

고해상도 파형을 사용하는 소형레이다용 주파수합성기의 진동에 의한 위상잡음 악화 분석

Analysis of Degradation of Phase Noise by Vibration of Frequency Synthesizer for Compact Radar Using High Resolution Waveform

박진성 · 김은일 · 김광희

Jinsung Park · Eun Il Kim · Kwang Hee Kim

요약

고속 비행체에 적용되는 고해상도 소형레이다는 진동에 노출되며, 이 진동은 크리스탈 발진기 및 RF 회로에 작용하여 위상잡음 준위를 악화시킬 수 있다. 본 논문에서는 실제 운용 환경과 유사한 실험을 수행하기 위하여 코히어런트 주파수 발생 구조를 가지는 주파수합성기와 상용 RF 회로로 구현된 슈퍼헤테로다인 수신기, 최대 20 km의 거리 지연을 구현할 수 있는 광지연장치 및 진동을 인가하기 위한 가진기를 이용한다. 주파수합성기에 진동을 인가한 후, 수신기의 각 노드(node)에서 신호원 분석기를 이용하여 위상잡음을 측정하였으며, 그 결과 거리 지연에 의한 위상잡음 억압 함수의 효과가 나타남을 확인하였다. 억압 효과는 주파수 체배에 의해서 악화된 위상잡음뿐 아니라, 진동으로 악화된 위상잡음에도 작용한다. 한편, 거리 지연에 의한 위상잡음 억압 함수로 억압할 수 있는 하한은 발진기로부터 IF(intermediate frequency) 신호까지 생성하였을 때의 위상잡음 또는 열잡음 중 더 높은 준위를 가지는 신호에 의해 결정됨을 이론/실험적으로 제시한다. 최종적으로 이론과 실험 결과를 바탕으로 고해상도 파형을 사용하는 소형 레이다의 위상잡음 억압에 유리한 송수신 설계 구조를 제안한다.

Abstract

High-resolution compact radar in high-speed aerial vehicles can be exposed to vibration, and vibration can degrade the phase noise of crystal oscillators and other RF circuits. In this study, a laboratory experiment was conducted similar to the actual operating environment using a coherent frequency synthesizer, superheterodyne receiver realized by commercial RF circuits, an optical delay line with a maximum 20 km range delay, and a vibrator. After applying vibration to the frequency synthesizer, the phase noise was measured at each node of the receiver using a signal source analyzer. Consequently, it was confirmed that the effect of the phase noise suppression function depends on the range delay. The suppression function not only degrades the phase noise by frequency multiplication, but also degrades it by vibration. On the other hand, it has been shown theoretically and experimentally that the lower limit can be suppressed by the suppression function is determined by the higher level of the phase noise generated from the oscillator to the intermediate frequency signal or thermal noise. Finally, a transceiver architecture that has the advantage of suppressing phase noise is proposed for compact radar using high-resolution waveforms.

Key words: Phase Noise, Vibration, Compact Radar, Frequency Synthesizer, High Resolution Waveform

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 8, 2021 ; Revised June 8, 2021 ; Accepted July 1, 2021. (ID No. 20210408-032)

· Corresponding Author: Jinsung Park (e-mail: funfish1@add.re.kr)

I. 서 론

레이다 시스템은 군사 목적으로 탄생된 전자기와 센서이며, 신호를 송수신하기 위한 RF(radio frequency) 송수신기가 존재한다. 송수신기의 일부인 주파수합성기는 일반적으로 크리스탈 발진기, 주파수 체배기, PLL(phase locked loop), 혼합기, 증폭기 등의 회로를 이용하여 구현된다. 초기 레이다 시스템은 주로 지상에 설치되었으나, 무기 체계가 발달하면서 해상, 차량, 함정, 항공기, 고속 비행체 등의 다양한 플랫폼에 탑재되어 활용되어 왔다. 이동형 플랫폼에 탑재된 레이다 시스템은 고정형 플랫폼에서는 발생하지 않는 다양한 기술적 어려움이 발생하며, 이 중 진동에 의한 위상잡음 악화는 극복해야 할 주요한 기술적 과제 중 하나이다.

고속 비행체에 탑재되는 소형레이다는 표적을 탐지 및 추적하는 것을 주목적으로 하며, 최근에는 다양한 표적 및 요구사항을 충족시키기 위하여 고해상도 파형^[1]이 추가되고 있다. 하지만, 플랫폼의 특성으로 인하여 운용 중 상시로 진동에 노출된다. 앞서 기술한 바와 같이 진동은 주파수합성기가 생성하는 신호의 위상잡음 성능을 악화시킨다. 이는 레이다 시스템의 거리 분해능을 떨어트려 경우에 따라서는 클러터에 의해 표적이 묻히는 상황이 발생되거나^[2], 다중표적 식별 능력이 약화될 수 있고, 심지어 오프적으로 인식될 수 있다. 함정에 탑재되는 레이다 또한 함정 플랫폼 특성상 파도에 의해 유발되는 저주파의 강한 진동에 노출된다. 해당 진동은 레이다의 정상적인 도플러 추적을 방해하므로 이를 저감하기 위하여 기계 구조적으로 진동에 의한 영향을 저감하는 주파수 합성 방식^[3]이 제안된 바 있다.

또한, 위상잡음 악화는 비단 레이다 분야뿐 아니라, 통신, RFID(radio frequency identification) 등의 응용분야에서도 통신 성능 저하^{[4],[5]}, 거리에 따른 위상잡음 억압율^[6] 등의 연구가 수행된 바 있으나, 해당 플랫폼 특성상 진동 중 위상잡음에 관한 연구는 찾아보기 힘들다.

