

W대역 소형 레이더의 주파수 해상도 향상을 위한 위상잡음 분석

Phase Noise Analysis to Improve Frequency Resolution of W-Band Compact Radar

서 미 희 · 김 현 주 · 김 소 수

Mihui Seo · Hyun-ju Kim · Sosu Kim

요 약

FMICW 레이더에서는 표적의 거리 및 속도에 따른 주파수 정보를 바탕으로 대상 표적을 탐지 · 추적한다. 따라서 수신신호의 위상잡음을 최소화하여 주파수 해상도를 높여 레이더의 탐지 · 추적 정확도를 확보해야 한다. 한편, 기준신호에 비해 주파수가 증가할수록 위상잡음이 악화되므로, 높은 주파수를 운용하는 레이더에서는 위상잡음 설계가 매우 중요하다. 본 논문에서는 W대역 소형 레이더의 송신신호(FTX), 국부발진신호(FLO1, FLO2) 및 기준신호(F_{ref})의 위상잡음을 분석하였다. W대역 송수신기에서 구현 가능한 위상잡음 범위에서 레이더의 주파수 해상도를 높이기 위한 W대역 신호의 위상잡음 규격을 도출하였다.

Abstract

FMICW radars detect and track targets using frequency information based on the distance and velocity of the target. Therefore, the phase noise of the received signal and the frequency resolution must be minimized to ensure detection and tracking accuracy of the radars. However, as the signal frequency increases, the phase noise degrades. Therefore, the design requirement of the phase noise is important for radar using high-frequency signals. In this study, the phase noise of the transmission signal (FTX), local oscillation signal (FLO1, FLO2), and reference signal (F_{ref}) are analyzed for application to a W-band compact radar. Additionally, phase-noise requirements are derived to increase the frequency resolution of the radar within a range that can be implemented in a W-band transceiver.

Key words: W-Band Signal, Phase Noise, Frequency Resolution

I. 서 론

RF 신호의 위상잡음은 반송파 주파수 근방에서 위상의 연속적인 변화를 나타내는 변수로, 반송파로부터 offset 주파수 떨어진 곳의 1 Hz당 잡음전력과 반송파 신호의 전력 사이 비율로 나타낸다.

위상잡음이 높은 수신신호는 이상적인 수신신호에 비해 넓은 스펙트럼 폭에 의해 수신신호 간의 간섭을 키워 다중 표적 혹은 다중 산란점의 신호가 수신될 경우, 신호 사이의 구분이 모호해지는 문제점을 발생시킨다. 또한, 높은 위상잡음은 침투 전력을 낮추고, 반송파 근방의 주파수에서 잡음 전력을 증가시켜 이상적인 수신신호에 비

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.」

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 14, 2022 ; Revised February 4, 2022 ; Accepted March 3, 2022. (ID No. 20220114-007)

· Corresponding Author: Mihui Seo (e-mail: seomihui@add.re.kr)

해 SNR 성능을 저하시키므로, 위상잡음은 레이더의 성능을 결정하는 중요한 변수 중 하나이다^{[1]~[3]}.

또한, 수신기 내에서 국부발진신호에 의해 하향변환될 때, 수신신호의 위상잡음은 국부발진신호의 위상잡음만큼 악화된다. 단, 송신신호와 위상이 결맞는 국부발진신호가 사용되는 경우에는 위상잡음이 식 (1)에 의해 억압(cancellation)되어, 수신신호의 위상잡음이 송신신호에 비해 우수해질 수 있다^[4].

$$Cancellation = 10 \cdot \log_{10}(2 - 2\cos\theta) \text{ [dB]} \quad (1)$$

여기에서 θ 는 송신신호와 국부발진신호 사이의 위상차로 offset 주파수 f_o , 지연시간 Δt 에 대해 $2\pi f_o \Delta t$ 로 계산된다. 하지만 그림 1의 이중 하향변환구조 수신기의 경우, 국부발진신호의 주파수가 송신신호와 동일하지 않으므로 각 신호는 그림 2처럼 서로 다른 경로를 통해 생성되며, 그에 따라 위상잡음의 억압 효과가 미비할 것으로

