

## M-ary APSK 변조 방식의 위상잡음 영향 분석

김영완\*

### Performance Analysis of M-ary APSK Modulation Method in the Presence of Phase Noise

Young-wan Kim\*

Department of Radio Communication Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 M-ary APSK 변조 방식을 사용하는 통신시스템의 위상잡음에 의한 영향을 모의 해석 모델을 사용하여 분석한다. APSK 고차 변조 방식에 대한 위상잡음 영향은 APSK 신호 성장도를 고려하여 모델링하며, PSK 저차 변조 신호에 대한 해석적 모델과 비교 평가하여 모의 해석 모델의 적합성을 평가한다. 평가된 모의 해석 모델을 사용하여 APSK 변조 신호에 대한 위상잡음 영향을 분석한다. PSK 저차 변조 신호의 위상잡음에 대한 해석적 모델 결과와 모의 해석 모델의 결과는 1% 이내의 일치하는 특성을 나타내었으며, 적합한 M-ary APSK 변조 신호에 대한 위상잡음의 영향 정도를 제시한다. 아울러, 시스템 설계 및 서비스 성능 평가에 적용할 수 있는 위상잡음에 의한 통신 서비스의 열화 정도에 대한 위상잡음의 신호대 잡음비를 산출하여 제시한다.

#### ABSTRACT

Based on the simulation model for phase noise effect, the phase noise performance of communication system using the M-ary APSK modulation method is analyzed in this paper. The phase noise effects for APSK higher order modulation method are modeled by considering the signal constellations of the modulation methods. The simulation model is verified by comparing the analytic results for lower order modulation signals with simulated results for those modulation signals. Based on the simulation model, then, the phase noise effects for M-ary APSK are analyzed. The simulated results for PSK lower order modulation signals are in agreement with the results by the analytic model in the order of 1%. The proper phase noise effects for M-ary APSK modulation signals are deduced by the simulation model. Also, the required signal-to-noise ratios of phase noise are proposed for phase noise degradations, which are used as the design parameter that considers the phase noise effect.

**키워드** : 위상잡음, 다진 진폭위상변조, 위상잡음 성능 분석, M-ary APSK 위상잡음 영향 해석

**Key word** : Phase noise, M-ary APSK modulation, Phase noise performance, Phase noise effect of M-ary APSK

접수일자 : 2014. 05. 22 심사완료일자 : 2014. 06. 09 게재확정일자 : 2014. 06. 25

\* **Corresponding Author** Young-wan Kim(E-mail:ywkim@kunsan.ac.kr, Tel:+82-63-469-4852)

Department of Radio Communication Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.7.1511>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

위성통신을 비롯한 통신시스템에서 대역 효율을 향상하기 위하여 제한된 채널 대역폭에 고속 데이터를 전송할 수 있는 고차 변조 모드가 적용되고 있다. 위성 전송 채널에서는 8PSK(Phase Shift Keying) 변조 방식 외에 고차 모드인 16 APSK(Amplitude PSK) 변조 방식을 사용하며, 32 APSK 전송모드가 가능하다[1]. 고차 변조 방식이 사용됨에 따라 채널 열화 요소에 의한 성능 열화가 증가하며, 특히 위상잡음에 의한 영향이 지배적으로 나타나고 있다. 이러한 위상잡음에 대한 연구는 전송모드에 대한 위상잡음 영향 분석, 위상잡음 영향을 최소화하기 위한 시스템 설계 기술, 그리고 발진기 구조에 따른 위상잡음 발생 모델 등 다양하게 발표되고 있다[2-6]. 위상잡음 영향 분석에서는 PSK 저차 전송모드에 대한 해석적인 모델이 제시되어 있으며 [2-3], 아울러 APSK 고차 전송모드에 대해서도 해석적인 방법이 제시되고 있다[7]. 그러나 전송모드에 대한 위상잡음 영향을 분석하기 위한 해석적인 방법은 복잡하고 전송모드에 따라 해석 방법이 적용되므로 간단하고 다양한 전송파라미터를 고려할 수 있는 모의 해석적인 분석 모델이 필요하다.

