

시뮬레이터를 이용한 CATV 전송시스템 위상잡음성능 개선에 관한 연구

이 용 우*, 오 승 엽*, 장 상 현**, 이 일 규** 정회원

A study on the phase noise performance improvement of CATV transmission system using the simulator

Yong-woo Lee*, Seung-hyeub Oh*, Sang-hyun Chang**, Il-kyoo Lee** *Regular Members*

요 약

최근 전자 정보 통신 기술의 발전으로 개인이 요구하는 정보의 전송량도 증가하고 있다. 특히 CATV의 전송량 증가에 따른 전송 성능의 향상이 불가피하다. 따라서 본 논문에서는 DOCSIS(Data-Over-Cable Service Interface Specifications) 2.0 요구 규격을 만족하는 CATV 전송 시스템에서 Bit Error Rate(BER)에 따른 최적의 Signal to Noise Ratio(SNR) 성능 요구 특성을 얻기 위한 위상 잡음 특성을 분석하였다. 특히 개발된 시뮬레이터를 이용하여 CATV 전송 시스템 위상 잡음 특성 요구 규격을 만족하는 Phase Locked Loop(PLL) 구성 요소 파라미터 값들을 도출하였다. 제시된 방법은 향후 초고속 CATV 전송 시스템의 위상잡음 관련 성능 요구 규격 도출에 이용될 수 있다.

Key Words : CATV; DOCSIS; BER; SNR; PLL.

ABSTRACT

Recently, the transmission amount of information that each single person requires is growing by development of electron information communication technology. So in this paper we analysis the phase noise characteristics to obtain a most suitable of SNR performance request characteristic by BER on CATV transmission system that satisfy performance request DOCSIS 2.0 standard. Especially we get the parameter value of PLL that satisfy phase noise characteristic request standard using developed simulator. Presented method can be used to obtain a performance request standard connection performance request standard of high speed CATV transmission system in the future.

I. 서 론

최근 정보통신기술의 발전으로 개인은 유무선 통신, 멀티 미디어 방송, 인터넷 서비스를 통합한 품질 보장형 서비스를 요구하며 이에 따른 정보의 전송량도 증가하고 있다. 특히 CATV망을 사용하는 기존 서비스에서의 전송량 증가는 전송 성능의 향상을 필요로 하게 되었다. 이러한 효율적인 CATV 전송 시스템 개발을 위해서는 무엇보다도 RF(Radio Frequency) 전송 시스템의 기능과 성능에 대한 시스템 파라미터 분석이 우선적으로 요구된다. 특히 RF 성능 파라미터 중에서 위상 잡음(Phase noise)에 의한 성능 열화와 이에 따

른 성능 개선 요구 사항 등이 정확히 파악되어야만 실제 CATV 전송 시스템 단말기의 설계 및 제작이 가능하게 되는 것이다[1][2].

CATV 전송 시스템의 성능 향상을 위해서는 우선적으로 PLL(Phase Locked Loop)에서 발생하는 위상 잡음을 줄일 필요성이 있다. 현재 PLL은 디지털 신호들로부터 clock 회복, 위성 송신 신호로부터 carrier 회복, 주파수와 위상의 변/복조 수행, 수신기 동조를 위한 주파수를 합성하는 등 주로 통신응용에 사용되고 있다[3]. 본 논문에서는 개발된 위상 잡음 분석 시뮬레이터를 이용하여 DOCSIS 2.0 요구 규격에 기반을 둔 CATV 전송 시스템의 위상 잡음 특성 요구 규격을 만족하는 PLL 구성 요소 파라미터 값들을 도출하였다. 도

* 충남대학교 전자공학과(rainwoo2@korea.com, ohseung@cnu.ac.kr), ** 공주대학교 정보통신공학과 RFCS 연구실(peters@kongju.ac.kr, leeik@kongju.ac.kr) 접수일자 : 2009년 9월 26일, 수정완료일자 : 2009년 12월 30일, 최종게재확정일자 : 2010년 1월 5일

