

---

# PSK 고차모드 위성전송을 위한 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 해석

김 영 완\*

Phase Noise Spectrum of LNB for PSK Multi-mode satellite transmission signal

Young Wan Kim\*

## 요 약

본 논문에서는 고속 데이터 전송을 위한 고차 모드 신호의 양호한 위성 전송에 요구되는 수신 단말기의 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 특성을 해석한다. 위상 잡음은 낮은 데이터 전송뿐만 아니라 고속 데이터 전송을 위한 고차 모드 신호 전송에 심각한 영향을 미치며, 전송 링크 주파수가 증가함에 따라 위상 잡음이 증가하여 고속 데이터 전송에 요구되는 고차 모드와 높은 주파수 사용으로 인한 전송 열화 성능은 증가한다. 따라서, 높은 주파수 영역을 갖는 고차 모드 수신 단말기의 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음은 전송 성능에 지배적인 영향을 가지므로, 저잡음 증폭 주파수 변환기 위상 잡음에 대한 가용 전송 모드를 해석하고 가용 서비스 적용 방법을 제시한다.

## ABSTRACT

The LNB phase noise of user terminal for high data rate satellite transmission was analyzed in this paper. The phase noise severely affects the service performance in low data rate transmission as well as multi-mode signal for high data rate. As the satellite link frequency is increased, the effects of phase noise for multi-mode signal is increased. The phase noise of LNB, which is operated in high frequency band, is about equal to the transmission system phase noise and have an major effects on service performance degradation. The available transmission mode was analyzed in presence of phase noise of LNB and analysis method for LNB phase noise spectrum distribution was proposed in multi-mode signal

## 키워드

phase noise for LNB, phase noise spectrum, phase noise for multi-mode signal

## I. 서론

위성 전송 데이터의 대용량화로 고차 전송 모드 및 고속화가 진행되고 있다. 전송 데이터의 고속화는 높은 전송 링크 주파수의 사용과 제한된 대역내에서 대용량 데이터 전송은 고차 전송 모드 신호를 요구한다[1]. 높은

전송 링크 주파수 사용과 고차 전송 모드는 전송 시스템의 위상 잡음의 증가와 그 영향을 지배적으로 받는다. 높은 위상 잡음을 갖는 전송 시스템에서 전송되는 고차 모드 신호는 복원될 수 없는 오류 상태가 발생될 수 있다 [2]. 이러한 전송 시스템에서 발생된 위상 잡음은 최소화할 수 없을 뿐만 아니라, 최적 수신 설계이외에는 성능

열화를 등화 할 수 있는 방법이 어렵다.

디지털 전송 시스템의 위상 잡음이 전송 신호에 미치는 성능 영향은 많은 연구 결과에서 발표되었으며, 위상 잡음의 영향을 최소화하기 위한 최적 수신 설계 기법 등이 발표되었다[3][4]. 또한, 디지털 전송 시스템의 시스템 위상 잡음 특성을 해석하고 요구 스펙트럼 특성을 제안하고 있다[5]. 이러한 연구 결과는 중저속 데이터 및 저차 모드 전송에 대한 해석을 바탕으로 시스템 위상 잡음에 대한 연구 결과로서, 대용량 위성 전송을 위한 고차 모드 디지털 전송 시스템을 구성하고 있는 소자 및 구성 요소들의 위상 잡음에 대한 영향 정도 및 시스템 적용의 적합성 등을 고려한 고차 모드 시스템 구성에 대한 가용 서비스 해석이 요구되고 있다.

본 논문에서는 고속 데이터 전송을 위한 고차 모드 신호의 양호한 위성 전송을 위한 수신 단말기의 저잡음 증폭 주파수 변환기의 요구 위상 잡음 특성을 해석한다. 디지털 전송 시스템은 상대적으로 송신 시스템에 비해 저가의 단일 수신 단말기로 구성되므로, 전송 신호의 위상 잡음 영향은 수신 단말기의 높은 주파수 영역을 갖는 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 특성에 지배적인 영향을 받는다. 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음을 측정하고, 전송 모드에 대한 가용 서비스 및 적용 가능한 수신 설계를 해석한다.

## II. 위성 전송 시스템의 위상 잡음 영향

### 2.1 위성 전송 및 위상 잡음

위성 전송 시스템은 주로 고성능의 중심국과 저가의 다수 단말기로 구성된다. 사용자 수신 단말기는 상대적으로 중심국 및 송신부에 비해 성능이 다소 낮으며, 전송 시스템 위상 잡음은 높은 영역의 사용 주파수를 갖는 사용자 단말기 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 특성에 지배적으로 영향을 받는다. 따라서 수신 단말기의 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음이 전송 신호의 성능에 지배적인 영향을 미친다.