본 논문에서는 실제 고속 비행체와 유사한 진동 중 레이다 송수신 환경을 구현하고, 이에 대한 데이터를 분석하여 위상잡음 성능 관점에서 더 나은 송수신 설계 구조를 제안하고자 한다. 이를 위하여 소형레이다 시스템의

주파수합성기와 상용 RF 회로를 이용한 이중 주파수 하향 변환 방식의 슈퍼헤테로다인(superheterodyne) 수신 구조, 표적과 레이다 간 공간손실과 실제 물리적 길이를 모사하는 광지연장치를 연결한 후, 주파수합성기에만 진동을 인가하고, 진동 중 위상잡음 결과 데이터를 측정하여 분석한다. 진동 중 위상잡음 측정은 주파수 하향 변환이 일어나는 각 노드(node)별로 측정하여 코히어런트(coherent) 레이다 시스템에서의 거리에 의한 위상잡음 억압 효과를 주파수 하향 변환 구조와 관련지어 상세히 분석한다.

최종적으로, 분석 결과를 이용하여 고해상도 파형을 사용하는 레이다 시스템이 진동 중 우수한 위상잡음 특성을 가지기 위한 주파수합성기 및 송수신 구조 설계를 제안한다.

II. 진동과 거리에 따른 위상잡음

진동에 노출되는 크리스탈 발진기는 아래와 같은 식 (1)에^[7] 의하여 위상잡음이 형성된다. 식 (2)는 정현파 진동(sine vibration)의 경우이고, 식 (3)은 임의 진동(random vibration)의 경우이다. 진동 유형에 따라 해당하는 수식을 식 (1)에 적용한다.

$$\mathcal{L}(f) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\Delta f}{2f_{vib}} \right) \quad (1)$$

$$\Delta f = S \times f_{RF} \times G \quad (2)$$

$$\Delta f = S \times f_{RF} \sqrt{2g} \quad (3)$$

여기서

f_{vib} : 진동 주파수 (Hz)

S : 크리스탈의 중력 민감도 (G-sensitivity)(1/g)

f_{RF} : RF 반송파 주파수 (Hz)

G : 정현파 진동 준위 (G_{rms})

g : 임의 진동 준위 (g^2/Hz)

$\mathcal{L}(f)$: 위상잡음 (dBc/Hz)

Δf : 진동에 의해 유발되는 주파수 jitter (\sqrt{Hz})

식 (1)~식 (3)에서 알 수 있듯이 진동에 의한 위상잡음 형성은 진동이 가해지는 주파수에서만 일어나고, 나머지

주파수는 영향을 받지 않는다. 통상적으로 기계적인 진동은 주파수가 수 kHz 이내이므로, 진동에 의해 영향을 받는 위상잡음은 수 kHz 이내의 저 오프셋(offset) 영역임을 의미한다. 각 축별로 인가되는 진동은 최종적으로 아래와 같이 종합적인 효과로 나타난다.

$$\mathcal{L}_{total}(f) = 10 \times \log_{10} \left(\sqrt{(10^{\mathcal{L}_x(f)/10})^2 + (10^{\mathcal{L}_y(f)/10})^2} + (10^{\mathcal{L}_z(f)/10})^2 \right) \quad (4)$$

여기서 $\mathcal{L}_x(f)$, $\mathcal{L}_y(f)$, $\mathcal{L}_z(f)$: 각 축의 진동 시 위상잡음 (dBc/Hz)

$\mathcal{L}_{total}(f)$: 전체 위상잡음 (dBc/Hz)

크리스탈 발진기의 G-sensitivity는 일반적으로 $10^{-7}/g \sim 10^{-10}/g$ 수준이다^[8]. 주파수 합성 방식에 따라 레이더의 최종 송신 신호에서 생성되는 위상잡음은 계산 방식이 다를 수 있다. 하지만, 앞서 기술하였듯이 기계적인 진동은 그 주파수가 수 kHz 내외로 높지 않기 때문에 크리스탈 발진기에 의해서 생성된 진동 중 위상잡음이 송신 신호의 위상잡음에 끼치는 영향성은 대부분 체배(multiplication) 또는 분주(division)에 의해 변동되는 아래 수식을 이용하여 산출될 수 있다.

$$20 \times \log_{10}(N) \quad (5)$$

여기서 N: 주파수 체배수 또는 분주수. 분주수는 역수 적용

한편, 코히어런트 특성을 가지는 레이더 송수신 시스템에서 표적에 의해 반사된 신호가 동일한 주파수를 가진 국부발진신호와 혼합기에서 혼합되어 DC로 변환될 때, 아래와 같이 위상잡음이 억압되는 효과가 나타난다^{[6],[9]}.

$$2[1 - \cos(\omega_m \tau_{dl})] \quad (6)$$

여기서 ω_m : 오프셋 각주파수 (rad/sec)

f_m : 오프셋 주파수 (Hz)

τ_{dl} : 표적과 레이더간의 왕복에 해당하는 시간 지연 (sec)

식 (6)을 정성적인 개념으로 해석하면 표적으로부터 반사된 신호의 위상잡음과 LO 신호의 위상잡음이 거리가

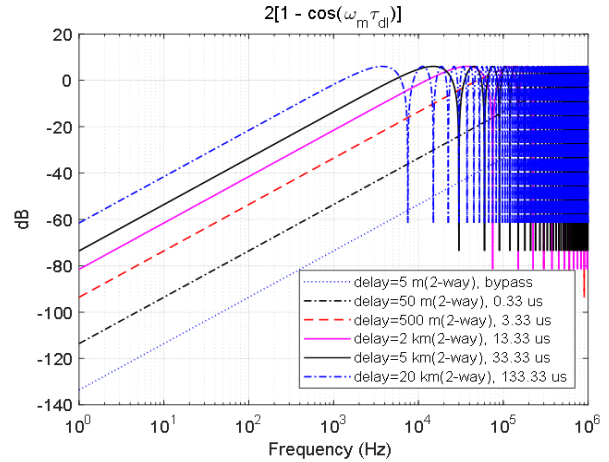


그림 1. 거리(2-way)에 의한 위상잡음 억압함수

Fig. 1. Phase noise suppression by 2-way distance.

