

디지털 오실로스코프를 이용한 위상잡음 측정방법

A Phase Noise Measurement Technique Using a Digital Oscilloscope

염 경 환 · 노 진 성

Kyung-Whan Yeom · Jin-Seong Roh

요 약

본 논문에서는 8-채널 디지털 오실로스코프 MXR608A와 Labview를 사용하여 위상잡음을 측정하는 새로운 방법을 제안한다. 본 논문의 방법은 디지털 오실로스코프로 측정된 파형에서 시간간격오류(time interval error: TIE)를 얻고, TIE로부터 위상잡음을 얻는 방법이다. 기존의 TIE를 이용한 위상잡음 측정방법은, 동일한 신호에 대해 얻어진 두 TIE를 교차상관하여 얻은 결과를 이용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 아날로그 신호를 디지털신호로 변환 시 추가된 ADC 클럭-지터의 영향을 제거하지 못한다. 본 논문에서는 ADC 클럭-지터를 제거하는 새로운 TIE 교차상관을 제안하고, 제안된 교차상관을 통해 위상잡음을 측정하였다. 본 방법으로 측정된 위상잡음의 정확도를 검증하기 위하여 위상잡음측정기인 E5052B를 사용하여 측정된 위상잡음과의 비교를 보였다. 주파수 1.4151 GHz 채널당 입력 전력 3 dBm 신호에 대해 두 방법으로 측정된 위상잡음은 오프셋 주파수 12 kHz~10 MHz에서 동일한 오프셋 주파수 응답특성을 보이며, 평균 0.2 dB 차이를 보였다.

Abstract

In this study, we propose a new method for measuring phase noise using an 8-channel digital oscilloscope, MXR608A, and the Labview software. The proposed phase noise measurement method obtains the time interval error (TIE) from a measured waveform using a digital oscilloscope; subsequently, it converts the TIE into phase noise. In the traditional phase-noise measurement method using TIE, the phase noise is obtained by cross-correlating two TIEs obtained from an identical signal. However, this method does not fundamentally remove the effect of the ADC clock jitter when converting an analog signal into a digital signal. This study proposes a novel cross-correlation method that eliminates the ADC clock jitter and measures phase noise using the proposed cross-correlation. To verify the accuracy of the phase noise measured by the proposed method, a comparison is performed for the phase noise measured using the phase noise equipment E5052B. The two measured phase noises for a signal with an input power of 3 dBm per channel at a frequency of 1.4151 GHz exhibit the same offset frequency response in the range of 12 kHz to 10 MHz with an average difference of 0.2 dB.

Key words: Phase Noise, Time Interval Error, Digital Phase Noise Measurement, Cross Correlation

「이 연구는 2019학년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1I1A3A0105686412).」

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

· Manuscript received February 7, 2022 ; Revised February 25, 2022 ; Accepted March 16, 2022. (ID No. 20220207-014)

· Corresponding Author: Kyung-Whan Yeom (e-mail: khyeom@cnu.ac.kr)

I. 서 론

디지털 오실로스코프는 오실로스코프의 한 종류로서, 측정된 아날로그 신호를 디지털신호로 바꾸는 아날로그-디지털 변환기(analog-to-digital converter: ADC)가 사용된다. 이로 인해 빠르고 복잡한 신호, 단발(single shot) 신호의 측정에 유리하며, 신호 저장 등이 가능하다. 또한, 최근 디지털 오실로스코프는 디지털 회로 또는 디지털 시스템으로부터 입력된 여러 개의 디지털신호를 수집하여 저장하고, 원하는 시점에 표시할 수 있는 로직분석기 기능도 수행할 수 있다. 디지털 오실로스코프는 이와 같은 시간영역 파형 분석뿐만 아니라, FFT 기능이 장착될 경우 스펙트럼 분석기로 사용될 수 있다. 과거 디지털 오실로스코프는 낮은 주파수에 주로 사용되었으나, 최근 디지털 오실로스코프는 사용주파수가 110 GHz에 이르는 것도 보고되고 있다^[1].

