

위상 잡음이 수신 신호에 미치는 영향에 관한 연구

정준영, 이제원, 이상욱, 황유라

한국전자통신연구원

{jungjy, jw_lee, slee, ylhwang}@etri.re.kr

A Study on the effect of phase noise on the received signal

Joon-Young Jung, Jae-Won Lee, Sang-Uk Lee, Yoola Hwang

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문에서는 위상 잡음이 실제 무선 통신시스템에서 수신되는 신호에 미치는 영향을 분석함으로써 송신기와 수신기에서 요구하는 위상 잡음의 구체적인 규격 설정에 적용할 수 있는 위상 잡음 모델링 및 모의 실험 방법을 제시한다. 이를 위해 전송 채널의 잡음 레벨에 따라 위상 잡음이 수신 신호에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하였다. 특히 실제 사용되는 PLL의 위상 잡음 스펙트럼 마스크를 위상 잡음으로 모델링하여 이를 전송 신호에 적용함으로써 열화 정도를 측정하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

I. 서론

무선 통신시스템에서 원하는 채널로 신호를 전송하고 수신하기 위해 송신기 및 수신기에서는 해당 채널의 반송파 주파수를 생성하는 PLL(Phase Locked Loop)을 사용한다. PLL은 발진기로부터 기준 클럭 신호를 수신하여 필요한 주파수의 신호로 일정하게 유지시켜 주는 회로이며 중요한 지표 중 하나는 위상 잡음이다. PLL에서 생성한 이상적인 신호는 하나의 주파수 성분만 가지는 정현파가 되며, 이 경우 주파수 스펙트럼에서는 델타 함수로 표현될 것이다. 하지만 실질적인 PLL 출력 신호에 대한 스펙트럼을 살펴보면 반송파 주파수를 중심으로 여러 주파수 대역에 걸쳐 신호 전력을 가지게 되고, 반송파 주파수를 제외한 대역의 신호 전력을 위상 잡음이라 한다.

위상 잡음의 주요 발생 원인으로는 기계적 충격, 진동, 온도와 같은 물리적 환경과 flicker noise(1/f noise)로 알려진 반도체 물성으로 인해 소자가 가지는 자체적인 특성이 있다. 위상 잡음의 영향성에 관한 연구는 많은 분야에서 다루어져 왔으며, 특히 무선 통신 분야에서 많은 연구가 이루어졌다 [1, 2]. 하지만 실제 시스템에서 송신기 또는 수신기의 구현을 위해 PLL의 위상 잡음 요구규격을 정할 때 그 기준을 정하는 것이 쉽지 않다.

본 논문에서는 위상 잡음이 실제 무선 통신시스템에서 수신되는 신호에 미치는 영향을 분석함으로써 구체적인 규격 설정에 적용하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 실제 전송 채널의 잡음 레벨에 따라 위상 잡음이 수신 신호에 어떻게 영향을 미치는지를 분석하였다. 특히 실제 사용되는 PLL의 위상 잡음 스펙트럼 마스크를 위상 잡음으로 모델링하여 이를 전송 신호에 적용함으로써 열화 정도를 측정하는 방법으로 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

II. 위상 잡음 모델링

위상 잡음은 일반적으로 반송파 주파수에서 일정 주파수(오프셋) 떨어진 곳에서의 신호 반송파 전력에 대한 잡음 전력스펙트럼밀도의 대수비로 나타낸다. 표 1은 PLL의 출력 신호에 대한 위상 잡음 스펙트럼 마스크 예를

보여준다. 위상 잡음 스펙트럼 마스크는 표 1과 같이 오프셋 주파수에서 SSB(Single Side Band) 위상 잡음의 크기로 표현된다.

표 1. 위상 잡음 스펙트럼 마스크 예

Offset from Carrier (Hz)	SSB Phase Noise (dBc/Hz)
10	- 65.0
100	- 81.0
1k	- 91.0
10k	- 95.0
100k	- 100.0
1000k	- 110.0

표 1에 제시된 위상 잡음 스펙트럼 마스크를 이용하여 위상 잡음을 모델링하는 과정은 다음과 같다.