짧을수록 상호 간에 유사도가 높아지고, 혼합기에서 위상 간 뺄셈 연산이 수행되므로 억압율이 높아지는 것으로 이해될 수 있다.

그림 1은 거리(2-way 기준)에 따른 위상잡음 억압함수인 식 (6)을 도시한 것이다. 거리가 짧으면 짧을수록 저 오프셋에서 억압이 극대화된다. 또한, 특정 오프셋 주파수 이상에서는 최대 6 dB의 보강간섭이 발생하고, 연속되는 다중 극소점이 형성됨을 확인할 수 있다.

III. 실험 셋업

앞선 이론에 의해서 예상되는 진동 중 위상잡음을 실험적으로 확인하기 위하여 그림 2와 같이 셋업한 뒤 주파수합성기에만 진동을 인가하고 신호원 분석기(signal source analyzer, E5052A+E5053A(microwave downconverter), Agilent 社)를 이용하여 위상잡음을 측정하였다. 수신 구조에 사용된 증폭기, 혼합기, 가변 감쇠기는 커넥터가 달린 상용 회로를 이용하였으며, 각 회로 간 연결은 동축 케이블 또는 RF 어댑터를 이용한 체결 방식을 이용하였다. 위 셋업에서 광지연장치(optical delay line, 10341C-E18, 10458E-DC-FA, EMCORE 社)은 광섬유의 실제 길이를 이용한 물리적인 시간 지연(true time delay) 장치이다. 본 실험에서는 5종(bypass, 0.33 μs, 3.33 μs, 13.33 μs, 33.33 μs, 133.33 μs)의 delay spool을 선택할 수 있었다. Delay

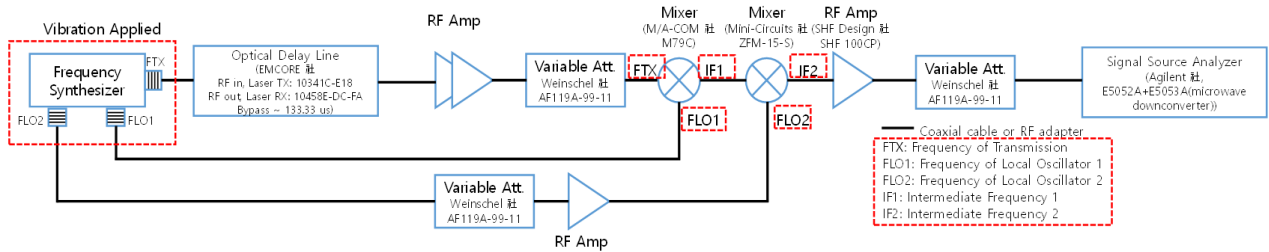


그림 2. 위상잡음 진동 실험 셋업
Fig. 2. Experiment setup for vibration of phase noise.

spool은 2×2 광 스위치 유닛(Optiva OTS-1-OSU, EMCORE 社)에 연결되어 해당 delay spool을 버튼으로 선택할 수 있도록 구성되었다. 이는 총 ${}_5C_2$ 조합이 가능함을 의미한다. 실험에 사용된 상용 회로 및 계측기의 모델명은 그림 2 및 그림 3의 해당 블록도에서도 확인할 수 있다. 그림 3의 링크 버짓 분석은 결과 잡음지수는 61 dB, 이득은 4 dB이다. 따라서 신호원 분석기에 입력되는 열잡음 전력 밀도는 이론적으로 -109 dBm/Hz로 계산되고, 반송파 전력은 0 dBm 입력 기준으로 +4 dBm으로 계산된다. 다만 버짓 분석에 사용된 파라미터는 각 회로의 대푯값이므로 시간에 따른 능동소자의 특성 변화와 주파수 편차, 광 지연장치의 delay spool 종류 선택에 따라 변화될 수 있다.

광지연장치는 손실 측면에서 약 50 dB 이상의 감쇠기 처럼 보이게 되는데, 이는 레이더에서 송신된 신호가 표적에 반사되어 수신되는 물리적인 경로가 공간에 의한 감쇠를 가지므로 오히려 실제 레이더 운용 환경과 유사한 점이 있다고 할 수 있다. 또한, 코히어런트 송수신 시스템을 모사하기 위하여 주파수합성기로부터 생성되는 모든 신호는 내부의 크리스탈 발진기 신호에 동기화 되

도록 설계하였다. 수신 구조에서는 주파수합성기에서 생성된 2종의 국부발진신호(FLO1(첫 번째 혼합기에 인가), FLO2(두 번째 혼합기에 인가))를 이용하여 이중 주파수 하향 변환 방식의 수퍼헤테로다인 방식으로 수신 구조를 설정하였다.