특히 디지털 오실로스코프는 고속 디지털 신호처리와 함께 관심을 끌고 있는 지터(jitter) 측정에 유용하다. 지터는 주기적인 기준신호의 주기와 실제 신호의 주기성으로부터의 편차를 의미하며, 지터는 거의 모든 통신 링크의 설계에서 중요하다. 이러한 중요성을 고려하여 지터에 대한 정의 및 분류는 최근 IEEE에서 표준화된 바 있다^[2]. 그러나 지터는 디지털 오실로스코프로 측정할 수 있지만, 측정 결과를 가공하여야만 얻을 수 있다. 일부 디지털 오실로스코프는 전용 지터 측정기능이 장착되어 사용자가 별도로 측정 결과를 가공하지 않고 직접 측정이 가능하게 된다^[3].

지터는 응용에 따라 규격화하는 방법이 달라지며, 여러 가지 정의가 있다. 그중 위상잡음과 관련되는 것은 TIE(time interval error)이다. TIE는 시간영역에서 파형의 상승단 또는 하강단이 이상적인 파형에서 벗어난 정도를 시간 단위로 나타내는데, 이것은 위상 흔들림 또는 위상 오차와 비례관계에 있게 된다. 단 위상오차는 연속적인 함수이나, TIE는 이와 같은 연속적인 위상오차를 반주기마다 샘플한 것이다. 위상잡음은 위상오차를 스펙트럼 영역에서 측정한 것이다. 따라서 TIE는 위상오차를 샘플한 것이기 때문에, TIE를 스펙트럼 영역으로 변환하면 위상잡음을 얻을 수 있게 된다^[2].

위상잡음(phase noise) 성능은 통신 시스템 구성 시 필수적으로 고려하여야 하는 중요한 규격 중 하나이다. 위상잡음 전용 측정 계측기로는 키사이트(Keysight)사의 E5052B^[4], 로테슈바르츠(Rohde & Schwarz)사의 FSPN^[5]이 있으나, 대량생산용 장비로 사용되기에는 매우 고가의 장비이다.

반면 고가의 위상잡음 전용 측정 계측기에 비해 디지털 오실로스코프는 대량생산용 장비로 적절한 가격을 가진다. 또한, 지터 측정기능이 장착된 최근 디지털 오실로스코프는 지터 측정기능과 함께 보통 위상잡음 측정기능도 제공한다. 이것은 앞서 설명한 TIE를 위상잡음 측정에 사용한 것이다. 좀 더 정밀한 위상잡음은 동일한 신호를 분기하여 두-채널에 입력하고, 두 채널에서 얻어진 TIE를 교차상관(cross correlation)하여 개선하여 얻고 있다. 그러나 이처럼 얻어진 위상잡음은 ADC를 이용하여 디지털신호로 변환 시 추가된 ADC 클럭-지터 잡음을 포함하고 있어, ADC 클럭-지터 잡음이 클 때 얻어진 위상잡음은 오차를 보이게 된다.

본 논문에서는 지터 측정기능이 장착되지 않은 디지털 오실로스코프를 이용, 새로운 위상잡음 측정방법을 제안한다. Labview를 이용하여 디지털 오실로스코프로 파형을 읽어 들이고, 읽어 들인 파형으로부터 TIE를 얻고, TIE에 포함된 ADC 클럭-지터 잡음을 보정한 뒤, 교차상관을 통하여 개선된 위상잡음을 얻는 방법이다. 또한, 본 논문에서 제안된 방법으로 얻어진 위상잡음 측정결과와 기존의 디지털 오실로스코프를 이용한 위상잡음 측정결과와 비교하여, 본 논문 방법의 우수성을 보였다.

II. TIE를 이용한 위상잡음 측정방법

2-1 TIE(Time Interval Error)

그림 1에 TIE 정의^[2]를 설명하기 위한 그림을 보였다. 측정된 파형(measured waveform)의 0점(그림 1의 Z_1, \dots, Z_n)은 일반적으로 샘플된 측정값으로부터 보간(interpolation)하여 얻게 된다. 주목할 것은 측정된 0점 Z_1, \dots, Z_n 은 정확히 주기마다 반복하지 않게 된다. 측정된 0점으로부터 측정된 모든 0점에 가장 가까운 이상적인 정현파형(ideal waveform)을 얻을 수 있고, 이때 얻어진 이상적인 정현파

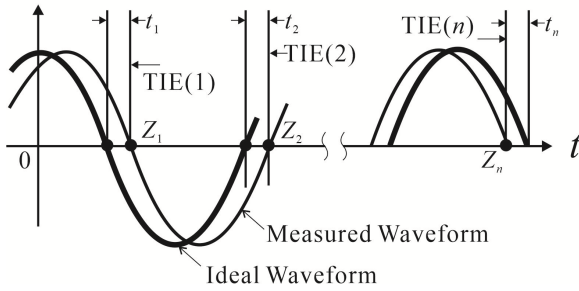


그림 1. TIE(time interval error) 정의
Fig. 1. The definition of TIE (time interval error).