먼저, 오프셋 주파수에서의 위상 잡음 크기를 위상 잡음의 전력 스펙트럼으로 가정하고, 표1에 제시된 전체 대역에 대해 M개의 등간격으로 나눈다. 그리고 각각의 M개 등간격 포인트에 대해 전력 스펙트럼을 로그 스케일로 보간한다.

다음으로 M개의 등간격 포인트에 보간된 전력에 대해 스펙트럼 계수(Spectral Coefficients), $X(m) = \sqrt{P(m)dF(m)}$ 를 구하여 위상 잡음을 표현하는 데 필요한 주파수 형상을 얻는다. 여기서 $P(m)$ 은 m번째 포인트에서의 보간된 전력이며 $dF(m)$ 은 등간격으로 나눈 주파수 간격이다.

그리고, 주파수 영역에서 전력 1의 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 생성하고, 이를 앞에서 구한 주파수 형상에 샘플별로 곱하여 위상 잡음을 생성한다.

마지막으로 생성된 주파수 영역의 위상 잡음에 대해 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)을 수행하여 $x(t)$ 를 얻고, 이를 통해 식(1)과 같이 시간 영역의 위상 잡음을 생성하게 된다.

$$phase\ noise = \exp(j \times real(x)) \quad (1)$$

여기서, x 가 작은 값을 가지는 경우를 가정한다면 식(2)와 같이 근사할 수

있다.

$$phase\ noise = 1 + j \times real(x) \quad (2)$$

그림 1은 입력으로 제공한 위상 잡음 스펙트럼 마스크와 모델링한 위상 잡음을 비교한다. 식(1)과 (2) 모델링 모두 유사한 결과를 보이지만 식(2)의 근사 모델이 높은 주파수에서 더 실제 값에 일치한다는 것을 알 수 있다.

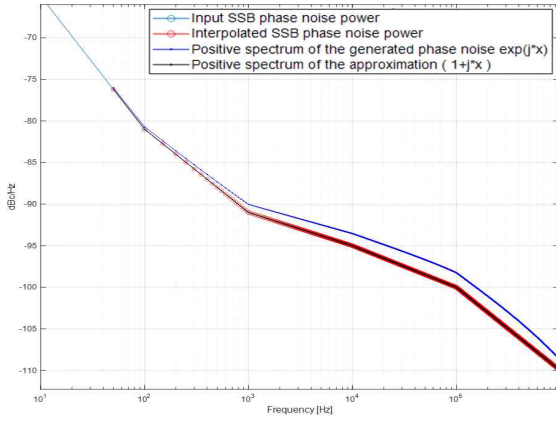


그림 1. 위상 잡음 스펙트럼 마스크와 모델링한 위상 잡음 비교

III. 모의 실험

위상 잡음이 수신 신호에 미치는 영향을 분석하기 위해 앞에서 모델링한 위상 잡음을 이용하여 그림 2와 같은 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 변조된 신호에 위상 잡음을 더하고 AWGN 채널에 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 변화시키며 수신 신호의 품질을 측정하는 과정으로 이루어진다.

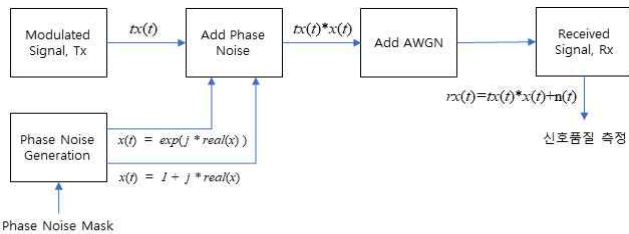


그림 2. 위상 잡음 시뮬레이션 환경

그림 3, 그림 4, 그림5는 각각 AWGN의 SNR이 60dB, 40dB, 30dB일 때 위상 잡음이 없는 경우(a)와 위상 잡음이 있는 경우(b)를 비교하여 보여준다. 그림 3부터 그림 5까지 살펴보면 SNR이 낮아짐에 따라 위상 잡음의 영향이 줄어들어 가는 것을 쉽게 알 수 있다. 표 2의 수치 결과를 분석해 보면 SNR 60dB에서는 위상 잡음의 영향으로 20dB 정도의 EVM 열화를 보여주지만, SNR 30dB에서는 약 0.5dB의 열화만 발생하는 확인할 수 있다.