출된 파라미터 값들에 의해 발생하는 위상 잡음이 SNR에 주는 영향을 알아보고, SNR의 향상을 위한 PLL 구성 요소들의 파라미터 값들에 대해 알아보았다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 개발된 시뮬레이터의 잡음 모델식을 알아보고, 3절에서는 개발된 시뮬레이터를 DOCSIS 2.0 요구 규격에 기반을 둔 CATV 전송 시스템에 적용했을 경우의 위상 잡음 관련 특성을 알아본다. 4절에서는 3절에서의 PLL 구성 요소 파라미터 값들의 변경을 통한 BER에 따른 SNR의 향상에 대해 알아본다.

II. Phase noise modeling of Phase noise simulator

PLL이란 위상 고정 루프로써 출력 신호 주파수를 항상 일정하게 유지하도록 구성된 주파수 부귀환 회로이다. PLL의 기본 구성은 그림 1과 같다.

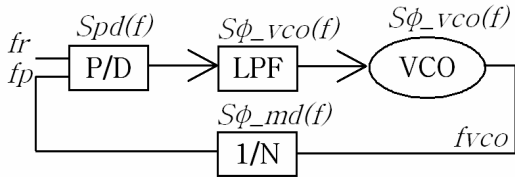


그림 1. PLL 기본 구성

위상 잡음 스펙트럼 밀도는 비선형적으로 감소하며 주파수 영역 0에서 -40 dB/dec의 기울기로 나타난다. 전형적인 위상 잡음 식은 다음과 같다[4].

$$S\phi(f) = k_0 + \frac{k_1}{f} + \frac{k_2}{f^2} + \frac{k_3}{f^3} + \frac{k_4}{f^4} \quad (1)$$

식 (1)의 첫째 항(\$k_0\$)은 기울기가 0 dB/Hz인 열잡음(Thermal noise)이고, 두 번째 항(\$k_1/f\$)은 기울기가 -10 dB/Hz인 플리커 잡음(Flicker noise)이다. 잡음원들은 위와 같이 열잡음과 플리커 잡음들의 합의 형태로 나타난다. 잡음원들의 모델들은 오프셋(Offset) 주파수 영역에서 각각 다른 기울기를 가지며 특성 또한 각각 다르다. 이와 같은 형태로 레퍼런스 발진기, VCO, 분주기의 잡음 모델식을 나타낼 수 있다.

PLL 회로에서 사용하는 필터는 그림 2와 같이 능동필터와 수동필터 2 종류가 있으며, 각각의 저항과 OP-Amp로부터 발생하는 잡음을 모델링하였다.

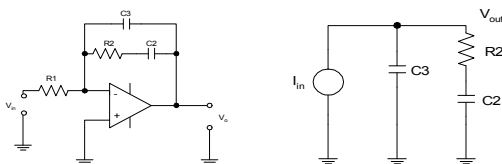


그림 2. 능동/수동 필터

저항 잡음 모델식에서는 식 (2)와 같은 백색잡음, 즉 열잡음(Thermal noise)을 고려해야한다.

$$Pr(R) = k_{0R} = 4kTBR = S\phi_{-R}(f) \quad (2)$$

여기서 사용한 Pr은 열잡음이고, k는 볼츠만 상수, T는 절대온도(K)이다. 그리고 B는 필터의 대역폭(Hz)이며, R은 저항 값이다. OP-Amp 잡음은 크게 플리커 잡음(Flicker noise)과 열잡음 두 가지 유형이 있다. OP-Amp 잡음식은 식 (3)과 같다.

$$S\phi_{op-amp}(f) = k_{0op-amp} + \frac{k_{1op-amp}}{f} \quad (3)$$

PLL의 구성 요소별 잡음 모델식은 각각의 위상 잡음과 페루프 전달함수의 곱으로 나타나며, 이들의 총 합으로 PLL 총 위상 잡음을 나타낼 수 있다. 능동/수동 저역 필터 총 잡음 모델식은 각각 다음과 같다.