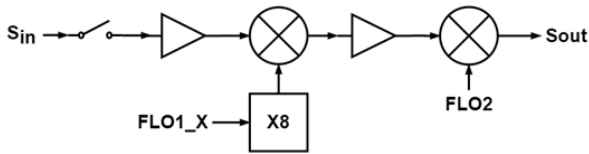


그림 1. 이중 하향변환 수신기 구조
Fig. 1. Configuration of double conversion receiver.

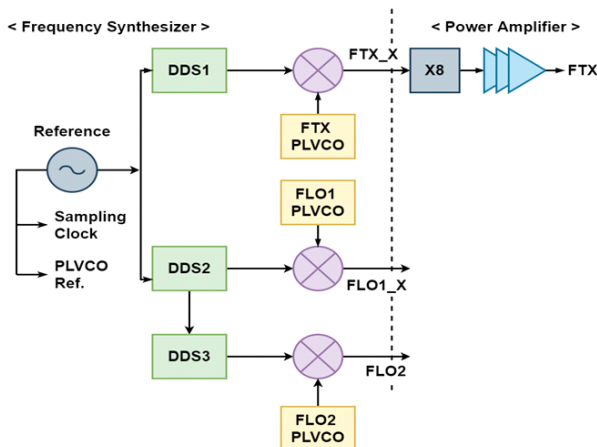


그림 2. 주파수합성기와 송신기를 포함하는 송신부 구조
Fig. 2. Configuration of transmitter with frequency synthesizer and power amplifier.

판단된다. 기존 연구 결과에 따르면, 결맞은 상태의 주파수가 다른 두 신호가 혼합된 신호의 위상잡음은 상관 부분(correlated part)과 비상관 부분(uncorrelated part)으로 나눌 수 있으며, 특정 주파수 이하에서만 상관 부분의 영향성으로 위상잡음이 낮아지는 효과를 확인하였다^[5]. 또한, 위상잡음의 효과적인 억압을 위해서는 송신신호와 국부발진신호 간 주파수 차이를 최소화하고, 최대한 물리적으로 경로를 많이 공유할 수 있도록 설계해야 한다^[6]. 그러나 본 레이더의 송신부는 W대역 주파수를 활용하므로 경로 손실을 줄이기 위해 그림 2와 같이 송신신호 FTX 및 밀리미터파 국부발진신호 FLO1 신호의 X대역 신호까지만 주파수 발생부에서 생성하며, 송신기의 증폭기 및 수신기의 혼합기 앞단에 8체배기를 이용하여 W대역 신호로 상향변환을 하도록 설계되었다. 그에 따라 FTX 신호와 FLO1 신호의 경로가 서로 다르므로 각 경로의 위상을 동일하게 유지하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 그림 2의 구조에서 FTX, FLO1 및 S대역 국부발진신호 FLO2의 위상잡음이 모두 반영된 수신기 출력신호 S_{out} 의 위상잡음을 예측하였다. 이 결과를 활용하여 신호처리 시 위상잡음 영향을 최소화할 수 있는 W대역 소형 레이더의 송신부 위상잡음 규격을 제안하였다.

추가적으로, 신호처리 중 클럭신호의 지터에 의한 위상잡음 악화를 분석하고, 신호처리기의 클럭신호로 사용되는 주파수합성기 기준신호의 위상잡음 규격을 제안하였다. W대역 소형 레이더는 상공에서 운용되는 항공기, 무인기 등에 탑재되는 것을 목표로 하므로, 진동 환경을 고려하여 규격을 도출하였다.