본 논문에서는 M-ary APSK 고차 변조 방식에 대한 위상잡음에 의한 성능을 분석할 수 있는 모의 분석 모델을 해석하여 APSK 변조 신호에 대한 위상잡음 영향을 분석한다. 위상잡음 모의 분석 모델의 적합성은 PSK 저차 변조 방식의 해석적인 모델에 의한 위상잡음 영향 분석 결과와 모의 분석 모델의 결과를 비교 분석하여 평가된다. 평가된 모의 분석 모델을 통하여 M-ary APSK 전송모드에 대한 위상잡음 영향이 분석되어 제시된다. 아울러, PSK 및 APSK 전송 신호의 요구 서비스 성능 정도에 따라 위상잡음에 의한 열화 정도를 평가하여 시스템 설계 및 평가 지표로 활용할 수 있는 위상잡음의 신호대 잡음비를 산출하여 제시한다.

## II. PSK 전송모드의 위상잡음 해석

그림 1은 M-ary PSK 신호에 대한 신호 영역(S)과 위상잡음에 의한 영향을 보여준다[2]. 여기서, 전송 데이터의 신호 대 잡음비가 큰 경우, 위상잡음을 포함하고

있는 M-ary PSK 신호에 대한 오율 특성( $P_k(\phi)$ )은 Q 함수로 표현된다.

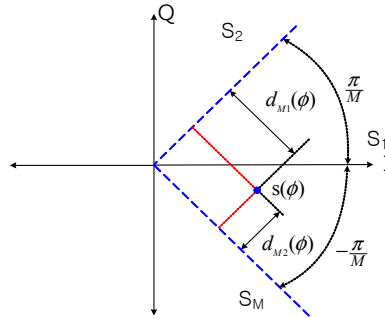


그림 1. M-ary PSK 신호의 위상잡음 영향도

Fig. 1 Phase noise effect of M-ary PSK signal

$$P_k(\phi) = \frac{c}{k} h_M \quad (1)$$

$$h_M = \frac{1}{2} [Q\{\sqrt{2k\rho} d_{M1}(\phi)\} + Q\{\sqrt{2k\rho} d_{M2}(\phi)\}]$$

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

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

$$d_{M1}(\phi) = \text{Im}[s(\phi)\exp(j\pi/M)] = \sin(\frac{\pi}{M} + \phi), \quad (2)$$

$$d_{M2}(\phi) = -\text{Im}[s(\phi)\exp(-j\pi/M)] = \sin(\frac{\pi}{M} - \phi)$$

식 (1)과 식 (2)를 적용하여 위성통신시스템의 전송 방식으로 사용하는 M-ary PSK 신호에 대한 위상잡음에 대한 조건 오율 함수를 구하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_2(\phi) = \frac{1}{2} [\text{erfc}\{\sqrt{\rho} \cos\phi\}] \quad \text{for } BPSK \quad (3)$$

$$P_4(\phi) = \frac{1}{4} [\text{erfc}\{\sqrt{2\rho} \sin(\frac{\pi}{4} + \phi)\} + \text{erfc}\{\sqrt{2\rho} \sin(\frac{\pi}{4} - \phi)\}] \quad \text{for } QPSK$$

$$P_8(\phi) = \frac{1}{6} [\text{erfc}\{\sqrt{3\rho} \sin(\frac{\pi}{8} + \phi)\} + \text{erfc}\{\sqrt{3\rho} \sin(\frac{\pi}{8} - \phi)\}] \quad \text{for } 8PSK$$

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

위상잡음에 의한 영향은 식 (3)의 조건 오율 식을 이용하여 위상잡음 분포 함수에 대한 평균 오율 식으로 구할 수 있다.

$$P_M = \int_{-\pi}^{\pi} P_M(\phi)P(\Phi)d\phi \quad (4)$$

식 (4)의  $P(\Phi)$ 는 위상에러 확률 분포 함수를 나타내며, Gaussian 함수를 적용한다.

$$P(\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\epsilon} e^{-\frac{\phi^2}{2\sigma_\epsilon^2}} \quad (5)$$

### III. 위상잡음 영향 분석 모델

고차 변조 방식인 16APSK와 32APSK 신호의 위상잡음에 대한 영향을 모의 해석하기 위하여 고차 전송 모드 신호의 성상도를 고려한다. 그림 2와 그림 3은 16APSK와 32APSK 변조 신호의 성상도를 보여준다.