주파수 버짓상 최종 IF 신호인 두 번째 혼합기 후단 신호(IF2)의 주파수가 첫 번째 혼합기 후단 신호(IF1)와 두 번째 국부발진신호(FLO2)의 차이에 해당하는데, IF2 신호의 주파수가 IF1과 FLO2의 주파수에 비해 무시할 만큼 작게 설계되었다. 주파수 간 관계를 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} f_{IF2} + f_{IF1} &= f_{FLO2} \\ f_{IF1} &\approx f_{FLO2} \\ f_{IF1} + f_{FLO1} &= f_{FTX} \\ \frac{f_{crystal\ oscillator}}{f_{IF2}} &= 3.5714 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 f_{IF2} : IF2 신호의 주파수 (Hz)

f_{FLO2} : FLO2 신호의 주파수 (Hz)

f_{IF1} : IF1 신호의 주파수 (Hz)

f_{FLO1} : FLO1 신호의 주파수 (Hz)

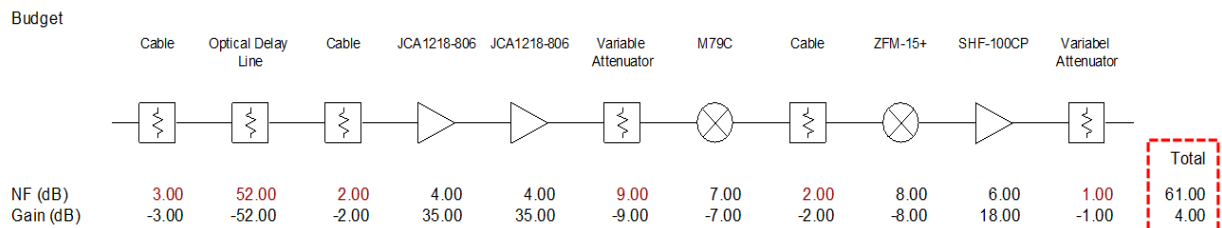


그림 3. 링크 버짓 분석 결과
Fig. 3. Result of link budget analysis.

$f_{crystal\ oscillator}$: 크리스탈 발진기의 주파수 (Hz)

f_{IF2} : IF2 신호의 주파수 (Hz)

또한, 본 셋업에 사용된 크리스탈 발진기는 진동에 의한 영향을 줄이기 위하여 기계적인 진동 격리 구조를 적용하였다. 하지만, 이로 인해 외부에서 인가한 진동이 격리 구조를 거친 후의 응답 함수를 알 수 없었기 때문에 식 (1)을 이용한 위상잡음 예측은 할 수 없었다.

그림 2와 같은 실험을 통하여 확인할 수 있는 것은 첫째로 진동 중 혼합기 출력이 DC가 아닌 상황에서의 위상잡음 억압 효과를 실제로 확인하고, 둘째로 실제 진동 중 레이더가 원거리 표적을 탐지/추적할 때의 위상잡음과 열잡음을 포함하는 스펙트럼 특성, 셋째로 크리스탈 발진기 외에 추가로 진동에 의해 위상잡음이 악화되는 요소를 파악하는 것이다.

IV. 실험 결과 및 해석

그림 4~그림 7은 광지연장치의 시간 지연을 bypass(시간 지연 없음)로 설정하고, 무진동과 진동 시의 위상잡음 측정 결과를 동일 주파수 신호에 대해서 도시한 것이다. 각 신호의 이름은 그림 2의 혼합기 주변에 표시한 것과 동일하다. 대표적인 오프셋 주파수별 위상잡음 측정치는 별도의 표 1에 정리하였다. 그림 내 중심 주파수와 RMS Jitter는 보안상의 이유로 제시하지 않았다.

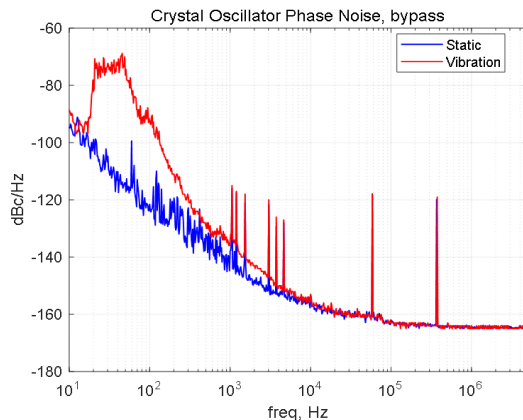


그림 4. 크리스탈 발진기 위상잡음, 시간 지연 없음
Fig. 4. Crystal oscillator phase noise, bypass.

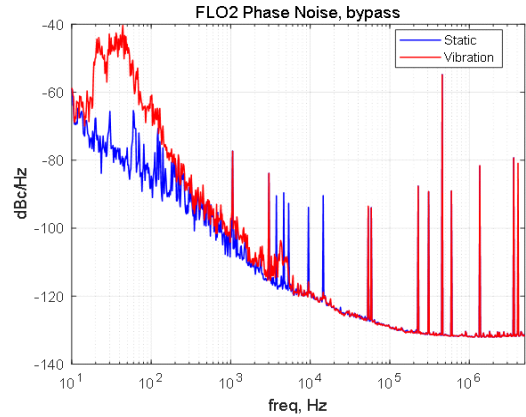


그림 5. FLO2 위상잡음, 시간 지연 없음
Fig. 5. FLO2 phase noise, bypass.

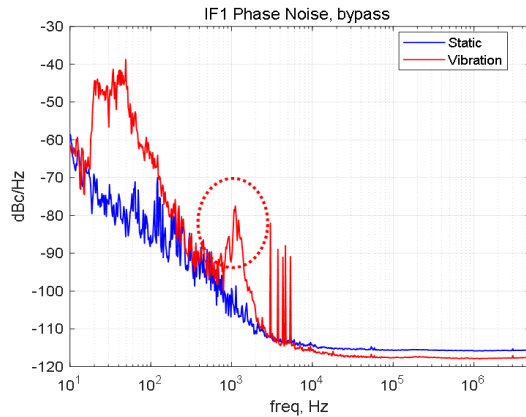


그림 6. IF1 위상잡음, 시간 지연 없음
Fig. 6. IF1 phase noise, bypass.