$$S_{total}(f) = S + mul_out(f) + S_{A_fil_out}(f) + S_{vco_out}(f) \quad (4)$$

$$S_{total}(f) = S + mul_out(f) + S_{P_fil_out}(f) + S_{vco_out}(f) \quad (5)$$

CATV 전송 시스템에서 이론적인 BER(Bit Error Rate)값은 식 (6)을 통해 구할 수 있다.

$$P(S/N) = \frac{1 - [1 - 2(1 - \frac{1}{\sqrt{M}})Q(\sqrt{\frac{3S}{N} \frac{M-1}{M}})]}{\log_2 M} \quad (6)$$

식 (6)에서 M은 M-QAM을 의미하며, S/N은 신호 대 잡음비를 나타낸다. 또한 누적 위상 잡음 값은 식 (7)을 통해 구할 수 있다[5].

$$\Delta dB = 10 \log(1 + 10^{\frac{-\Delta N}{10}}) \quad (7)$$

식 (7)에서 \$\Delta N\$은 (SNR-총 위상 잡음 값)을 나타낸다

III. Phase noise modeling of Phase noise simulator

본 절에서는 CATV 전송 시스템에서 사용하는 전송 규격 중 DOCSIS 2.0 규격을 적용하였을 경우의 위상 잡음 특성을 알아본다. DOCSIS 2.0 규격의 위상 잡음 요구 값은 세 가지 밴드에서 각각 다르다. 표 1은 기준으로 삼은 DOCSIS 2.0 규격의 밴드별 위상 잡음 값을 나타낸다.

표 1. DOCSIS 2.0 Phase noise 규격

Phase Noise	1kHz~10kHz : -33 dBc DS noise power
	10kHz~50kHz : -51 dBc DS noise power
	50kHz~1MHz : -51 dBc DS noise power

2절의 잡음 모델식을 기반으로 DOCSIS 2.0의 위상 잡음 규격을 만족시키는 PLL 구성 요소들의 파라미터 값들을 상용 PLL의 값을 기초로 표 2와 같이 설정하였다.

표 2. DOCSIS 2.0 규격 시뮬레이션 파라미터

K_vco	$K0_vco = 10^{-15.5}, K1_vco=10^{-3}, k2_vco=10^{-0.7}$
K_md	$K0_md = 10^{-15.5}, K1_md=10^{-12.5}$
K_ref	$K0_ref = 10^{-15.5}, K1_ref=10^{-12.7}, K2_ref=10^{-9.86}, K3_ref=10^{-7.82}$
K_R	$K0_R1 = 10^{-12.64}, K0_R2=10^{-12.92}$
K_op	$K0_OP = 10^{-17.045}, K1_OP=10^{-16.02}$
Kp	KP = 0.001
N	N = 1000
Kv	$Kv = 10^8$
R	R1 / 10
R	R1 = 5620, R2 = 2940
C	$C2 = 0.6 \cdot 10^{-9}, C3=0.6 \cdot 10^{-9}$

표 2의 파라미터 값들과 전송 신호 대역폭이 3 MHz 일 때의 PLL 총 위상 잡음과 누적 위상 잡음 시뮬레이션 결과는 다음 그림 3과 같다.