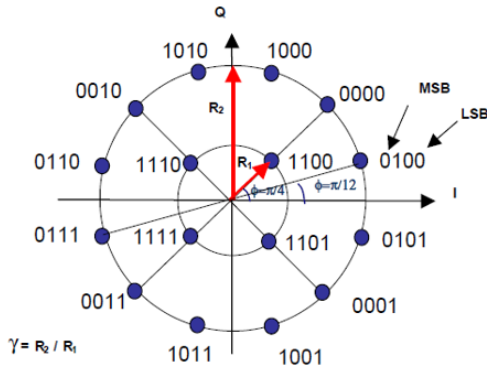


그림 2. 16APSK 신호 성상도  
Fig. 2 Signal constellation of 16APSK

16APSK의 경우 DVB-S2 표준에서 사용되는 심볼 매핑틀을 적용하였다. 성상도의 내부 링(inner ring)의 성좌도와 외부 링(outer ring)의 성좌도 크기 비율 ( $\gamma = R_2/R_1$ )은 2.57, 2.60, 2.75, 2.85, 3.15를 적용한다.

32APSK의 경우도 DVB-S2 표준에서 사용되는 심볼 매핑틀을 적용하였으며, 내부 링(inner ring) 성좌도간의 비율( $\gamma_1 = R_2/R_1$ )과 내부 링과 외부 링의 성좌도 비율 ( $\gamma_2 = R_3/R_1$ )은 각각 2.53, 2.54, 2.64, 2.72, 2.84와 4.30, 4.33, 4.64, 4.87, 5.27을 적용한다.

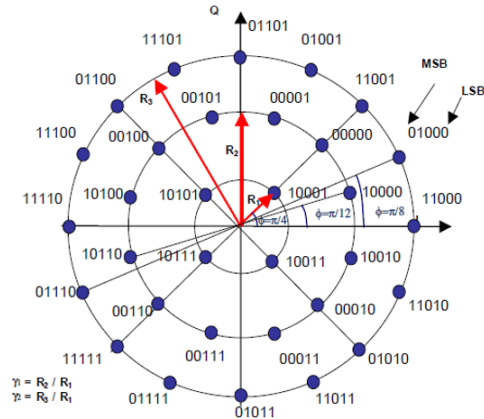


그림 3. 32APSK 신호 성상도  
Fig. 3 Signal constellation of 32APSK

기본적인 채널환경은 AWGN 채널과 위상잡음을 갖는 채널로 구현하며 위상잡음 모델은 식 (5)와 같이 평균이 0(zero)이고, 위상변화량은 표준 편차를 갖는 Gaussian 분포를 적용한다. 여기서, 위상오차 분산 (radian)은 요구 위상잡음 신호의 신호대 잡음비의 역수 관계( $1/SNR$ )를 갖는다. 모의 성능 해석을 위한 분석 모델 구성은 그림 4와 같으며, 각 구성에 대한 기능은 다음과 같다.

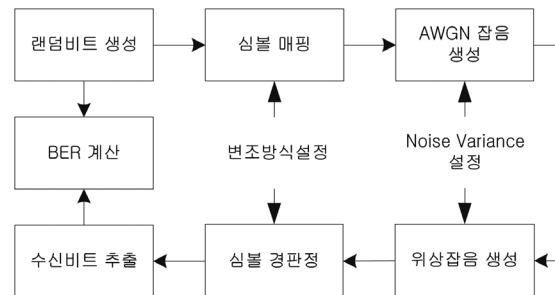


그림 4. 위상잡음 성능 분석을 위한 모의 분석 모델 구성도  
Fig. 4 Block diagram of simulation model for phase noise performance

- 랜덤 비트 생성 블록: 이진 랜덤(random) 비트를 생성한다.
- 심볼 매핑 블록: DVB-S2 표준 기반 BPSK, QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK 변조 방식을 선택한다. BPSK는 1비트, QPSK 2비트, 8PSK 3비트, 16APSK는 4비트 그리고 32APSK는 5비트 입력으로 심볼 매핑을 수행한다. 단, 16APSK와 32APSK의 경우 각각 2개, 3개 링(ring)의 성좌도 비율 값을 입력한다.
- AWGN 잡음 생성 블록: 평균 심볼 에너지의 값은 1로 간주하고, 잡음 분산(noise variance) 값에 따라 SNR을 계산한다.
- 위상잡음 생성 블록: 위상 변화량의 분포는 Gaussian 모델을 적용하고, 분산값에 따라 위상잡음의 신호대 잡음비(SNR)를 계산한다.
- 심볼 경관정 블록: 심볼 매핑 블록에서 설정한 각 변조 방식별 수신 심볼에 대해 심볼-비트 변환을 수행한다.
- 수신 비트 추출 블록: 심볼 경관정 블록에서 출력된 비트 값을 BER 계산 블록으로 전달한다.
- BER 계산 블록: 랜덤 비트 생성 블록에서 생성된 송신 비트와 수신 비트 추출 블록에서 출력된 수신 비트를 비교하여 오율(BER)을 계산한다.