형과 측정된 파형의 0점들 간의 차이(그림 1의 t_1, \dots, t_n)를 TIE라고 한다. 따라서 TIE는 반주기마다 나타나는 이산 파형이 된다.

그림 1에서 정현파의 주파수를 $\omega_o = 2\pi f_o$ 라고 할 때 샘플된 위상 파형 ϕ 은 식 (1)과 같다.

$$\phi(n) = \omega_o TIE(n) \quad (1)$$

식 (1)의 ϕ 는 불규칙하게 흔들리게 된다. 이때 ϕ 의 Fourier 변환을 통해 전력스펙트럼밀도(power spectral density) $S_\phi(f_m)$ 을 얻을 수 있다. 여기서 f_m 은 오프셋-주파수를 나타낸다. 얻어진 $S_\phi(f_m)$ 으로부터 위상잡음 $L(f_m)$ 은 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$L(f_m) = \frac{1}{2} S_\phi(f_m) \quad (2)$$

2-2 교차상관을 통한 위상잡음 개선

그림 2는 본 논문에서의 TIE를 이용한 위상잡음 측정 셋업(setup)을 보였다. 위상잡음을 측정하고자 하는 신호 $s(t)$ 는 그림 2와 같이 전력이분기(power divider)를 통해 분기되어 각각 디지털 오실로스코프 Ch1 및 Ch3 두 채널로 입력된다. 이와 같이 $s(t)$ 를 전력이분기로 분기하여 디지털 오실로스코프의 두 채널로 입력하는 것은 디지털 오실로스코프 채널에서 발생한 잡음이 신호 $s(t)$ 의 위상잡음에 나타나는 것을 제거하기 위한 것이다. 즉 단일 채널 $s(t)$ 의 TIE를 측정하고 이를 이용하여 위상잡음을 계산할 경우 채널에서 발생된 잡음은 신호 $s(t)$ 의 위상잡음에 나타나게 된다. 그러나 두 채널로 입력된 신호를 교차

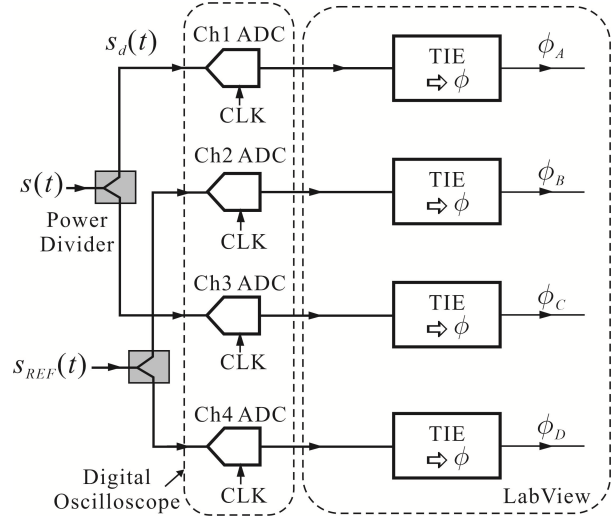


그림 2. 본 논문의 위상잡음측정 셋업
Fig. 2. The phase noise measurement setup in this work.

상관할 경우 각 채널에서 발생한 잡음은 독립이므로, 채널에서 발생한 잡음의 신호 $s(t)$ 의 위상잡음에의 기여는 사라지게 된다. 그러나 위상잡음에는 여전히 ADC 클럭-지터 잡음을 포함하고 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 동일한 ADC 클럭-지터 잡음이 ADC로 샘플된 출력에 나타나게 된다.