위성 전송 시스템은 PSK 계열의 BPSK, QPSK 및 고속 데이터 전송을 위한 8-PSK 위상 변조 방식 그리고 DVB-S2의 APSK 계열의 변조 방식을 사용한다[6]. 그리고 위성 전송 링크의 상태에 따라 전송 모드를 가변적으로 변경하는 적응형 전송 방식을 사용할 수 있다. 즉, 링

크 환경이 양호한 경우 APSK 및 8-PSK의 고차 모드를 사용할 수 있으며, 링크 상태가 양호하지 않은 경우에는 서비스 가용도를 위하여 저차 모드로 신호를 전송하는 운용방식을 사용할 수 있다.

저차 모드와 고차 모드를 전송하는 동일한 전송 시스템에서는 고차 모드 전송에 요구되는 시스템 성능에 지배적 영향을 받으므로, 위상 잡음 특성은 고차 모드 신호 전송에 적용하여 해석된다. 여기서는  $M \geq 4$  이상인 MPSK 계열 변조 방식 중심으로 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 특성을 해석한다.

위성 전송 시스템의 전송 방식으로 사용하는 M-ary PSK 신호의 위상 잡음( $\phi$ )에 대한 조건 오율 함수를 구하면 다음과 같이 표현될 수 있다[7][8].

$$P_M(\phi) = \frac{1}{2k} [\operatorname{erfc}\{\sqrt{k\rho} \sin(\frac{\pi}{M} + \phi)\} + \operatorname{erfc}\{\sqrt{k\rho} \sin(\frac{\pi}{M} - \phi)\}], \quad (M \geq 4) \quad (1)$$

여기서,  $\operatorname{erfc}(y) = 2Q(\sqrt{2}y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^\infty e^{-z^2} dz$  이며,  $\rho = E_b/N_a$ ,  $k = \log_2 M$ 이다.

위상 잡음의 영향을 수치적으로 해석하기 위하여 가우시안 확률 분포 함수(Gaussian pdf)를 적용한 무한 급수형 평균 오율 함수는 다음과 같다[8].

$$P(\epsilon) = \frac{m}{k} - \frac{m}{k} K \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \epsilon_n I_n(\frac{\hat{\rho}}{2}) \quad (2)$$

$$[A \cos\{(2n+1)\theta\} e^{-\frac{(2n+1)^2 \sigma_\epsilon^2}{2}} - B \cos\{(2n-1)\theta\} e^{-\frac{(2n-1)^2 \sigma_\epsilon^2}{2}}]$$

여기서,  $I_n()$ 는 각각 1종  $n$ 차 수정 베셀 함수이며, 또한 각각의 파라미터는

$$A = \frac{\cos(2n+1)\bar{\epsilon}}{2n+1}, \quad B = \frac{\cos(2n-1)\bar{\epsilon}}{2n-1},$$

$$\theta = \frac{(M-2)\pi}{2M}, \quad \hat{\rho} = k \frac{E_b}{N_a}, \quad K = \sqrt{\frac{\rho}{\pi}} e^{-0.5\rho},$$

$$m = 0.5 \quad \text{for } M=2, \quad m = 1 \quad \text{for } M \geq 4$$

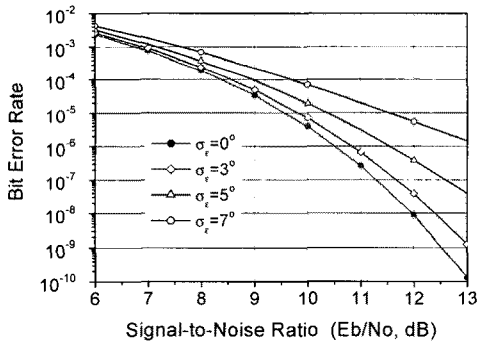
$$\epsilon_n = 1 \quad \text{for } n=0, \quad \epsilon_n = 2 \quad \text{for } n \neq 0$$

이며,  $\bar{\epsilon}$ 은 static 위상 에러이다.