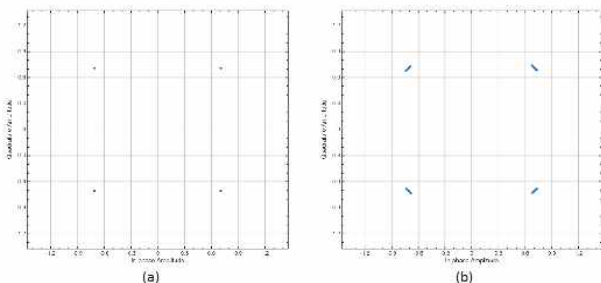


그림 3. SNR=60dB에서 수신 신호, (a)위상 잡음 없음, (b)위상 잡음 있음

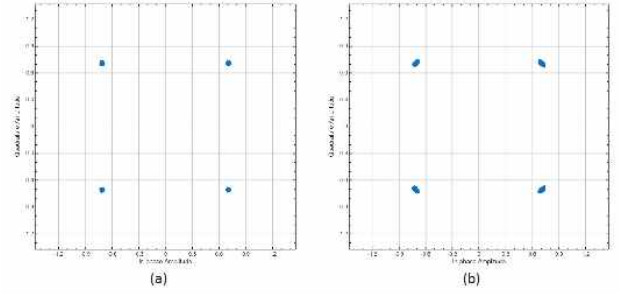


그림 4. SNR=40dB에서 수신 신호, (a)위상 잡음 없음, (b)위상 잡음 있음

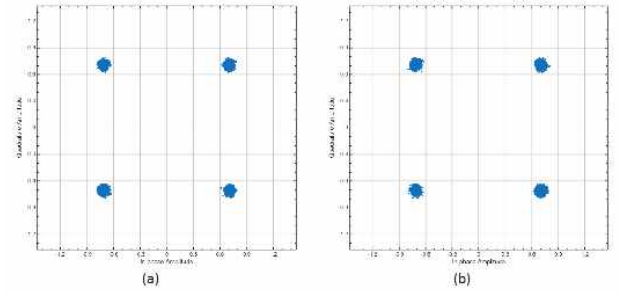


그림 5. SNR=30dB에서 수신 신호, (a)위상 잡음 없음, (b)위상 잡음 있음

표 2. SNR에 따른 위상 잡음의 신호 열화 결과 (PN: Phase Noise)

	@SNR=60dB		@SNR=40dB		@SNR=30dB	
	no PN	add PN	no PN	add PN	no PN	add PN
RMS EVM(%)	0.10	1.08	1.00	1.43	3.18	3.35
피크 EVM(%)	0.33	4.64	3.11	5.16	10.01	10.56
평균 EVM(dB)	-59.98	-39.26	-40.00	-36.87	-29.96	-29.50
피크 EVM(dB)	-49.69	-26.67	-30.13	-25.75	-19.99	-19.53
평균 MER(dB)	59.98	39.26	40.00	36.87	29.96	29.50

III. 결론

본 논문에서는 위상 잡음이 실제 무선 통신시스템에서 수신되는 신호에 미치는 영향을 분석하였다. 특히 실제 PLL의 위상 잡음 스펙트럼 마스크 규격을 위상 잡음으로 모델링하고 이를 변조 신호에 적용하여 채널 잡음을 거쳐 수신된 신호의 수신 열화 정도를 모의실험 하였다. 실험을 통해 채널의 잡음 레벨이 증가함에 따라 위상 잡음의 영향이 줄어든다는 것을 확인하였다. 즉 채널 잡음으로 인해 수신 시 확보할 수 있는 SNR 정도에 따라 위상 잡음에 대한 규격을 정할 수 있다는 것이다. 이와 같이 제시한 위상 잡음 모델링 및 모의실험 방법은 실제 통신시스템을 구축하고자 할 때 위상 잡음에 대한 구체적인 규격 설정에 도움이 될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2022-00165951)

참고 문헌

[1] Isabel K., Herbert K., Nils P., "VCO Design With Uniformly Low Phase Noise Versus Frequency and Temperature for D-Band Applications," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2024.

[2] J. Martens, "On downconverter noise characterization for LO waveform sensitivities," 102nd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), 2024