그림 2의 기준신호 $s_{REF}(t)$ 는 ADC 클럭-지터를 제거하기 위한 것으로, 신호 $s(t)$ 와 동일하게 전력이분기를 통해 분기되어 디지털 오실로스코프로 Ch2 및 Ch4 두 채널로 입력된다. 디지털 오실로스코프로 샘플된 신호는 National Instrument사의 Labview를 통해 읽어 들이며, 읽어 들인 신호의 0점을 찾아, 식 (1)과 같이 위상변화로 바꾼다. 디지털 오실로스코프에 TIE를 측정하는 기능이 있다면 TIE를 읽어 들이고, 식 (1)을 이용, 위상변화로 변환하면 된다. 본 논문에서는 디지털 오실로스코프 지터 측정기능이 없다고 가정하였다.

그림 2의 ϕ_A , ϕ_B 및 ϕ_C 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$\phi_A = \phi_d + a\phi_s + \phi_1 \quad (3a)$$

$$\phi_B = \phi_{ref} + b\phi_s + \phi_2 \quad (3b)$$

$$\phi_C = \phi_d + a\phi_s + \phi_3 \quad (3c)$$

식 (3)에서 ϕ_d 및 ϕ_{ref} 는 각각 신호 $s(t)$ 및 기준신호 $s_{REF}(t)$ 의 위상 흔들림(fluctuation)을 나타낸다. ϕ_1, ϕ_2 및 ϕ_3 은 ADC의 양자화 잡음 및 열잡음에 의한 위상 흔들림이며, 상호독립적 잡음이라고 볼 수 있다. ϕ_s 는 ADC 클럭의 위상잡음으로 인한 잡음이며, 상수 a 및 b 는 식 (4)의 관계를 갖는다.

$$a = \frac{f_d}{f_s}, b = \frac{f_{ref}}{f_s} \quad (4)$$

식 (4)의 f_d 및 f_{ref} 는 각각 신호 $s(t)$ 및 기준신호 $s_{REF}(t)$ 의 주파수를 나타낸다. 식 (3)으로부터, 식(3a)만 이용하여 위상잡음을 구할 경우, 잡음 ϕ_1 및 ϕ_s 의 영향을 포함하고 있어, 부정확한 위상잡음이 얻어지게 된다.

식 (3a) 및 (3c)에 보인 ϕ_A 및 ϕ_C 의 교차상관 스펙트럼을 식 (5)와 같이 정의한다.

$$X(\phi_A, \phi_C; f_m) = \overline{F(\phi_A)} \times F(\phi_B) \quad (5)$$

식 (5)에서 $F(\cdot)$ 은 Fourier 변환을 나타내고, $\overline{F(\cdot)}$ 는 공액을 나타낸다. 식 (3a) 및 (3c)에서 $\phi_1, \phi_3, \phi_d, \phi_s$ 는 독립인 확률변수이다. 또한 ϕ_A 및 ϕ_C 의 공통 인자는 $\phi_d + a\phi_s$ 이다. 따라서 ϕ_A 및 ϕ_C 를 교차상관하여 스펙트럼을 얻고 평균횟수 M 을 증가시킬 경우, ϕ_A 및 ϕ_C 의 교차상관 스펙트럼은 식 (6)과 같다.

$$\langle X(\phi_A, \phi_C; f_m) \rangle_{M \rightarrow \infty} = S_{\phi_d}(f_m) + a^2 S_{\phi_s}(f_m) \quad (6)$$

식(6)에서 $\langle \cdot \rangle$ 는 평균 연산을 나타내고, 첨자 M 은 평균횟수를 나타낸다. 따라서 잡음 ϕ_1 의 영향은 사라지고, 개선된 위상잡음 결과를 얻게 된다. 그러나 여전히 ADC 클럭-지터의 영향을 포함하고 있다. 이것이 보통 디지털 오실로스코프에서 교차상관을 통하여 위상잡음을 계산하는 방법이다. 본 논문에서는 식 (6)에 나타나는 ADC 클럭-지터의 잡음의 영향도 제거하는 방법을 제안하고자 한다.