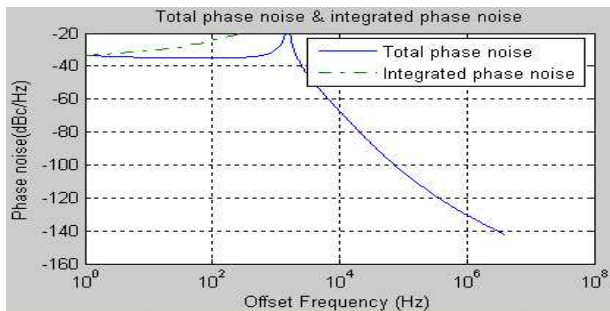


그림 3. 총 위상 잡음과 누적 위상 잡음(능동 필터)

그림 3에서 1 kHz~10 kHz 대역에서의 총 위상 잡음 값은 -33 dBc/Hz 이며, DOCSIS 2.0 위상 잡음 규격을 만족함을 알 수 있다. 또한 총 위상 잡음 값을 식 (7)에 적용하였을 경우 누적 위상 잡음 값을 구할 수 있다.

구하여진 누적 위상 잡음 값을 식 (6)에 적용하였을 때의 BER에 따른 SNR을 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 3MHz의 전송 신호 대역폭에서의 누적 위상 잡음 값 9.42 dBc를 입력하였을 때, 64/256 QAM 별 BER에 따른 SNR을 알 수 있다. 그림 5는 시뮬레이션 최종 결과를 수치적으로 표현한 그림이다.

그림 5를 통해 전송 신호 대역폭이 3 MHz 일 때 누적 위상 잡음 값은 9.42 dBc임을 알 수 있고 64/256 QAM에서의 BER에 따른 SNR Loss를 확인할 수 있다.

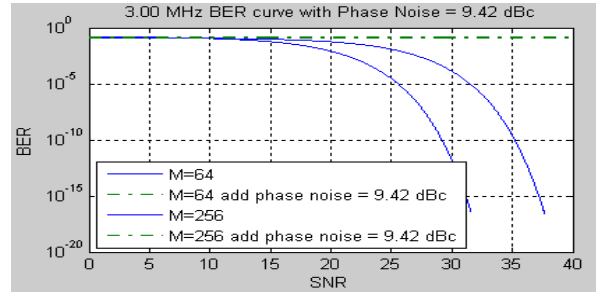


그림 4. 누적 위상 잡음 값이 9.42 dBc/Hz 일 때, 64/256 QAM의 BER에 따른 SNR 성능

3.00 MHz BandWidth		
Accumulated Phase noise : 9.42 dBc		
	64QAM	256QAM
SNR Loss at BER = 10^{-4}	15.70 dB	9.76 dB
SNR Loss at BER = 10^{-8}	11.94 dB	5.94 dB
Fin = 10.00 MHz		
Fvco = 1000.00 MHz		

그림 5. 시뮬레이션 결과

IV. 파라미터 변경을 통한 SNR 향상

DOCSIS 2.0 규격에서 제시한 BER=10⁻⁸일 때의 QAM별 SNR Loss는 표 3과 같다.

표 3. BER=10⁻⁸일 때의 QAM별 SNR Loss

	SNR of BER=10 ⁻⁸
64 QAM	23.5 dB or greater
256 QAM	33 dB or greater

표 3의 QAM별 BER은 Implementation Loss를 고려한 값이다. 본 논문에서는 CATV 전송 시스템 중 Carrier 신호의 PLL만 고려하였기 때문에 제시된 SNR값과는 약간의 오차가 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서의 QAM별 SNR Loss는 그림 4의 이상적인 BER curve(Blue line)를 기준 값으로 정하였다.

BER에 따른 SNR Loss를 줄이기 위해서는 PLL에서 발생되는 누적 위상 잡음 값과 총 위상 잡음 값을 줄여야 한다. PLL 구성 요소 각각의 총 위상 잡음 값을 줄이기 위한 PLL 구성 요소들의 최적의 파라미터 값들을 표 4와 같이 설정하였다.

표 4의 파라미터 값들과 3 MHz의 대역폭의 전송 신호를 입력 할 때의 PLL 총 위상 잡음과 누적 위상 잡음 시뮬레이션 결과는 다음 그림 6과 같다.