II. W대역, X대역, S대역 위상잡음 규격 설계

그림 3은 기존의 Ka, Ku 대역 소형 레이더 위상잡음을 기반으로 하여 도출한 W대역 소형 레이더의 위상잡음 규격이다. 본 시스템은 진동 환경을 고려하여 위상잡음 규격을 설계해야 하므로, $20 \cdot \log_{10}(FTX/f_{Ku})$ 를 적용하여 기존의 Ku 대역 소형 레이더의 진동 중 위상잡음보다 약 15 dB 높게 정하였다. FTX와 FLO1은 W대역 주파수이므로 위상잡음 규격은 동일하게 사용하였다. X대역 신호인 FTX_X, FLO1_X 위상잡음은 $20 \cdot \log_{10}(FTX_X/FTX)$ 를 적

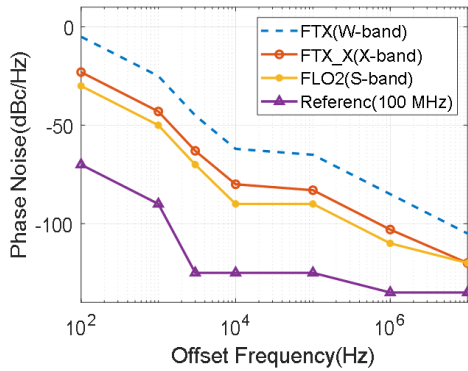


그림 3. 송신부 출력신호 위상잡음 규격(기준 규격)
Fig. 3. Phase noise requirement of transmitter output signal (original).

용하여 W대역 신호에 비해 위상잡음을 18 dB 낮게 정하였다. FLO2 및 100 MHz 기준신호는 기존의 시스템과 유사한 주파수를 사용하므로, 동일한 규격을 적용하였다.

그림 3에 나타난 규격을 바탕으로 수신기 출력 신호의 위상잡음을 계산하였다. 그림 1의 S_{out} 신호 위상잡음 L_T 는 FTX가 표적에 반사되어 수신된 신호 S_m , 국부발진신호 FLO1, FLO2 위상잡음 및 신호처리 지터잡음(L_{FTX} , L_{FLO1} , L_{FLO2} , L_j)의 합으로 계산하였다. 단, 앞서 언급한 바와 같이 주파수합성기와 수신기의 구조적 이유로 위상잡음 억압은 일어나지 않는다고 가정하였으며, L_{FTX} 와 L_{FLO1} 은 같다⁷⁾.

$$L_T(f) = 10 \log_{10} (2 \times 10^{L_{FTX}(f)/10} + 10^{L_{FLO2}(f)/10} + 10^{L_j(f)/10}) \text{ [dBc/Hz]} \quad (2)$$

수신기 출력신호 스펙트럼 분석을 위한 FFT 수행 시, W대역 소형 레이더의 신호처리 운용조건을 반영하여 1 FFT cell의 대역폭 BW_{FFT} 는 100 Hz로 설정하였다. 본 레이더에서는 BW_{FFT} 를 주파수 해상도로 하여, 최소 FFT cell 3개 간격으로 떨어진 동일 전력의 두 산란점을 구분하는 것을 목표로 한다. 참고로 레이더의 거리 해상도는 송신신호의 주파수 선형 변조(LFM) 대역폭 BW에 의해 $c/(2 \cdot BW)$ 로 계산된다. 신호처리에서는 FFT 후 거리 해상도에 대응하는 주파수를 구분할 수 있도록 FFT 조건을 정해야 한다.