2.3 본 논문의 위상잡음측정 방법

본 논문에서 제안하는 방법을 그림 3에 보였다. 기존의 방법이 ϕ_A 와 ϕ_C 의 교차상관을 구하여, ϕ_1, ϕ_3 의 영향을 제거하는 것인데 비해, 본 논문에서는 그림 3과 같이 ϕ_B

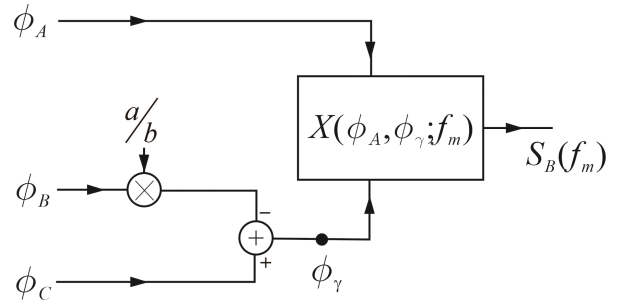


그림 3. 본 논문에서 제안된 교차상관 방법

Fig. 3. The proposed cross correlation method in this work.

및 ϕ_C 를 이용하여 ADC 클럭-지터로 인한 ϕ_s 의 영향을 제거하는 것이다. 그림 3에서 ϕ_γ 는

$$\phi_\gamma = \phi_d - \phi_{ref} + \phi_3 - \frac{a}{b} \phi_2 \quad (7)$$

를 얻게 된다. 식 (7)과 식 (3a)를 비교하면 공통잡음은 ϕ_d 뿐인 것을 알 수 있고, 나머지 항들은 독립인 것을 알 수 있다.

따라서 ϕ_A 와 ϕ_γ 의 교차상관은 식 (8)과 같다.

$$\langle X(\phi_A, \phi_\gamma; f_m) \rangle_{M \rightarrow \infty} = S_{\phi_d}(f_m) \quad (8)$$

식 (8)로부터 본 논문의 방법을 통하여 잡음 ϕ_1 및 ϕ_s 의 영향이 제거된 위상잡음을 구할 수 있음을 알 수 있다.

2.4 위상잡음측정 방법 Labview 구현

본 논문에서 디지털 오실로스코프에 지터 측정기능이 없다고 가정하였기 때문에, 읽어 들인 파형으로부터 TIE를 계산하는 것은 Labview 애드-온 지터-해석 툴-키트(tool kit)를 이용하여 구현하였다. 구현할 때 문제가 되는 것은 신호 $s(t)$ 와 기준신호 $s_{REF}(t)$ 의 주파수가 다르다는 점이다. 따라서 0점들은 다르게 나타나며, 결과적으로 ϕ_A, ϕ_B 의 샘플 간격이 차이를 갖게 된다. 이를 극복하기 위하여 ϕ_A, ϕ_B 를 새로운 샘플 간격으로 재-샘플(re-sample)하는 것이 필요하다. 이것은 Labview의 Resample Waveforms(single shot).vi를 이용하여 구현하였다. 재-샘플 시 선형 보간을 선택하였다. 또한 ϕ_A, ϕ_B 를 재-샘플을 하더라도 길이가 다르게 된다. 길이는 Align Waveforms(single shot).

vi를 사용, 구현하였다.

III. 측정결과

위상잡음 측정결과를 비교하기 위하여 키사이트사의 E8257D 신호발생기를 신호원 $s(t)$ 로 사용하였다^[7]. 주파수와 전력은 1.4151 GHz, 9 dBm으로 선정하였다.

이와 같이 $s(t)$ 의 주파수와 전력을 결정한 것은 우선 기존의 디지털 오실로스코프로 측정된 결과와 비교를 용이하게 하기 위해서이다^[8]. 두 번째로 사용된 디지털 오실로스코프 MXR608A의 성능을 고려한 것이다. MXR608A는^[1] 최대 샘플링 속도가 16 GSa/sec이기 때문에 측정 가능한 입력주파수는 6 GHz로 제한된다. 또한, ADC 클럭-지터를 제거하기 위해서는 별도로 기준신호가 필요한데, 기준신호의 주파수는 $s(t)$ 의 주파수보다 높게 선정되면 ADC 클럭-지터를 제거하는 데 바탕 위상잡음을 열화시키지 않는다. 따라서 MXR608A를 사용 측정 가능한 주파수는 약 4 GHz로 제한되게 된다. 그리고 입력 전력의 경우 MXR608A로 측정 가능한 전압은 $43 \mu V$ (약 -73 dBm)이므로 이것보다 높은 입력 전력을 필요로 한다. MXR608A의 ENOB는 9 bit여서 적절한 전압은 -19 dBm보다 큰 입력 전력을 가져야 할 것이다. 따라서 여유를 준다면 -15 dBm보다 큰 입력전력이 필요하다. 이러한 면에서 채널 입력 전력 3 dBm(9 dBm 입력전력은 저항성 전력이분기에 의해 이분되어 채널 입력 전력은 3 dBm이 된다)으로 설정하였다.