그림 6에서 1 kHz~10 kHz 대역에서의 총 위상 잡음 값이 -33 dBc/Hz 이하이며, DOCSIS 2.0 위상 잡음 규격을 만족함을 알 수 있다. 구하여진 총 위상 잡음 값과 누적 위상

잡음 값을 적용하였을 때 BER에 따른 SNR을 그림 7에 나타내었다.

표 4. 최적의 시뮬레이션 파라미터

K_vco	$K0_vco = 10^{-15.5}, K1_vco=10^{-3}, k2_vco=10^{-0.7}$
K_md	$K0_md = 10^{-15.5}, K1_md=10^{-12.5}$
K_ref	$K0_ref = 10^{-15.8}, K1_ref=10^{-12.7}, K2_ref=10^{-9.86}, K3_ref=10^{-7.82}$
K_R	$K0_R1 = 10^{-12.64}, K0_R2=10^{-12.92}$
K_op	$K0_OP = 10^{-17.045}, K1_OP=10^{-16.02}$
Kp	KP = 0.5
N	N = 1000
Kv	$Kv = 10^8$
R	R1 / 10
R	R1 = 5620, R2 = 2940
C	$C2 = 6.8 \times 10^{-9}, C3=47 \times 10^{-9}$

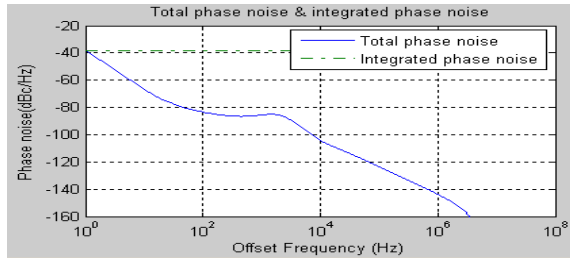


그림 6. 총 위상 잡음과 누적 위상 잡음(능동 필터)

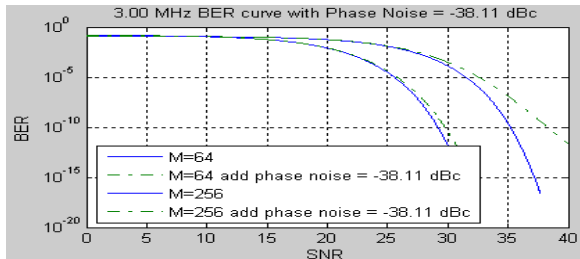


그림 7. 누적 위상 잡음 값이 -38.11 dBc/Hz 일 때, 64/256 QAM의 BER에 따른 SNR 성능

그림 7에서 3MHz의 전송 신호 대역폭에서의 누적 위상 잡음 값 -38.11 dBc/Hz를 입력하였을 때, 64/256 QAM 별 BER에 따른 SNR을 알 수 있다. 그림 8은 모든 시뮬레이션 결과를 수치적으로 표현한 그림이다.

3.00 MHz BandWidth		
Accumulated Phase noise : -38.11 dBc		
	64QAM	256QAM
SNR Loss at BER = 10^{-4}	0.16 dB	0.62 dB
SNR Loss at BER = 10^{-8}	0.36 dB	1.70 dB
Fin = 10.00 MHz		
Fvco = 1000.00 MHz		

그림 8. 시뮬레이션 결과

그림 8을 통해 누적 위상 잡음 값 -38.11 dBc/Hz를 입력하였을 때 64/256 QAM에서의 BER에 따른 SNR Loss가 줄었음을 알 수 있다. 다음 표는 파라미터 값 변경에 따른 SNR Loss를 나타낸다.