주파수 해상도 성능을 예측하기 위해 그림 3의 위상잡

음을 식 (2)에 적용하여 300 Hz 떨어진 A, B 두 신호의 구분 유무를 확인하였다. 그림 4와 같이 0 dBm의 이상적인 정현파가 출력되는 경우, 신호처리 중 사용된 70 dB 체비셰프(Chebyshev) 윈도우에 의해 부엽 준위가 침두전력 0 dBm의 중심주파수에 비해 70 dB 낮고, 3 dB 대역폭이 약 0.1 kHz인 폭이 좁은 단일 신호 스펙트럼을 얻어, A, B 두 신호의 구분이 명확함을 확인하였다. 반면에 정현파 신호에 그림 3의 위상잡음이 적용되면 위상잡음에 의해 단일 신호의 전력이 주변 주파수에 전력이 3 dB 대역폭이 약 8 kHz로 매우 넓어지면서 중심주파수 준위가 약 19 dB 낮아지고, 신호 A, B 구분이 어려움을 확인하였다. FMICW 레이더에서 수신신호의 주파수는 표적의 거리 및 속도 정보를 나타내므로 해상도가 높을수록 탐지·추적 정확도가 높아진다. 하지만 그림 4와 같은 결과에서는 시스템에서 목표로 하는 정확도의 레이더를 구현하는 것이 불가능하므로 규격 수정이 필요하다.

본 논문에서는 W대역 소형 레이더의 주파수 해상도를 높이기 위해, 수신신호의 중심주파수에 근접한 주파수에서 위상잡음을 낮추면서, 두 신호의 구분이 가능한 위상잡음을 도출하였다. A, B 두 신호 사이의 최저값인 A, B 신호의 침두 전력과 3 dB 이상 차이를 보이는 위상잡음을 새로운 규격으로 정의하고자 한다.

100 Hz, 1 kHz, 3 kHz 오프셋 주파수에서 각 신호에 대한 그림 3의 요구규격에 비해 15 dB, 25 dB, 35 dB 낮은 위상잡음을 가진 수신신호의 출력 스펙트럼을 분석해 보

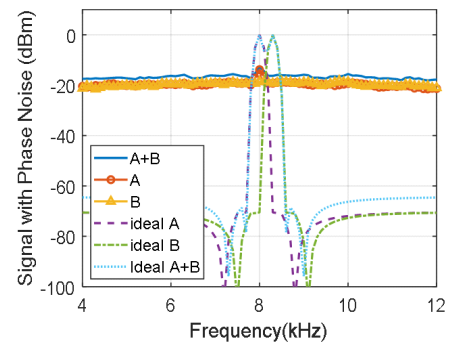


그림 4. 위상잡음(기준 규격)을 적용한 출력신호 스펙트럼 분석 결과

Fig. 4. Analysis result of receiver output signal with phase noise requirement(original).

았다. 그림 5(a)와 같이 위의 세 오프셋 주파수에서 위상 잡음이 15 dB 낮아지면, A, B 신호의 각각 스펙트럼 폭이 그림 4에 비해 좁아지지만, 각 신호를 구분하기에는 적합하지 않다. 요구규격에 비해 주파수합성기 신호들의 위상 잡음이 25 dB 낮아지면, 3 dB 대역폭은 약 0.2 kHz로 이상적인 신호에 비해 스펙트럼 폭은 넓으나, 두 신호 사이의 최소값이 두 신호의 침두전력에 비해 약 4 dB 낮아지면서, A, B 신호의 구분이 가능해졌다. 다만, 침두전력은 -2.1 dBm으로 입력 전력 0 dBm에 비해 낮게 계산되었다. 요구규격에 비해 주파수합성기 신호들의 위상잡음이 35 dB 낮아지면, 3 dB 대역폭이 이상적인 정현파의 스펙트럼과 유사하게 0.1 kHz로 좁아졌다. 그에 따라, 침두전력이 -0.7 dBm으로 입력 전력과 유사해지고, 두 신호 사이의 최소값보다 5.9 dB만큼 크므로 A, B 신호의 구분이 더 유리해졌다.

다만, 하드웨어적으로 구현 가능한 위상잡음에 한계가 존재하므로 주파수합성기 및 송신기 하드웨어 개발 가능성을 고려하여 그림 5(b) 조건을 새로운 규격으로 정하고자 한다.

