를 구하여 위상 잡음에 대한 수신기의 억압 특성을 구한다. 이와 같은 과정을 통하여 SDM8000 MODEM^[10]의 2.048 Mbps 전송율에 대한 QPSK 수신기 특성을 측정한 결과가 표 1에 나타나 있으며, 측정된 수신 반송파 복원 회로의 위상 에러 특성을 그림 7에 표현하였다.

그림 7과 같이 위상 잡음을 갖는 입력 신호에 대한 반송파 복원 회로의 위상 에러 특성은 500 Hz

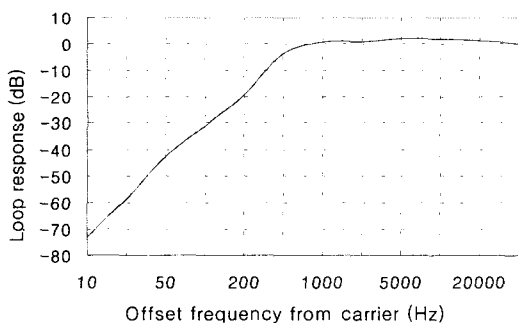


그림 7. QPSK 수신기 반송파 복원 회로의 루프 특성
 Fig. 7. Loop characteristics of QPSK receiver carrier recovery circuit.

표 1. QPSK 수신기 반송파 복원 회로 측정 특성
 Table 1. Measured characteristics of QPSK receiver carrier recovery loop.

변조신호 (Hz)	주파수변위 (Hzpeak)	변조 지수	위상변조 (deg.)	반송파회로 특성(dB)
10	6600	660	37815.22	-72.99
20	2500	125	7161.97	-58.54
50	1000	20	1145.92	-42.63
100	541	5.41	309.97	-31.27
200	272	1.36	77.922	-19.27
500	112	0.224	12.834	-3.61
1000	134	0.133	7.677	0.85
2000	263	0.1315	7.534	1.015
5000	587	0.1174	6.726	2.0
10000	1180	0.118	7.76	1.956
20000	2560	0.128	7.333	1.25
50000	7390	0.1478	8.468	0

3 dB 대역폭을 갖는 고역 통과 특성을 나타내고 있다. 즉, 수신기 반송파 복원 회로의 루프에 의해 반송파 신호에 근접한 위상 잡음은 위상 동기되어 억압되고, 반송파 신호로부터 멀어지는 윗셀 주파수 성분의 위상 잡음은 위상 에러로 작용하여 전송신호의 성능 열화로 작용한다.

그림 8은 1.5 kHz 변조 신호에 의해 발생된 위상 잡음과 QPSK 반송파 복원 회로에서의 위상 에러 특성을 보여준다.

그림 8로부터 반송파 복원 회로의 잡음 대역폭내에서는 위상 잡음이 수신기 특성에 의해 억압됨을 알 수 있으며, 여과된 위상 잡음에 의하여 수신기

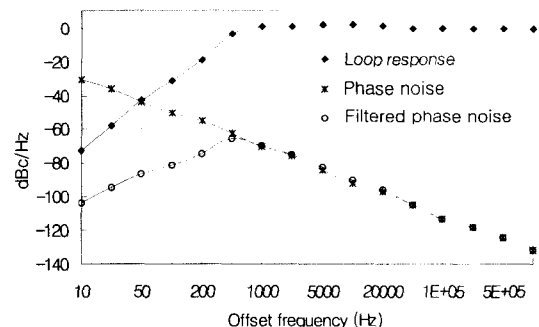


그림 8. 위상 잡음 입력에 대한 수신기 위상 에러 특성
 Fig. 8. Phase error characteristics of receiver for phase noise input.

성능이 열화된다. 따라서, 수신기 성능에 영향을 미치는 위상 잡음의 분산은 그림 8의 여과된 위상 잡음 전력의 누적으로 주파수 영역의 적분 형태로 구한다^[11].

$$\sigma_{\epsilon}^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_{\phi}(f) df \quad (15)$$

여기서는 QPSK 수신기의 1.5 kHz, 3.5 kHz 그리고 5.5 kHz 변조 신호에 대한 위상 에러 및 잡음 전력을 구하였으며 표 2의 결과와 같다.

QPSK 전송 신호에 대하여 표 2의 위상 에러 그리고 식 (8), (9)에 의하여 계산한 열화 값들과 그림 5의 위상 잡음을 수신기에 인가하여 측정된 성능 값들을 그림 9에 나타내었으며, 측정된 열화 특성(그림에서 M으로 표시)과 계산한 열화 성능(그림에서 T로 표시)이 일치하는 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 위상 잡음에 의한 성능 열화를 작게 설계하는 디지털 위성통신시스템에 대하여 Gaussian pdf와 Tikhonov pdf에 의한 성능 열화 특성이 거의 일치하므로 Gaussian pdf 또는 Tikhonov pdf를 사용하여 위상 잡음에 의한 성능 손실을 평가할 수 있다.