표 5. 변경된 최적의 시뮬레이션 파라미터

QAM	SNR Loss at QAM			
	64		256	
	Before	After	Before	After
10^{-4}	15.70 dB	0.16 dB	9.76 dB	0.62 dB
10^{-8}	11.94 dB	0.36 dB	5.94 dB	1.70 dB

표 5에서의 결과로 PLL 구성 요소 파라미터 값 변경을 통하여 BER에 따른 SNR Loss의 성능 향상을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 DOCSIS 2.0 요구 규격을 만족하는 CATV 전송 시스템에서 BER에 따른 최적의 SNR 성능 요구 특성을 얻기 위한 위상 잡음 특성을 분석하였다. 먼저 시뮬레이션을 통해 DOCSIS 2.0 잡음 요구 규격을 만족하는 PLL 구성 요소별 파라미터 값들을 도출하였고, 3 MHz 대역의 전송 신호를 입력할 때의 PLL 누적 위상 잡음 값이 9.42 dBc 임을 확인하였다. 이 누적 위상 잡음 값에 의해 256 QAM에서 BER= 10^{-8} 일 때의 SNR Loss는 약 5.94 dBc 알 수 있었다. DOCSIS 2.0 규격에서 제시한 SNR 요구 규격을 만족하기 위해 PLL 구성요소들의 파라미터 값들을 변경함으로써 전체적인 위상 잡음 값을 낮추었다. 시뮬레이션 결과 누적 위상 잡음 값이 -38.11 dBc/Hz로 감소하였으며, 256 QAM에서 BER= 10^{-8} 일 때의 SNR Loss는 약 4.24 dB가 감소한 약 1.70 dB 임을 알 수 있었다. 따라서 PLL 구성 요소의 적절한 파라미터 값 변경을 통해 SNR Loss의 향상을 알 수 있었다. CATV 전송 시스템 구현시 좀 더 구체적인 파라미터들의 고려가 필요하지만 CATV 전송 시스템을 구성하는 요소 중 하나로서 최소한의 위상 잡음 관련 성능 요구 규격을 만족할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 설계 접근 방법은 향후 초고속 CATV 전송 시스템에서도 적용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Mark R. Simpson and John M. Dixon, "The application of Low Noise, X-band Synthesizers to QAM Digital Radios", *Microwave Journal*, pp. 10-14, July 1997.
- [2] Howald. R.L, "Analyzing Phase Power Spectral Density For Noise Power", *Microwaves & RF*, vol. 33110.6, pp. 94-98, June. 1994.

[3] W.C. Lindsey and C.M. Chie, Eds., "Phase locked Loops", *IEEE Press*: New York, pp 671-685, 1986.
 [4] Eric Drucker, "Model PLL Dynamics and Phase Noise Performance", *Microwaves & RF*, pp. 73-82, May 2000.
 [5] Robert Gilmore, "Specifying Local Oscillator Phase Noise Performance", *Qualcomm, Inc.*, pp. 4-5, September 1991.

저 자

이 용 우(Yong-Woo Lee) 정회원



1990년 2월 : 충남대학교 전자공학과 졸업
 1992년 2월 : 충남대학교 대학원 전자공학과 석사
 1999~현재 : 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정

<관심분야> RF 통신, 전파 간섭, 디지털 통신

오 승 엽(Seung-Hyeub Oh) 정회원



1973년 2월 : 연세대학교 전자공학과 석사
 1982년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 박사
 1984~현재 : 충남대학교 전자공학과 교수, KICS, KIEES, IEEE

<관심분야> 안테나 및 디지털 통신, RF Sub-System 분야 설계 등

장 상 현(Sang-Hyun Chang) 정회원



2006년 2월 : 공주대학교 전기전자정보공학과 졸업
 2009년 2월 : 공주대학교 대학원 정보통신공학과 석사
 2010년 2월 : 공주대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정

2008~현재 : ETRI 위촉연구원

<관심분야> RF 송수신시스템 설계, 분석

이 일 규(II-Kyoo Lee)

정회원



1994년 2월 : 충남대학교 대학원 전자공학과 석사
 2003년 2월 : 충남대학교 대학원 전자공학과 박사
 1997~2004 : ETRI 선임연구원
 2004~현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 부교수

<관심분야> RFID/USN 기술, 이동무선통신, 안테나 및 전파 전파, 통방융합기술, 전파 간섭