사용된 디지털 오실로스코프는 키사이트사의 8-채널 MXR608A이며, 이것의 최대 샘플링 주파수 16 GHz이다. 우선 E8257D 신호발생기의 위상잡음을 키사이트사의 신호분석기 E5052B를 사용하여 측정하였다. E5052B로 측정된 위상잡음은 그림 4에 보였다. 그림 4에 보인 바와 같이 E8257D의 위상잡음은 $f_m=10\sim100$ kHz에서 약 -130 dBc/Hz를 가지며, $f_m=1\sim10$ MHz에서 약 -150 dBc/Hz를 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 4에는 평균횟수 $M=10,000$ 일 때 단일-채널 TIE로 계산된 위상잡음을 보였다. 단일-채널 TIE로 계산된 위상잡음은 $f_m=10\sim100$ kHz에서 약 8 dB의 차이를 보이며, $f_m=1\sim10$ MHz에서 약 -15 dB의 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 4에 또한 동일 신호에 대해 계산된 두 TIE를 교차

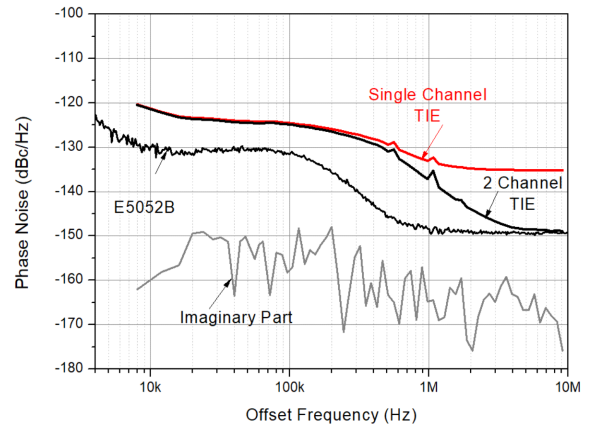


그림 4. E5052B, 단일채널 TIE, 2-채널 TIE로 방법을 사용하여 측정된 E8257D 신호발생기의 위상잡음
Fig. 4. The measured phase noise of the signal generator E8257D using E5052B, single and 2 channel TIE cross correlation methods.

상관하여 측정된 위상잡음을 보였다. 교차상관 TIE를 이용해 계산된 위상잡음은 단일 채널 TIE로부터 계산된 위상잡음보다 개선된 것을 알 수 있다. 교차상관 TIE로부터 얻어진 위상잡음은 $f_m=1\sim10$ MHz에서 E5052B로 측정된 위상잡음과 근접하나 $f_m=10\sim100$ kHz에서 약 6 dB의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그림 4의 허수부는 교차상관 TIE로 위상잡음 계산 시 상관관계가 없는 잡음의 평균을 보인 것이다. 따라서 교차상관을 통하여 TIE로 계산된 위상잡음은 개선된 결과를 보이나, 여전히 만족스럽지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 ADC 클럭-지터의 잡음 영향에 의한 것이다.

그림 4에 보인 바와 같이 본 논문의 방법은 $f_m=1\sim10$ kHz의 측정결과를 제공하지 못한다. 이것은 디지털 오실로스코프로부터 Labview로 읽어 들일 수 있는 파형 샘플수의 제한 때문이다. 그림 4에서 Labview로 읽어 들일 수 있는 파형의 샘플 수는 4 M으로 제한된다. 이때 얻어지는 0점의 개수는 약 700 k이다. 따라서 가장 낮은 $f_{m,\min}$ 은

$$f_{m,\min} = \frac{10}{N\Delta t} \cong \frac{10 \times 1.4151 G}{2 \times 710 k} = 9.9 \text{ kHz}$$

이다. 여기서 최소 평균횟수를 10으로 설정하였다. 따라서 Labview의 처리능력으로 인해 약 $f_m=10$ kHz 이하의

위상잡음 측정 결과를 제공하지 못하게 된다.