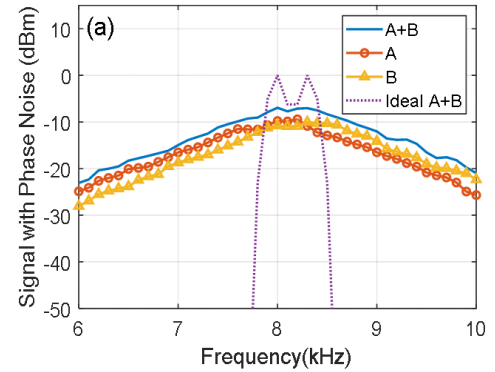
III. 기준신호 위상잡음 규격 설계

앞서 논의한 주파수합성기 출력 신호의 위상잡음을 만족하기 위해 진동 중 기준신호 F_{ref} 의 위상잡음 규격을 도출하였다. 그에 따라 II 장에서 수정된 FTX 신호의 위상잡음 규격에서 $20\log_{10}(F_{ref}/FTX)$ 을 적용하여 기준신호의 위상잡음 규격을 수정하였다. 또한, 기존 소형 레이더에서 개발된 주파수합성기의 기준 발진기의 진동 중 위상잡음 성능을 참고하여 개발 가능한 기준신호의 위상잡음 규격을 도출하였다.

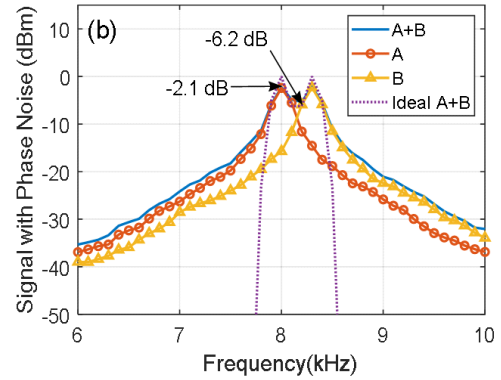
추가적으로 기준신호를 클럭신호로 사용하는 신호처리에 기준신호의 지터(jitter) Δt_{jitter} 가 미치는 영향성을 분석하였다. 신호처리기의 ADC에 인가되는 클럭신호에 시간에 따른 왜란 즉 지터(jitter, Δt_{jitter})가 존재하면 수신되는 아날로그 신호의 모호성이 증가하므로 식 (3)과 같이 ADC의 SNR_{ADC} 가 감소하는 문제가 발생한다^[8].

$$SNR_{jitter} = -20\log_{10}(\Delta t_{jitter} \cdot 2\pi f_{in}) [dB] \quad (3)$$

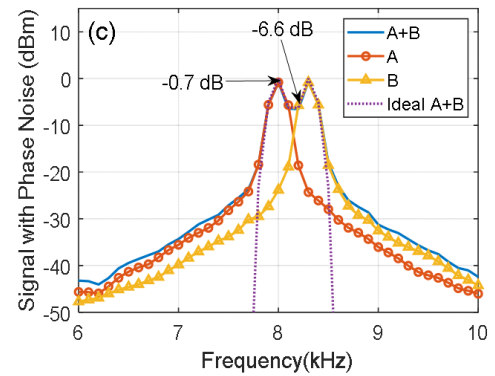
Δt_{jitter} 는 주파수 영역에서 식 (3)을 통해 계산된다.



(a) 15 dB



(b) 25 dB



(c) 35 dB

그림 5. 100 Hz, 1 kHz, 3 kHz 오프셋 주파수에서 위상 잡음이 기존 규격보다 낮을 때 수신신호의 스펙트럼 분석 결과

Fig. 5. Analysis result of receiver output signal with phase noise lower than requirement at 100 Hz, 1 kHz, 3 kHz offset frequency.

$$\Delta t_{jitter} = \frac{1}{2\pi f_s} \sqrt{2 \int_0^\infty 10^{L_{ref}(f)/10} df} \quad [s] \quad (4)$$