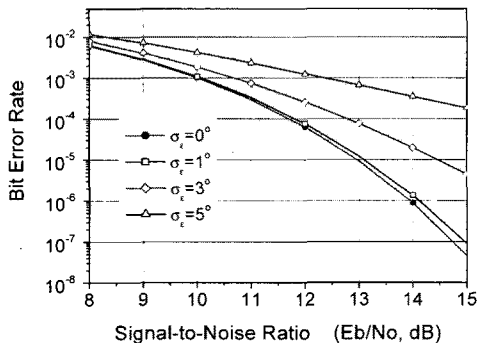
## 2.2 고차 모드의 위상 잡음 성능

Gaussian 확률 분포 함수를 적용한 위상 잡음 오울 식 (2)에 의한 MPSK의 위상 잡음에 의한 전송 성능은 그림 1에 나타내었다. 고차 모드로 증가할수록 위상 잡음에 의한 영향이 증가한다. 즉, 전송 심볼간 간격이 작아지면서 성능 열화는 급격하게 증가하여 전송 신호를 복원할 수 없는 오류가 발생할 수 있다. 그림 2는 위상 잡음에 의한 성능 열화도를 나타내었으며, 고차 모드에서는 매우 낮은 위상 잡음 특성을 가져야함을 알 수 있다. 10-3 BER 기준 0.1 dB 열화인 경우, QPSK 전송 모드에서는 약 2.40 이내, 8PSK 전송 신호에서는 약 1.150 이내 그리고 16PSK 신호에서는 약 0.60 이내의 매우 작은 위상 에러 표준 편차를 가져야 한다.

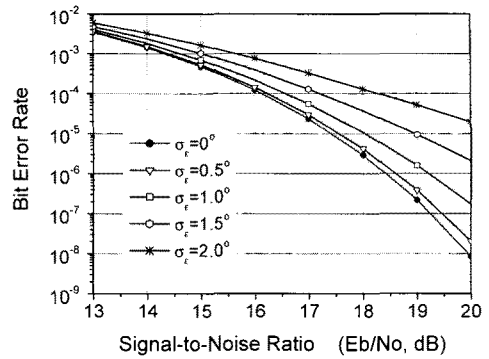
위상 에러 표준 편차가 약 1.5°인 전송 시스템에서 10<sup>-3</sup> BER 기준인 경우, 상대적으로 낮은 전송 모드인 QPSK 신호는 약 0.05 dB 이내 그리고 고차 모드인 8PSK 신호는 약 0.16 dB, 16PSK 신호는 0.62 dB로 성능 열화가 증가한다. 아울러, 상대적으로 위상 잡음이 큰 전송시스템에서는 고차 전송 모드 신호가 전송될 수 없음을 알 수 있다.



(a)



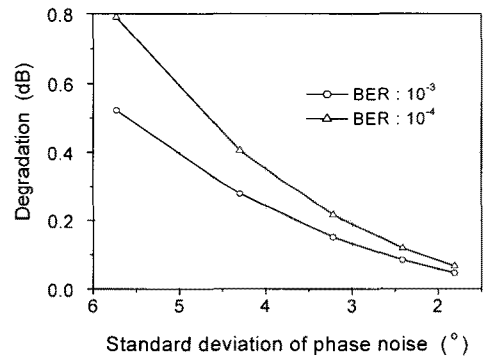
(b)



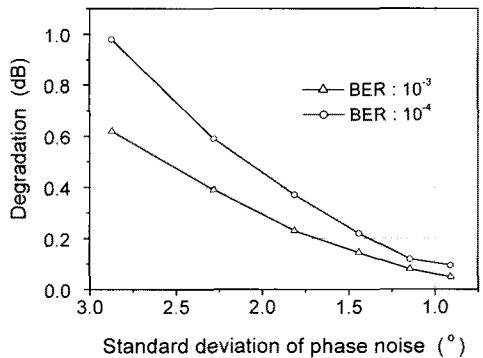
(c)

그림 1. MPSK 신호의 위상 잡음 영향, (a) QPSK, (b) 8PSK 및 (c) 16PSK.

Fig. 1. Effect of phase noise for MPSK, (a) QPSK, (b) 8PSK and (c) 16PSK.