그림 5에는 본 논문에 제시된 방법으로 측정된 위상잡음과 E5052B를 사용하여 측정된 위상잡음의 비교를 보였다. 기준신호 $s_{REF}(t)$ 는 별도의 신호발생기 E4438C를 사용하여 공급하였다. 주파수와 전력은 각각 2.41 GHz, 9 dBm으로 설정하였다. 주목할 것은 E4438C 신호원의 위상잡음은 E8257D보다 약 5~10 dB 높다. 그러나 식 (7)에 보인 것과 같이 측정된 $s(t)$ 의 위상잡음은 기준신호 $s_{REF}(t)$ 의 위상잡음의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 단지 기준신호 $s_{REF}(t)$ 는 ADC 클럭-지터 잡음을 제거하기 위한 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 본 논문에 제시된 방법으로 측정된 위상잡음은 정확하게 E5052B를 사용하여 측정된 위상잡음에 일치된 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 표 1에는 오프셋-주파수 범위에 따른 두 측정 결과의 평균 차이를 보였다. 표 1에서 오프셋-주파수 10 kHz~1 MHz 범위에서 평균 0.2 dB의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 E5052B의 위상잡음 측정값의 불확실성을 고려할 때 근접한 결과임을 알 수 있다.

본 논문의 측정방법에 대한 다른 예로 그림 6에 신호발생기 E4438C로 생성된 2.41 GHz 신호에 대해서, 본 논문에 제시된 방법으로 측정된 위상잡음과 E5052B를 사용하여 측정된 위상잡음의 비교를 보였다. E4438C로 생성된

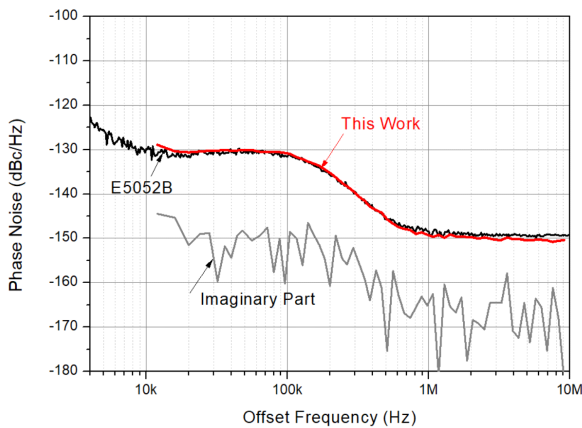


그림 5. E5052B 및 본 논문 방법으로 측정한 E8257D 신호발생기의 위상잡음과 비교

Fig. 5. The comparison of the measured phases noises using E5052B and the proposed cross correlation method.

표 1. 측정된 두 위상잡음 차이

Table 1. Difference between two measured phase noises.

f_m	Mean difference (dB)	E5052B uncertainty
10~100 kHz	0.53	2 dB
100 kHz~1 MHz	-0.075	
1~10 MHz	-0.83	
Mean	-0.2	

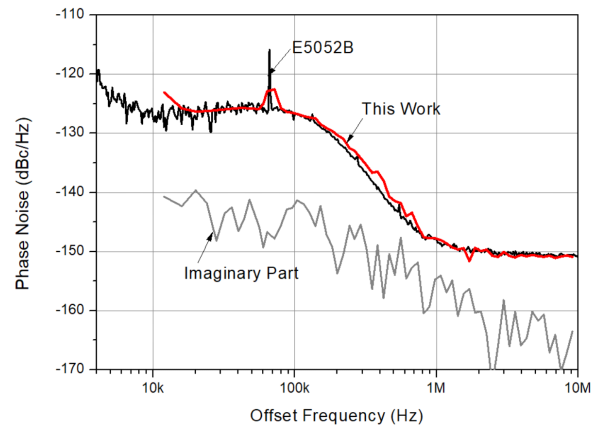


그림 6. E5052B 및 본 논문 방법으로 측정한 E4438C 신호발생기의 위상잡음과 비교

Fig. 6. The comparison of the measured phases noises using E5052B and the proposed cross correlation method for E4438C signal generator.