IV. 결 론

PSK 계열 변조 신호의 위상 잡음에 대한 성능 특성을 무한 급수로 전개하여 Tikhonov pdf와 Gaussian pdf에 대한 영향을 분석하였으며, 위상 잡음에 대한 성능 손실 분석을 통하여 Tikhonov pdf와 Gaussian pdf의 영향이 일치하는 복원된 반송파 신호의 신호대 잡음비 범위를 고찰하였다. 또한, 주파수 변조 신호의 변조 지수와 위상 잡음 스펙트럴 세기의 정의에 의해 $1/f^2$ 특성을 갖는 위상 잡음을 발생시키고, 발생된 위상 잡음을 디지털 위성통신시스템 수신기에 인가하여 위상 잡음에 의한 성능 손실을 측정하였다. Tikhonov pdf와 Gaussian pdf에 의한 영향이 일치하는 위상 잡음 범위에서 계산된 성능 열화 특성은 측정된 성능 열화 특성과 일치하는 것을 알 수 있었다.

표 2. 위상 에러 특성

Table 2. Phase error characteristics.

변조 신호 (kHz)	위상 에러 (rms deg.)	DSB 잡음 전력 (dBc)	잡음 전력 (W)
1.5	1.37	-32.4	0.000573
3.5	3.11	-25.3	0.002948
5.5	4.958	-21.25	0.007487

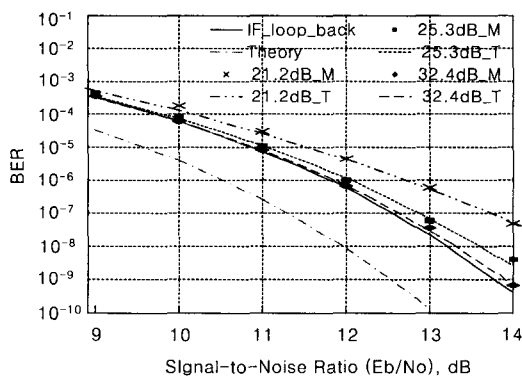


그림 9. 위상 잡음에 의한 위성통신 수신기의 계산된 성능 열화와 측정된 성능 열화 특성 (QPSK)

Fig. 9. Measured and theoretical performance of satellite receiver due to phase noise (QPSK).

참 고 문 헌

- [1] Tri. T. Ha, *Digital Satellite Communications*, Macmillan, NY, 1986.
- [2] R. M. Gagliardi, *Satellite Communications*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1984.
- [3] W. C. Lindsey and M. K. Simon, *Telecommunication Systems Engineering*, Prentice-Hall, NJ, 1972.
- [4] J. J. Stiffler, *Theory of Synchronous Communications*, Prentice-Hall, 1971.
- [5] Jonathan Y. C. Cheah, "Analysis of Phase Noise in Oscillators", *RF Design*, pp. 99-105, Nov. 1991.
- [6] Feng Fan and Loh-Ming Li, "Effect of Noisy Phase Reference on Coherent Detection of Band-Limited Offset-QPSK Signals", *IEEE Trans. on Commun.* vol. 38, no. 2, pp. 156-159, 1990.

- [7] J. Besse, "The Effect of Synthesizer Phase Noise on BER Performance", *Evaluation Engineering*. vol. 39, pt. 4, pp. 114-118, 2000.
- [8] Yudell L. Luke, *Integrals of Bessel Functions*, McGraw-Hill, NY, 1962.
- [9] W. P. Robins, *Phase Noise in Signal Sources*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1982.
- [10] Comtech EF Data, *SDM-8000 ibs/idr Satellite MODEM*, 2001.
- [11] Mohamed K. Nezami, "Evaluate the Impact of Phase Noise on Receiver Performance", *Microwaves & RF*, vol. 37, no. 5, pp. 165-174, 1998.

김 영 완

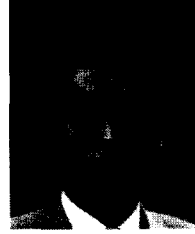


1983년 2월: 경북대학교 공과대학
전자공학과 (공학사)
1985년 2월: 경북대학교 대학원 전
자공학과 (공학석사)
1997년~현재: 충남대학교 대학원
박사과정
1992년~현재: 한국전자통신연구원

초고속위성통신연구팀

[주 관심분야] 디지털 전송, 디지털 위성통신/방송시스템,
Microwave devices 등

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학
전자공학과 (공학사)
1976년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 (공학석사)
1984년 12월: University of Cali-
fornia, Santa Barbara (공학박사)
1976년~현재: 충남대학교 공과대

학 전파공학과 교수

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany,
방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1994년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

2000년~2001년: 한국전자과학회 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive
devices, EMC/EMI topics, and Antennas