(a)



(b)

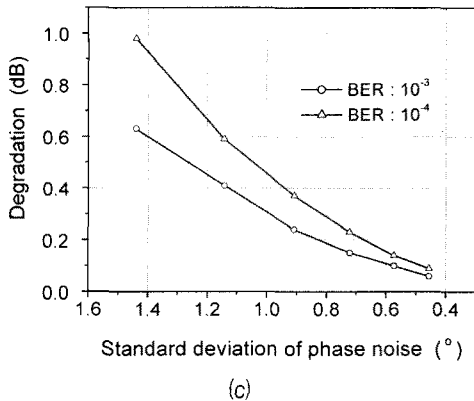


그림 2. 위상 잡음에 의한 MPSK 신호 열화도, (a) QPSK, (b) 8PSK 및 (c) 16PSK.

Fig. 2. Performance degradation of MPSK signal by phase noise, (a) QPSK, (b) 8PSK and (c) 16PSK.

### III. 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 및 가용 서비스

#### 3.1 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음

Ku/Ka 대역 위성 전송 시스템의 사용자 수신 단말기의 위상 잡음 특성이 전송 시스템의 위상 잡음 성능에 영향을 미치며, 수신 단말의 전처리부인 저잡음 증폭 주파수 변환기 위상 잡음이 지배적인 영향을 갖는다. 저잡음 증폭 주파수 변환기의 주파수 발생 부분은 공진기 또는 위상 동기(PLL)방식을 사용하며, 위상 동기 방식 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 특성은 일반적으로 그림 3(b)와 같이 나타난다. 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 영향을 비교하기 위하여 IESS-308/309 위상 잡음(그림 3(a))을 비교 해석한다. IESS-308/309 위상 잡음은 Leeson 모델을 사용하여 모델링하며[9][10], 위상 동기 방식은 주파수 합성기의 위상 잡음 스펙트럼 분포 모델을 사용하여 모델링한다. IESS-308/309 위상 잡음 모델과 측정된 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_{\phi}(f) \text{ (dBc/Hz)} = 10 \log \left[ \frac{FkT}{2P_s} \times \left( 1 + \frac{f_c}{f} + \frac{f_o^2}{4f^2 Q_L^2} + \frac{f_c f_o^2}{4f^3} Q_L^2 \right) \right] \quad (3)$$

여기서,  $F$ 는 실험적으로 구할 수 있는 잡음 지수이

며,  $P_s$ 와  $T$ 는 각각 발진기에서 이용할 수 있는 전력과 절대 온도이다.

그리고,  $f_c$ 와  $f$ 는 폴릭커 주파수와 오프셋 주파수이다. 주파수 합성기의 위상 잡음 스펙트럼 분포 모델은 다음과 같은 모델을 적용한다[8].

$$S_{\phi, FS}(f) = 10 \log \left[ |N_{v,f}(f) \cdot G_c(f) \cdot \frac{N}{R}|^2 + \left| N_{VCO}(f) \cdot \frac{1}{1+G_o(f)} \right|^2 + |N_{LPF}(f)|^2 + \{|N_{pd}(f) + N_{DV}(f)\} \cdot G_c(f) \cdot N|^2 \right] \quad (4)$$

적용된 주파수 합성기는 기준 신호 발진기 및 분주비(R), 전압 제어 발진기, 위상 비교기, 루프 필터, 주파수 분주기 및 비(N)와 저역통과 여파기의 전달함수로 구성된다.

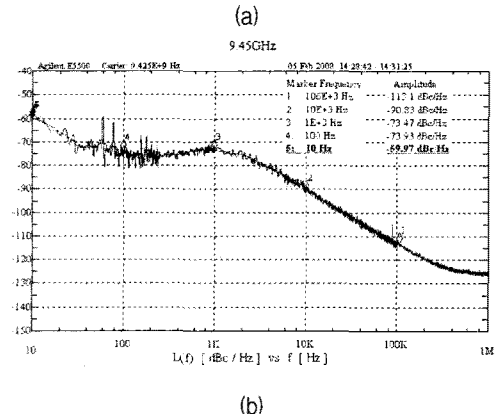
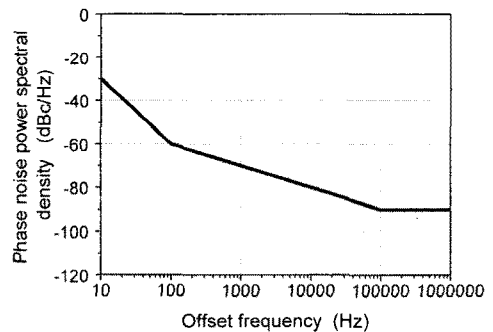


그림 3. 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음, (a) IESS-308/309, (b) 주파수 합성기.