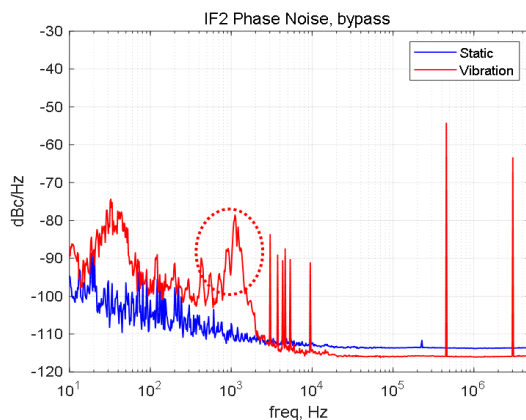


그림 7. IF2 위상잡음, 시간 지연 없음
Fig. 7. IF2 phase noise, bypass.

표 1. 신호별 위상잡음 (dBc/Hz)(진동 시)

Table 1. Phase noise of each signal (dBc/Hz)(vibration).

Offset Signal	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
Crystal oscillator	-121.6 (-92.4)	-137.9 (-134.3)	-153.6 (-153.3)	-162.0 (-162.8)
FLO2	-84.7 (-62.0)	-100.3 (-97.2)	-118.6 (-118.9)	-129.1 (-129.3)
IF1	-85.3 (-63.8)	-99.3 (-91.4)	-114.3 (-115.4)	-115.7 (-117.6)
IF2	-101.1 (-95.5)	-107.2 (-92.7)	-112.4 (-114.1)	-113.6 (-115.8)

혼합기 후단 출력 신호의 특정 오프셋 주파수(수 kHz 부근)에서 편평하게 위상잡음이 나타나는 현상은 셋업 버짓 분석 결과에서 제시한 바 있듯이, 앞단에 큰 감쇠량을 가지는 광지연장치가 위치함으로 인하여 열잡음 준위가 상승하여 열잡음이 위상잡음을 압도하기 때문이다. 주파수가 거의 비슷한 FLO2 신호와 IF1 신호의 측정 결과인 그림 5와 그림 6을 비교해 보면, 전반적으로 편평한 부분을 만나기 전까지 첫 번째 혼합기 후단 신호인 IF1은 FLO2의 위상잡음을 추종한다. 광지연장치를 bypass로 설정하면 셋업에서 전송선로 길이 정도의 시간 지연을 가지므로 이를 약 5 m 정도로 가정할 수 있다. 이 경우 그림 1에서 확인할 수 있듯이 수 kHz까지는 최소 60 dB 이상의 큰 억압율을 가지므로 첫 번째 혼합기 후단 신호는 FLO2의 위상잡음보다 더 낮아질 수 있다. 하지만 실험 결과에서 볼 수 있듯이 혼합기를 거쳐서 위상잡음이 억압되더라도 이론대로 낮아지지 않고 FLO2의 위상잡음이 하한선이 된다. 이는 아래와 같이 송신 신호 FTX와 IF1 신호의 위상잡음을 모델링하면 설명될 수 있다(IF1 신호와 FLO2 신호의 주파수가 거의 비슷하므로, 편의를 위하여 동일하다고 가정함).

$$FTX(t) = \exp \left[j \left(\omega_{FLO1} t + \omega_{FLO2} t + \phi_{FLO1}(t) + \phi_{FLO2}(t) \right) \right] \quad (8)$$

여기서 ω_{FLO1} : FLO1 각주파수 (rad/sec)

ω_{FLO2} : FLO2 각주파수 (rad/sec)

$\phi_{FLO1}(t)$: FLO1 위상잡음 (rad)

$\phi_{FLO2}(t)$: FLO2 위상잡음 (rad)

$$IF1(t) = \exp \left[j \left(\omega_{FLO1} t + \omega_{FLO2} t + \phi_{FLO1}(t) + \phi_{FLO2}(t) - \omega_{FLO1}(t - \tau_{dl}) - \phi_{FLO1}(t - \tau_{dl}) \right) \right] \quad (9)$$

다시, 식 (9) 내의 위상잡음 뺄셈은 참고문헌 [2]과 같이 원신호의 위상잡음에 식 (6)이 곱해져서 적분되는 형태로 나타난다. 식 (9)에 의하면 시간 지연 0이 되면, 첫 번째 혼합기 후단의 위상잡음이 FLO2의 위상잡음이 된다. 즉, 아무리 물리적 거리가 짧아 코히어런트 억압율이 높아 지더라도, FLO2의 위상잡음 이하로는 낮아질 수 없다.

요약하면 코히어런트 송수신 시스템에서 동일한 신호를 하향 변환하는 경우에는 출력 신호가 DC가 되고, 위상잡음은 원신호의 위상잡음에 식 (6)의 효과를 따르며, 위상잡음의 하한은 열잡음이 결정한다. 한편, 주파수가 다르지만 코히어런트한 신호를 하향 변환하게 되면 IF (intermediate frequency)로 반송파가 출력되고, 식 (6)의 코히어런트 억압 효과에 의해서 RF 신호의 위상잡음이 억압되어 IF 신호의 위상잡음으로 출력되나, 그 하한은 신호의 근원인 크리스탈 발진기로부터 IF 신호까지 생성하였을 때의 위상잡음 또는 열잡음 중 더 높은 준위를 가지는 신호에 의해 결정된다.