W대역 소형 레이더에서 사용한 ADC는 Analog device사의 AD9695이다. ADC의 성능을 바탕으로 식 (3) 및 식 (4)를 이용하여 계산된 기준신호의 지터는 1.26 ps, SNR_{jitter} 는 56 dB이다. 600 MHz 클럭신호에 대한 AD9695의 SNR_{ADC} 이 68.5 dB이므로 기준신호의 지터에 의해 악화된 총 SNR_T 값은 식 (5)에 따라 55.8 dB이다.

$$SNR_T = -20 \log_{10} \sqrt{10^{-\frac{SNR_{ADC}}{10}} + 10^{-\frac{SNR_{jitter}}{10}}} \quad (5)$$

위의 분석은 이상적인 델타 함수의 수신기 출력 신호에 대해 지터 잡음이 미치는 영향성을 분석한 내용이다. 하지만, 실제로는 이상적인 정현파 신호가 신호처리에 입력되더라도 FFT 처리 중 사용되는 윈도우 함수에 의해 스펙트럼상의 부엽 준위는 낮아지고, 주엽의 스펙트럼 폭은 넓어져 그림 6의 위상잡음이 없는 신호의 스펙트럼과 같은 결과를 얻게 된다. 따라서 실제 상황에서 클럭신호의 위상잡음 영향을 확인하기 위해 정현파 신호의 스펙트럼이 윈도우에 의해 넓어지는 현상과 기준신호 위상잡음에 의해 넓어지는 현상을 비교하였다.

계산 결과, 그림 6과 같이 기존 규격의 위상잡음을 적용한 기준신호는 체비셰프 윈도우가 적용된 정현파 신호에 비해 0.3 kHz~1.7 kHz offset 주파수 영역에서 위상잡

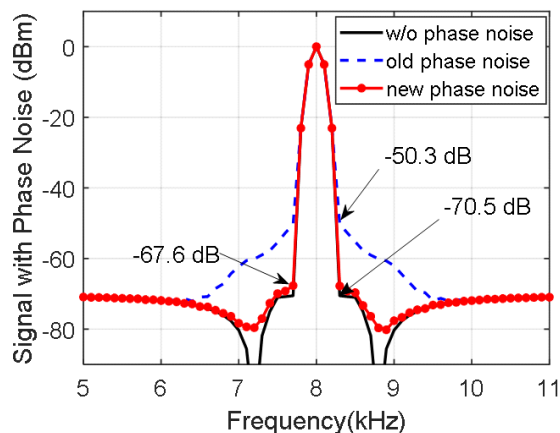


그림 6. 기준신호의 지터잡음 영향성 분석
Fig. 6. Analysis result of reference signal jitter effect.

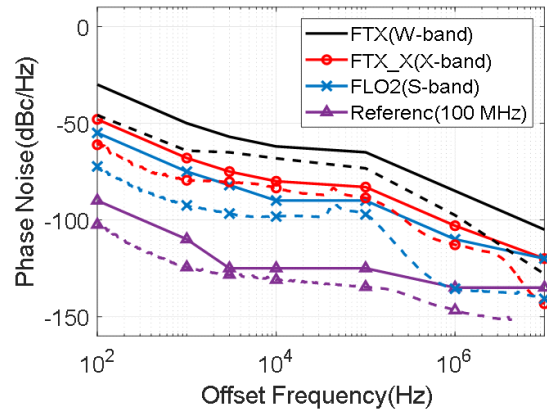


그림 7. 송신부 출력신호 위상잡음 규격(제안 규격[실선] 및 측정 결과[점선])

Fig. 7. Phase noise requirement of transmitter output signal proposed[solid] and measured[dot].

음 준위가 악화됨을 확인하였다. 반면에, 본 논문에서 새로 도출된 위상잡음이 적용된 기준신호는 이상적인 정현파와 거의 유사한 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 따라서 새로 도출된 기준신호에 의한 신호처리 시 영향성은 미비할 것으로 판단된다. 참고로, 기준신호의 새로운 위상잡음 규격은 기존 규격 대비 100 Hz, 1 kHz offset 주파수에서 20 dB 더 낮다.