Fig. 3. Typical phase noise of LNB, (a) resonator type, (b) Frequency Synthesizer

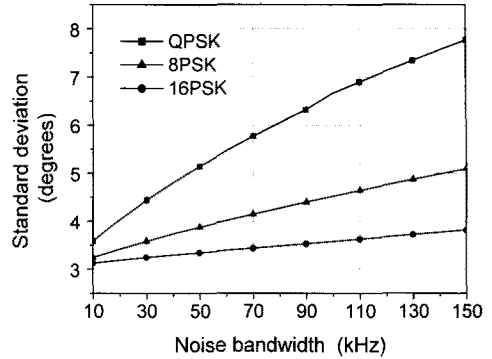
### 3.2 가용 서비스 분석

위상 잡음 전력 스펙트럼 밀도를  $S_{\phi}(\omega)$ 라 하면, 수신 단말기에서의 위상 에러 분산은 식 (5)와 같이 위상 잡음에 의한 영향  $\sigma_{\phi}^2$ 과 입력 백색 잡음에 의한 영향  $\sigma_n^2$ 의 합으로 나타난다.

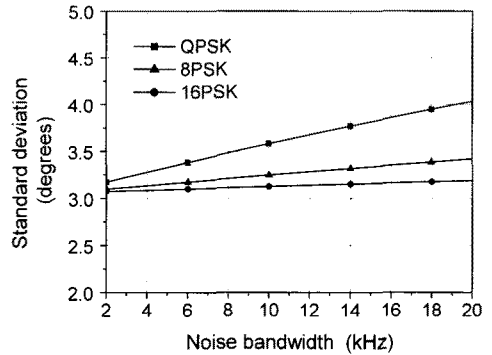
$$\begin{aligned}\sigma_e^2 &= \sigma_n^2 + \sigma_{\phi}^2 \\ &= \int_0^{\infty} S_{\phi}(\omega) \left| 1 - H(j\omega) \text{RIGHT} \right|^2 d\omega + \int_0^{\infty} N_0 |H(j\omega) \text{RIGHT}|^2 d\omega\end{aligned}\quad (5)$$

수신 복원 회로로 고 이득 2차 루프(high-gain 2<sup>nd</sup> order loop)를 사용하며, 감쇠 정수는 1.0을 고려한다. 또한 고차 모드를 고려하여 대역폭은 100 MHz 위성 트랜스폰더를 사용하나, IESS-308/309 위상 잡음은 2 MHz 대역폭을 고려한다. 이 경우, 수신 대역폭에 따른 위상 잡음과 루프 손실을 고려한 백색 잡음의 영향은 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에서 배경 잡음에 의한 신호대 잡음비는 10<sup>-3</sup> BER을 기준으로 각 전송 모드에 적용하였다. 따라서, 비교적 높은 신호대 잡음비가 필요한 고차 모드의 위상 에러 분산이 상대적으로 낮은 분포를 보여준다. 또한, 위상 잡음보다는 배경 잡음에 의한 영향이 지배적으로 작용한다.

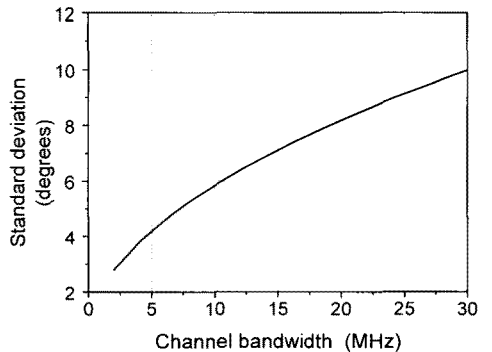
그림 2와 비교하여 그림 4(a), 4(b)로부터 IESS-308/309 위상 잡음을 갖는 저잡음 증폭 주파수 변환 전송 시스템은 낮은 잡음 대역폭에서, QPSK 신호는 약 0.2 dB 이내, 8PSK 신호는 약 0.8 dB 이내이나, 16PSK 신호는 4.2 dB 이내로 열화 특성이 증가하여 신호 복원이 어렵게 될 수 있다. 또한, 수신 잡음 대역폭이 증가하거나 그림 4(c)로부터 광대역 전송 시에는 전송 신호를 복원할 수 없는 오류가 발생함을 알 수 있다. 그러나, 그림 4(d)로부터 약 0.12 dB 이내의 낮은 성능 열화를 갖는 고차 모드 및 고속 데이터 전송을 위해서는 그림 3(b)와 같은 낮은 위상 잡음의 저잡음 증폭 주파수 변환기를 갖는 전송 시스템을 가져야 함을 알 수 있다. 이 경우, 그림 4(d)로부터 최적 수신 잡음 대역폭은 20 ~ 30 kHz로 설계할 수 있음을 알 수 있다.