한편, 그림 7(두 번째 혼합기 후단의 위상잡음)은 그림 4에 식 (5)를 적용하여 아래와 같은 위상잡음 주파수 스케일링 효과가 기대된다.

$$20 \times \log_{10} \left(\frac{f_{IF2}}{f_{crystal oscillator}} \right) = -11.05 \text{ dB} \quad (10)$$

하지만, 실제 그림 7의 IF2 측정치는 예상보다 악화된 위상잡음을 보인다. 이는 주파수 스케일링 효과에 의해서 기대되는 위상잡음이 열잡음에 근접할수록 열잡음의 영향에 의해서 기대되는 수식 효과를 누리지 못하는 것으로 판단된다.

또한, 그림 6과 그림 7의 1 kHz 오프셋 주파수 부근에서 형성된 진동에 의한 뽀족한 위상잡음(국부 최대점, Local peak, 붉은색 점선 동그라미)은 IF1에서 IF2로 주파수 하향 변환 시에 전혀 억압되지 않음을 볼 수 있다. 이는 결과적으로 1 kHz 부근 위상잡음 국부 최대점이 주파수 합성기 내 FLO2 이후의 회로에 의해 유발되는 진동 중

위상잡음으로 FLO2 위상잡음과 1 kHz 부근 위상잡음 국부 최대점 간에 코히어런트 특성이 없기 때문이다. 그림 8 및 그림 9는 유사한 진동 프로파일로 다른 시기에 측정된 FTX 신호와 FLO1 신호의 진동 중 위상잡음이다. 두 신호 모두에서 확인할 수 있듯이 1 kHz 부근에 위상잡음 국부 최대점이 형성되지만, 그림 5의 FLO2에서는 1 kHz 부근에서 위상잡음 국부 최대점이 형성되지 않는다. 이는 IF1 신호 내 1 kHz 부근 위상잡음 국부 최대점과 FLO2 신호 간에 코히어런트 관계가 성립하지 않음을 보여주는 증거이며, 그렇기 때문에 1 kHz 부근에서 형성된 위상잡음 국부 최대점은 IF1에서 IF2로 주파수 하향 변환됨에도 불구하고 전혀 억압되지 않았다. 이는 크리스탈 발진기뿐

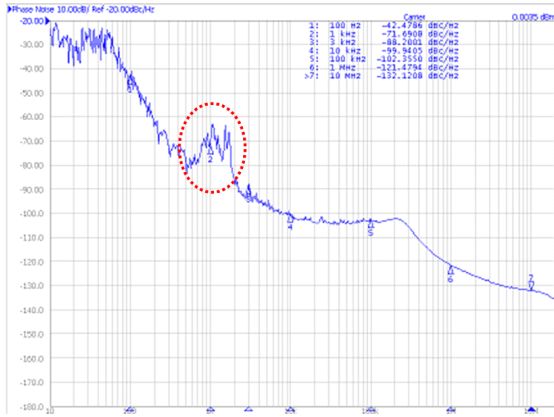


그림 8. FTX(송신 신호) 위상잡음(진동)
Fig. 8. TX signal phase noise(vib).

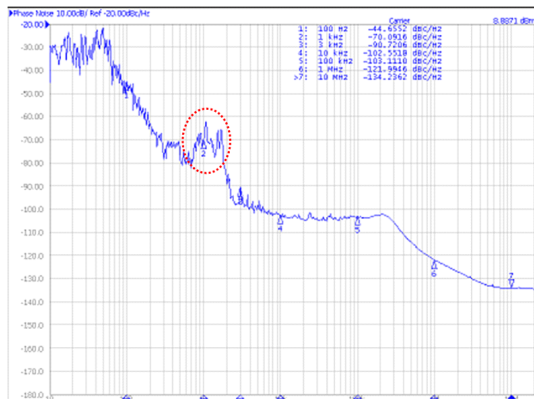


그림 9. FLO1 위상잡음(진동)
Fig. 9. FLO1 phase noise(vib).

아니라, RF 회로 중 진동에 영향을 받아 위상잡음 특성이 발현되는 회로가 있음을 의미한다. 설계 단계에서는 크리스탈 발진기 외의 다른 위상잡음 특성은 현실적으로 추정하기 힘들 뿐 아니라, 제작성과 관련되어 있을 수 있다^[10]. 또한, 대부분의 RF 회로는 진동 중 위상잡음 영향성을 데이터시트 상에 제시하지 않으므로 이러한 현상은 RF 하드웨어 엔지니어 입장에서 실험적으로 검증할 수밖에 없다.

따라서 크리스탈 발진기 외 고주파 대역 RF 회로에서 진동에 의해 위상잡음이 악화되는 현상을 가져 대역 신호까지 코히어런트하게 잘 억압되도록 수퍼헤테로다인 송수신기를 설계하기 위해서는 송신 신호와 모든 국부발진신호가 진동에 의한 위상잡음이 코히어런트 하도록 설계되어야 한다. 이에 효과적인 방법은 단일 주파수 상하향 변환 구조를 채택하되, IF 주파수를 낮게 설계하여 송신 신호와 국부발진신호 간 주파수 차이를 최소화하는 것이다. 이는 자연스럽게 송신 신호와 국부발진신호가 가능한 많은 물리적인 회로 경로를 공유하는 설계로 이어지므로 송신 신호와 국부발진신호 간 진동에 의한 위상잡음이 코히어런트 특성을 가질 확률을 높인다.

그림 10은 시간 지연을 가변해 가며 2번째 혼합기 후단의 신호의 위상잡음을 측정한 것이다. IF2와 크리스탈 발진기 신호의 주파수가 다르므로, 비교를 위하여 크리스탈

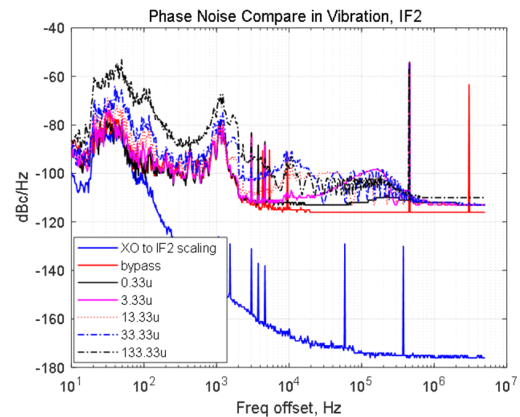


그림 10. 시간 지연을 가변한 진동 중 위상잡음(2번째 혼합기 후단, IF2)
Fig. 10. Phase noise during vibration with variable delay (The second mixer output, IF2).