#### IV. M-ary APSK 위상잡음 영향 분석

##### 4.1. PSK 변조 신호의 위상잡음 영향 평가

위상잡음의 영향을 분석하는 모의 분석 모델의 적합성을 평가하기 위하여 PSK 변조 방식에 대한 위상잡음 영향을 분석한다. 분석된 결과는 해석적 모델인 식 (4)에 의한 위상잡음 영향과 비교 평가한다.

그림 5와 그림 6, 그리고 그림 7은 BPSK, QPSK, 그리고 8PSK 변조 신호에 대한 해석적 모델과 모의 분석 모델에 의한 위상잡음 영향을 나타내었다. 그림 5~그림 7로부터 모의 분석 모델에 의한 위상잡음 분석 결과는 해석적 모델에 의한 결과와 1% 이내의 오차 범위내에서 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 모의 분석 모델은 M-ary APSK 변조 방식에 대한 위상잡음 영향을 적합하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

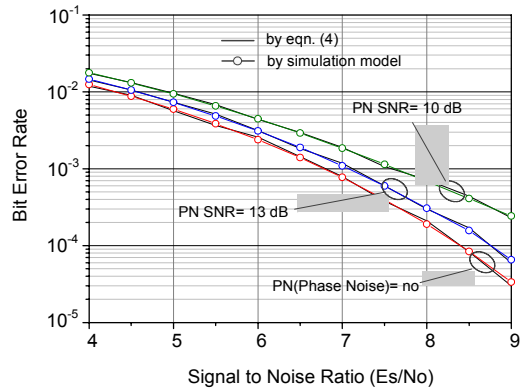


그림 5. BPSK 변조 신호에 대한 위상잡음 영향도  
Fig. 5 Phase noise effects for BPSK signal

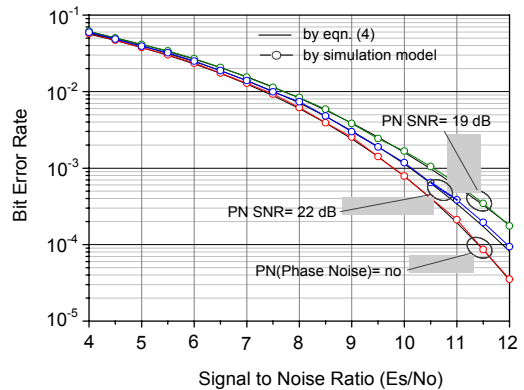


그림 6. QPSK 변조 신호에 대한 위상잡음 영향도  
Fig. 6 Phase noise effects for QPSK signal

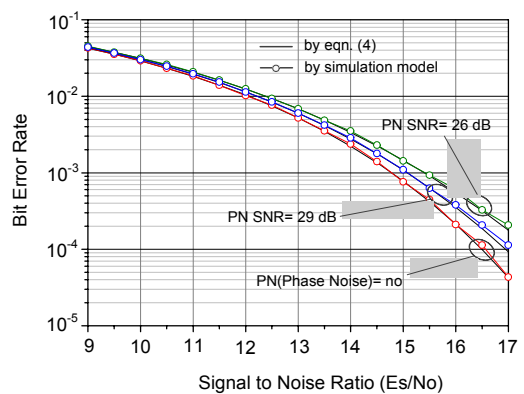


그림 7. 8PSK 변조 신호에 대한 위상잡음 영향도  
Fig. 7 Phase noise effects for 8PSK signal

4.2. M-ary APSK 변조 신호의 위상잡음 영향 분석

적합하게 위상잡음 영향을 산출하는 모의 분석 모델을 사용하여 APSK 변조 신호의 위상잡음 영향을 분석한다. 그림 8은 모의 분석 모델에 의해 발생된 위상잡음이 포함된 16APSK 신호의 성상도를 나타내고 있다.