2.41 GHz 신호는 그림 5의 $s_{REF}(t)$ 로 사용된 신호이다. 2.41 GHz 신호의 전력은 동일하게 9 dBm으로 설정되어 채널당 입력전력은 약 3 dBm이 된다. 이때 $s_{REF}(t)$ 는 E8257D를 사용하여 인가하였고, 주파수와 전력은 각각 4 GHz, 9 dBm이다. 그림 6에서 $s_{REF}(t)$ 의 주파수가 높아서 앞서 설명한 바와 같이 약 $f_m=20$ kHz 이상에서 E5052B의 위상잡음과 일치된 결과를 주는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서 디지털 오실로스코프로 용이하게 측정이 가능한 TIE(time interval error)를 이용한 위상잡음 측정방법을 제안하였다. 제안된 TIE 교차상관을 이용한 위상잡음 측정방법은, 기존 TIE 교차상관을 이용한 위상잡음 측정

방법으로 제거하지 못했던 ADC 클럭-지터에 의한 위상 잡음을 효율적으로 제거할 수 있었다. 제안된 방법으로 측정된 위상잡음의 정확성을 보이기 위하여, E5052B로 측정한 키사이트사의 E8257D 신호발생기의 위상잡음과, 본 논문에서 제안된 위상잡음 측정방법을 이용하여 측정한 위상잡음을 비교하였다. 비교 결과, 두 측정 결과는 일치된 결과를 보였다.

본 논문으로 측정 가능한 신호의 위상잡음은 디지털 오실로스코프의 성능에 따라 제한된다. MXR608A를 사용한 위상잡음 측정범위는^[1], 기준신호까지 고려한다면 신호 입력범위는 주파수 4 GHz, 입력전력 -15 dBm까지 측정할 수 있다. 위상잡음의 측정 가능 범위는 -160 dBc/Hz로 예상된다. 또한, 본 논문 방법의 정확도 평가는 더욱 많은 연구가 필요하다.

본 논문에서 제안된 방법을 디지털 오실로스코프에 내장할 경우, 디지털 오실로스코프의 위상잡음 측정기능을 향상할 수 있으며, 디지털 오실로스코프의 범용성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

References

- [1] Keysight Technologies, "Infiniium MXR-series: See more. Do more. Save time," 2022. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7120-1115/data-sheets/Infiniium-MXR-Series.pdf>
- [2] *IEEE Standard Jitter and Phase Noise*, IEEE Std. 2414-2020, Sep. 2020.
- [3] Keysight Technologies, "EZJIT Plus Jitter Analysis Software for infiniium oscilloscopes," 2017. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01186/data-sheets/5989-0109.pdf>
- [4] Keysight Technologies Datasheet, "E5052B signal source analyzer: 10 MHz to 7 GHz, 26.5 GHz, or 110 GHz," 2017. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01528/data-sheets/5989-6388.pdf>
- [5] Rohde & Schwarz, "R&S®FSPN Phase Noise Analyzer and VCO Tester, user manual," 2021. Available: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_manuals/user_manual/1179_4363_01/FSPN_UserManual_en_01.pdf
- [6] J. Grove, J. Hein, J. Retta, P. Schweiger, W. Solbrig, and S. R. Stein, "Direct-digital phase-noise measurement," in *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2004*, Montreal, QC, Aug. 2004, pp. 287-291.
- [7] Keysight Technologies, "E8257D PSG microwave analog signal generator," 2021. Available: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01211/data-sheets/5989-0698.pdf>
- [8] K. W. Yeom, J. S. Roh, "A measurement technique of phase noise using a digital oscilloscope and labview™," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 9, pp. 782-794, Sep. 2021.

염 경 환 [충남대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8557-4972>



1976년~1980년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1980년~1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)

1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)

1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소

선임연구원 (MIC팀 팀장)

1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원

1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원

1991년 8월: (주) LTI

1995년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템, MMIC 설계

노 진 성 [충남대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3881-6385>



2020년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)

2020년 9월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 석사과정

[주 관심분야] 초고주파 능동회로 및 시스템