발진기 신호의 위상잡음 준위를 식 (10)과 같이 주파수 스케일링하여 동일한 그래프에 도시하였다. 동일한 시간대에 동일한 진동 준위로 가진하고 측정된 송신 신호의 위상잡음은 아니지만, 그림 8의 송신 신호 위상잡음을 참고하여 그림 1의 거리에 의한 위상잡음 억압 효과를 적용하면 1 kHz 부근 국부 최대점 위상잡음을 제외하고, 그 이외의 영역에서는 비교적 이론과 측정치가 정성적으로 유사함을 확인할 수 있다(표 2). 또한, 지연 시간이 길어질수록 억압율이 저하되어 크리스탈 발진기 이상의 위상잡음을 가짐을 볼 수 있으며, 고 오프셋 주파수에서는 지연 함수 특유의 모양인 다중 극소점(null)이 형성되고, 열잡음 이상의 준위로 형성되어 관찰이 가능함을 확인할 수 있다.

그림 10 그래프의 데이터 중 크리스탈 발진기의 위상잡음이 지배적이라고 판단되는 100 Hz 이하의 데이터를 확대하여, 좀 더 상세히 분석한다. 그림 11은 이에 대한 그래프이다. 위상잡음 준위 자체를 분석하기 쉽게 크리스탈 발진기의 위상잡음 준위로 정규화 하였다. 이 경우 0 dB는 크리스탈 발진기의 위상잡음과 동일함을 의미하며, 양의 dB 값은 크리스탈 발진기의 위상잡음보다 악화된 경우이며, 음의 dB 값은 반대의 경우이다. 10 Hz~20 Hz 영역은 위상잡음 억압효과가 매우 커 0 dB 근처의 데이터로 형성되어야 할 것으로 예상되지만, 약 10 dB 정도의 데이터를 보여주고 있다. 이는 크리스탈 발진기에 동기화

표 2. 100 Hz 오프셋에서의 진동 중 위상잡음

Table 2. Phase noise during vibration at 100 Hz offset.

Time delay	Suppression (@ 100 Hz offset), Fig. 1	FTX phase noise (dBc/Hz) Fig. 8	Expected phase noise (dBc/Hz)	Measured phase noise (dBc/Hz) Fig. 10
Bypass	94 dB	Approx. - 45	-139	-96
0.33 μs	74 dB		-119	-96
3.33 μs	54 dB		-99	-90
13.33 μs	42 dB		-87	-83
33.33 μs	34 dB		-79	-79
133.33 μs	22 dB		-67	-65
Crystal oscillator phase noise : -103 dBc/Hz @ 100 Hz				

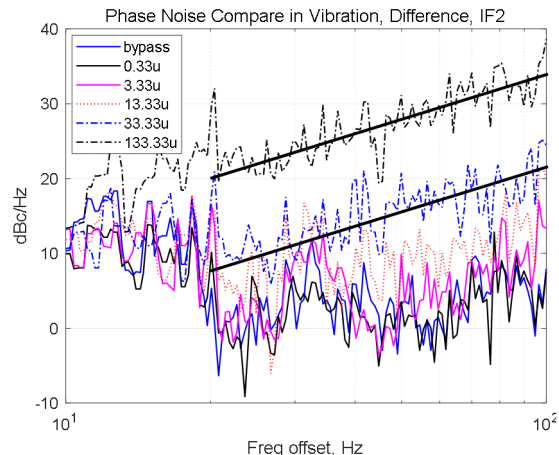


그림 11. 그림 10 확대 및 크리스탈 발진기 신호 준위 대비 정규화 수행

Fig 11. Zoom in Fig 10. and normalized to crystal oscillator signal level.

되지 않는 추가적인 위상잡음이 10 Hz~20 Hz 영역에서 존재하고, 이 잡음의 하한선이 크리스탈 발진기의 위상잡음 대비 약 +10 dB 수준임을 의미한다. 따라서 억압량이 충분치 않아 억압 후에도 크리스탈 발진기의 위상잡음 준위 + 10 dB 수준에 도달하지 못하는 133.33 μ s 지연 시간의 경우는 10 Hz까지 그림 1의 억압율 그래프 기울기가 나타남을 볼 수 있다.

표 2는 그림 1 100 Hz 오프셋 위상잡음 억압량과 그림 8의 FTX 위상잡음 측정치를 이용하여 예상 위상잡음을 산출하고, 이를 그림 10의 측정치와 비교한 것이다. 지연 시간이 긴 33.33 μ s, 133.33 μ s에서는 예상 위상잡음과 측정 위상잡음이 비교적 잘 일치하나, bypass ~ 3.33 μ s에서의 측정 위상잡음은 크리스탈 발진기의 위상잡음에 근접할 뿐, 더 이상 내려가지는 못하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 이미 식 (8), 식 (9)로 설명한 원리 때문이다. 또한, bypass에서 3.33 μ s까지 지연시간은 10 Hz~100 Hz 오프셋 내의 대부분 영역에서 예상 위상잡음이 크리스탈 발진기의 위상잡음보다 더 낮은 준위로 형성되므로, 그림 11의 데이터가 0 dB 근처의 준위로 형성되는 것이 설명된다.