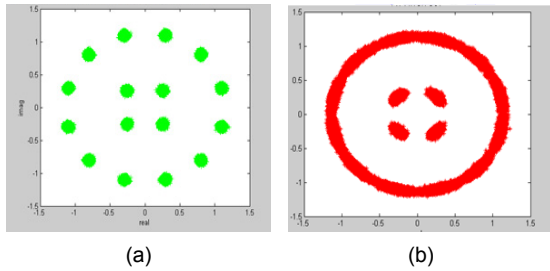


그림 8. 모의분석 모델에 의한 신호 성상도 (a) AWGN 첨가된 신호 (b) 위상잡음이 첨가된 신호  
 Fig. 8 Generated signal constellation by simulation model (a) signal with AWGN (b) signal with phase noise

그림 8로부터 위상잡음에 의해 16APSK 변조 신호가 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 16APSK와 32APSK 변조 신호의 위상잡음 영향을 보여주고 있다. 여기서,  $G(G_1, G_2)$ 는 내부 링 성좌도와 외부 링 성좌도 간의 비율( $\gamma$ )이며, PN SNR은 위상잡음의 신호대 잡음비를 나타낸다.

그림 9로부터 16APSK인 경우, 내부 링 성좌도와 외부 링 성좌도 비율에 따라  $10^{-3}$  BER 기준에서 약 0.4 dB 성능차가 발생함을 알 수 있다. 32APSK에서는  $10^{-3}$  BER 기준에서 약 0.65 dB의 성능차가 발생한다. 동일한 오류(BER) 기준에서 내·외부 성좌도의 비율이 증가할수록 요구 심볼 신호대 잡음비가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 여기서는 최대 오류 특성을 갖는 내·외부 성좌도 비율( $G=3.15, G_1=2.84, G_2=5.27$ )을 고려하여 분석한다.

표 1과 표 2는 모의 분석 모델에 의해 전송 방식별 서비스 성능(loss)에 대한 요구 위상잡음의 신호대 잡음비를 산출한 결과를 나타내고 있다. 모의 분석 모델에 의해 산출된 표 1의 위상잡음 신호대 잡음비 성능지표는 해석적 방식에 의해 산출된 BPSK, QPSK, 그리고 8PSK 변조방식의 위상잡음에 대한 서비스 성능별 요구 위상잡음의 신호대 잡음비와 동일한 특성을 갖는다.

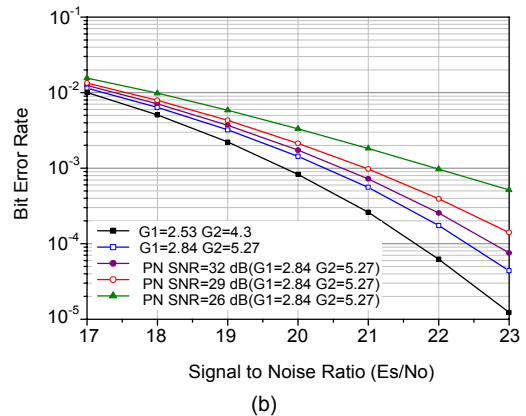
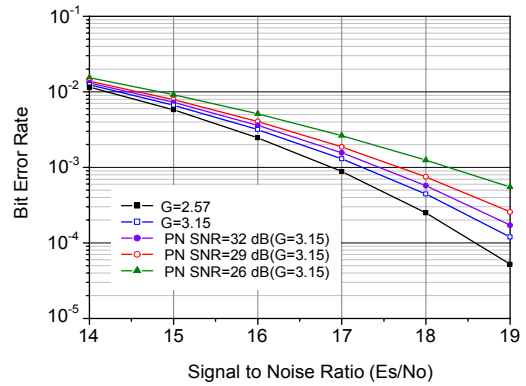


그림 9. M-ary APSK 변조 신호의 위상잡음 영향 (a) 16APSK 위상잡음 영향 (b) 32APSK 위상잡음 영향  
 Fig. 9 Phase noise effects for M-ary APSK modulation signals (a) effect of phase noise for 16APSK (b) effect of phase noise for 32APSK

표 1. M-ary PSK 서비스 품질에 대한 요구 위상잡음 신호대 잡음비  
 Table. 1 Required phase noise signal-to-noise ratio for M-ary PSK according to service quality