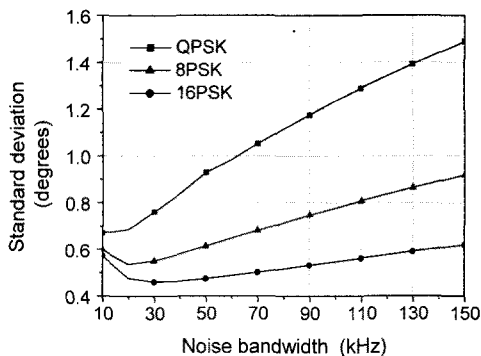
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 잡음 대역폭에 따른 위상 에러 분산,

(a) IESS-308/309와 (b) 위상 동기형.

Fig. 4. Phase error variance due to noise bandwidth,

(a) IESS-308/309 and (b) PLL type.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고속 디지털 데이터와 고차 모드 위성 전송 성능에 지배적인 영향을 갖는 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 특성을 적용 가능한 PSK 전송 모드에서 해석하였다. 기존 IESS 위성 전송 위상 잡음 스펙트럼 분포와 고차 모드 전송을 위한 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 분포 특성을 해석하고 비교 분석하여 적용 가능한 PSK 전송 모드를 해석하였다. 본 논문의 해석 결과를 적용하여 저잡음 증폭 주파수 변환기의 위상 잡음에 따른 적용 가능한 전송 모드를 해석하고 가용 서비스를 설계할 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] E. Casini, R. De Gaudenzi and A. Ginesi, "DVB-S2 Modem Algorithms Design and Performance Over Typical Satellite Channels", *Int. J. Satellite Commun.* 2004.
- [2] Kiyoshi Hamaguchi, Yozo Shoji and Hiroyo Ogawa, "BER Performance of Coherent-QPSK Transmissions Affected by Phase Noise from Frequency Converters" *Vehicular Technology Conf.*, vol. 4, pp. 2281-2284, 2001.
- [3] A. G. Burr, "Comparison of Coherent and Noncoherent Modulation in the Presence of Phase Noise", *IEE proceedings-I*, vol. 139, no. 2, pp. 147-155, April 1992.
- [4] S. Hussain, S. K. Barton and S. J. Shepherd, "Non-coherent Detection of MFSK Signals in the Presence of Oscillator Phase Noise in an AWGN Channel", *Vehicular Technology Conf.*, vol. 3, pp. 1552-1556, 1994.
- [5] Young-Wan Kim, Jong-Suk Chae and Dong-Chul Park, "Circuit Design and Performance Analysis of Carrier Recovery Loop for Digital DBS System in the Presence of Phase Noise", *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 45, no. 3, pp. 294-302, Sept. 1999.
- [6] "Digital Video Broadcasting (DVB) User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)," *European Telecommunications Standards Institute TR 102 376 v1.1.1*
- [7] Tadao Nakagawa and Katsuhiko Araki, "Effect of phase noise on RF communications signals", *Vehicular Technology Conf.*, vol. 2, pp. 588-591, 2000.
- [8] 김영완, 박동철, "디지털 위성통신시스템에서의 위상잡음으로 인한 성능 손실예측", *전자파공학회 논문지*, 제 13권, 제 7호, 679-686, 2002.
- [9] Intelsat, "Performance characteristics for intermediate data rate (IDR) digital carriers : IESS 308" and "QPSK/FDMA performance characteristics for INTELSAT business services (IBS) : IESS 309", *Intelsat*, Rev. 10, Feb. 2000.
- [10] D. B. Leeson, "Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum", *Proc. IEEE*, pp. 329, Feb. 1966.



김영완(Young-wan Kim)

1983년 경북대학교 전자공학사  
1985년 경북대학교 전자공학석사  
2003년 충남대학교 전자공학박사

1984~1990 동양정밀공업(주) 중앙연구소 과장  
1990~1992 (주) 유영통신 이사  
1992~2004 한국전자통신연구원 책임연구원  
2004~현재 군산대학교 전자정보공학부 교수

※관심분야 : RF/Microwave 시스템 및 회로설계, 디지털 위성방송/통신시스템, 마이크로파 소자