13.33 μ s~133.33 μ s는 억압 준위가 충분치 않아 위상잡음 억압 그래프의 기울기가 보이기 시작한다. 13.33 μ s

에서는 0 dB와 준위가 가까워 잘 보이지 않지만 $33.33 \mu\text{s}$ 와 $133.33 \mu\text{s}$ 에서는 가상의 평균선이 선형 기울기를 가지고 있음이 확인된다. 위상잡음 억압 그래프의 기울기는 20 dB/Decade인데, 이를 20 Hz에서 100 Hz까지의 변화량으로 환산하면 14 dB이다. 이와 동일한 기울기를 가지는 가상의 선을 그림 11에 검은색 굵은 실선으로 표시하였으며, $33.33 \mu\text{s}$ 와 $133.33 \mu\text{s}$ 의 위상잡음 추이와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

4.1 제안하는 기술

결론적으로 진동 중 위상잡음은 크리스탈 발진기에 의해서 주요하게 생성되지만, 예측되지 않는 기타의 위상잡음 소스가 존재하며, 이는 존재하는 회로의 위치에 따라서 최종 기저대역에서 코히어런트 위상잡음 억압 효과에 제한된다. 또한 위상잡음 억압함수는 진동 중에도 잘 동작하며, 표적이 원거리에 있을 경우, 고 오프셋 영역에서는 열잡음뿐 아니라, 위상잡음 억압함수가 지배적인 영역이 존재할 수 있다.

고품질의 위상잡음이 필요한 고해상도 파형을 사용하는 소형레이다용 주파수합성기 및 송수신 시스템 설계 측면에서는 다중표적 식별 능력을 향상시키고, 클러터로부터의 영향을 최소화하는 동시에 위상잡음으로 인한 오프셋 탐지를 최소화하기 위하여, 예측되지 않는 기타의 위상잡음 소스를 최대한 코히어런트하게 억압할 필요가 있다. 이를 위하여, 수퍼헤테로다인 수신 구조 하에서는 단일 주파수 상하향 변환 구조를 채택하되 최종 IF 주파수를 낮게 설계하여 송신 신호와 국부발진신호 간 주파수 차이를 최소화하여 송신 신호와 국부발진신호가 가능한 많은 물리적 회로 경로를 공유하도록 설계하는 것이 유리하다. 물론, 진동에 강건한 발진기를 적용하거나, 진동에 둔감한 기계적 구조를 적용하는 노력도 병행될 필요가 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 고속 비행체 탑재용 소형 주파수합성기에 실제로 진동을 인가하고, 측정 데이터를 이용하여 진

동 중 위상잡음 현상을 주파수합성기 및 송수신 하드웨어 설계 관점에서 분석하였다. 크리스탈 발진기 외에 다른 진동 중 위상잡음 소스가 있음을 보였으나, 구체적인 원인 및 해결 방안에 대한 것은 좀 더 연구가 필요할 것으로 판단된다. 다만, 이를 송수신 구조 설계 관점에서 최소화 하려면, 가능한 많은 물리적 회로 경로를 공유하는 송신 신호와 국부발진신호를 가지면서 IF 주파수가 낮은 단일 주파수 변환 방식의 수퍼헤테로다인 구조가 유리하다.

References

- [1] G. Brooker, *Introduction to Sensors for Ranging and Imaging*, Paris, Scitech, pp. 442-461, 2009.
- [2] J. Lee, "A study on analysis of phase noise effects in a FM-CW radar system", *The Journal of the Korean Institute of Maritime Information & Communication Science*, vol. 15, no. 9, pp. 1840-1846, Sep. 2011.
- [3] D. Kim, M. Kim, S. Lee, S. Baik, H. Kwon, and M. Jeong, "A design and measurement of a reference signal generator for a radar system", *The Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 9, no. 3, pp. 118-123, Sep. 2009.
- [4] Y. S. Li, H. G. Ryu, Y. H. Jeong, and Y. K. Hahm, "Phase noise analysis in the OFDM communication system", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 15, no. 11, pp. 1043-1050, Nov. 2004.
- [5] J. Son, J. Lee, G. Ryu, and J. Park, "Effects of the phase noise in the frequency synthesizer on the SFH/M-NCFSK system", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 14, no. 7, pp. 686-692, Jul. 2003.
- [6] B. Jang, M. Kang, and J. Lim "Performance analysis of the UHF RFID reader with the range correlation effects of the phase noise", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 2, pp. 152-160, Feb. 2008.
- [7] Wenzel Associates, "Vibration-induced phase noise," Available:

<https://wenzel.com/library/time-frequency-articles/vibration-induced-phase-noise/>

- [8] Q. X. Shan, Y. Jun, J. Y. Chen, T. Qian, and L. Z. Ji, "Acceleration "G" compensated for VCOCXO based on digital controller", in *2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum(FCS) Proceedings*, San Francisco, CA, 2011, pp. 1-4.

- [9] S. J. Goldman, *Phase Noise Analysis in Radar Systems Using Personal Computers*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 31-40, 1989.

- [10] M. M. Driscoll, J. B. Donovan, "Vibration-induced phase noise: It isn't just about the oscillator", in *2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum*, Geneva, May.-Jun. 2007, pp. 535-540.

박진성 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7273-0366>



2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2010년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더용 RF 송수신기 등

김광희 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0363-8563>



1998년 2월: 전남대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
2000년 2월: 전남대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
2002년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] RF, 레이더 신호처리 등

김은일 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7975-8265>



2007년: 한국과학기술원 전자공학과 (공학사)
2009년: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
2009년~2013년: 한국전자통신연구원
2013년~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF, 레이더 신호처리