Modulation	BPSK (dB)	QPSK (dB)	8-PSK (dB)
$10^{-3}$	0.1	16.8	26.7
	0.2	14.3	23.8
	0.3	12.9	22.2
$2 \times 10^{-4}$	0.1	16.9	27.8
	0.2	14.5	24.9
	0.3	13.2	23.3
$10^{-4}$	0.1	17.0	28.2
	0.2	14.6	25.3
	0.3	13.4	23.7

**표 2.** M-ary APSK 서비스 품질에 대한 요구 위상잡음 신호대 잡음비

**Table. 2** Required phase noise signal-to-noise ratio for M-ary APSK according to service quality

Modulation	BER	Loss(dB)	16APSK (dB)	32APSK (dB)
10 <sup>-3</sup>	0.1		34.4	35.6
	0.2		31.3	32.7
	0.3		29.9	31.1
2x10 <sup>-4</sup>	0.1		36.4	36.9
	0.2		33.4	33.8
	0.3		31.7	32.4
10 <sup>-4</sup>	0.1		36.7	38.1
	0.2		33.7	34.6
	0.3		31.8	33.0

표 2의 16APSK와 32APSK의 경우, 서비스 성능별 요구위상잡음의 신호대 잡음비는 내·외부 성좌도 비율에 대한 상관 관계가 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 16APSK와 32APSK 변조 방식의 위상잡음에 의한 요구 서비스 성능에 대한 위상잡음의 신호대 잡음비는 표 2의 산출된 신호대 잡음비(SNR)로 고려할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 M-ary APSK 변조 방식을 사용하는 통신시스템의 위상잡음에 의한 성능 열화도를 분석하였다. 고차 변조 방식의 위상잡음 성능을 해석하기 위하여 APSK 내·외부 링 성좌도 비율을 고려하여 성능 분석 모델을 작성하고 위상잡음 영향을 모의 분석하였다. 저차 모드인 M-ary PSK 변조 방식에 대한 해석적 방법과 비교 분석하여 1% 이내의 일치하는 특성을 갖는 모의 분석 모델을 평가하였으며, APSK 고차 변조 방식에 대한 서비스 성능별 요구 위상잡음의 신호대 잡음비를 산출하여 제시하였다. 요구 위상잡음 신호대 잡음비는 시스템 설계 및 서비스 성능 평가에 적용할 수 있는 설계 및 평가 지표로 활용할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT/SW 창의연구과정의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0502-13-1067)

## REFERENCES

- [1] Shoudong Wang, et al, "Research on predistortion technology based on look-up table for 16APSK in satellite channel", in *Proceeding of the Inter. Conf. on CSCC*, pp. 4013 - 4016, 2011.
- [2] Young-wan Kim and Dong-chul Park, "Prediction of Performance Loss Due to Phase Noise in Digital Satellite Communication System," *JKIEES*, vol. 13, no. 7, pp. 679-686, 2002.
- [3] V. Syrjala, M. Valkama, L. Anttila, T. Riihonen and D. Korpi, "Analysis of phase noise effect on microwave attenuation precision measurement using a heterodyne receiver," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1-14, 2014.
- [4] Wei Zhu, Haiying Meng and Liming Mao, "A low phase noise local oscillator module for instrumentation application," in *Proceeding of the IEEE International Wireless Symposium*, Beijing, pp. 1-4, 2013.
- [5] Young-wan Kim and Jae-du Yu, "Phase Noise Model of Single Loop Frequency Synthesizer," *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 54, no. 1, pp. 112 - 119, 2008.
- [6] M. Pardo, L. Sorenson and F. Ayazi, "An Empirical Phase-Noise Model for MEMS Oscillators Operating in Nonlinear Regime," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, vol. 59, no. 5, pp. 979 - 988, 2012.
- [7] Jae-min, Shon, Bit error probability of M-ary APSK modulation with circular signal constellation in AWGN channel, Master degree dissertation, Hanyang University, 2003.



**김영완(Young-wan Kim)**

1983년 경북대학교 전자공학사  
1985년 경북대학교 전자공학석사  
2003년 충남대학교 전자공학박사  
1984 ~ 1990년 동양정밀공업(주) 중앙연구소 과장  
1990 ~ 1992년 (주) 유영통신 이사  
1992 ~ 2004년 한국전자통신연구원 책임연구원  
2004 ~ 현재 군산대학교 전파공학과 교수  
※관심분야 : RF/Microwave 시스템 및 회로설계, 디지털 위성방송/통신시스템, 마이크로파 소자