본 장에서 정해진 기준신호의 위상잡음을 고려하여 최종적으로 W대역 신호의 위상잡음은 100 Hz, 1 kHz 오프셋에서는 기존 규격 -25 dB, 3 kHz 오프셋에서는 기존규격 -12 dB이며, 그림 7과 같다.

IV. W대역 소형 레이더 개발 결과

그림 8은 W대역 소형 레이더의 주파수발생기와 수신기이다. 개발된 구성품의 위상잡음을 신호분석기를 통해 측정하였으며, 그 결과를 그림 7에 포함하였다. 송신기와 주파수합성기의 위상잡음은 각각 측정되었다. 따라서 그림 7에서 FTX 위상잡음 측정값은 X대역 신호발생기에서 송신기로 입력되는 신호의 위상잡음과 송신기의 FTX 위상잡음의 차이값 Δ 를 측정한 후, 측정된 주파수합성기의 FTX_X 위상잡음에 Δ 를 더하여 보정한 결과이다. Δ 를 FTX와 FTX_X 주파수 비율로 계산하면 18 dB를 만족해

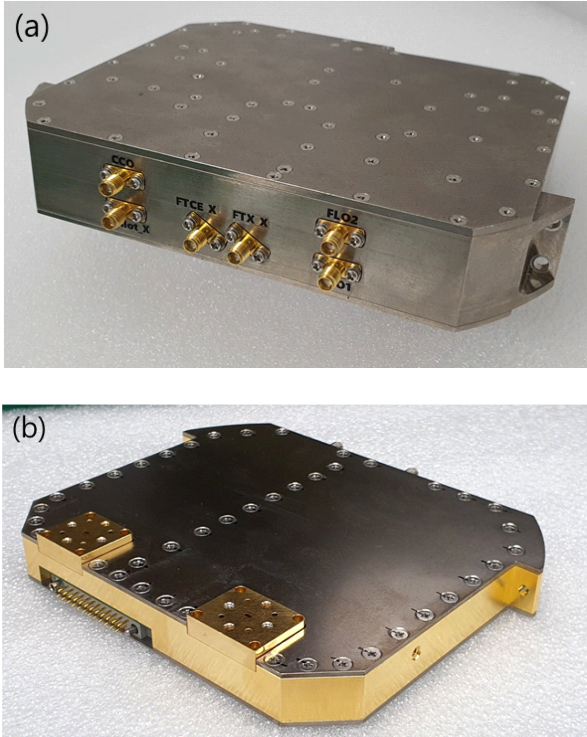


그림 8. 개발된 (a) 주파수합성기, (b) 송신기
Fig. 8. Developed (a) frequency synthesizer and (b) power amplifier.

야 하나, 송신기에 사용된 소자들의 특성에 따른 주파수별 성능편차로 인해 Δ 는 13.6~18.7 dB로 측정되었다.

본 논문에서 제안한 FTX, FLO1, FLO2 위상잡음 규격을 바탕으로 개발된 W대역 소형 레이더의 출력신호(IF signal) 스펙트럼을 측정하였다. W대역 소형 레이더의 구성품으로 개발된 주파수합성기, 송신기, W대역 수신기, IF 수신기 및 신호처리기를 연동시켜 그림 9와 같이 실험 셋업을 구성하였다. FTX 신호의 위상잡음 특성을 가지는 표적신호를 모사하기 위해 송신기의 FTX 신호를 W대역 수신기 입력전력 수준으로 감쇠시켜 수신기로 직접 입력하였다. 수신기에서 증폭 및 주파수가 하향된 IF 신호는 신호처리기에서 FFT 처리된 후, 레이더 점검장비에 저장 및 도식화된다. 이 때 신호처리기에서는 FFT 1 cell의 대역폭을 100 Hz로 사용한다.

수신기 출력신호의 스펙트럼 측정 결과는 그림 10과 같다. 또한 측정 결과와 위상잡음 규격 및 개발된 송신부

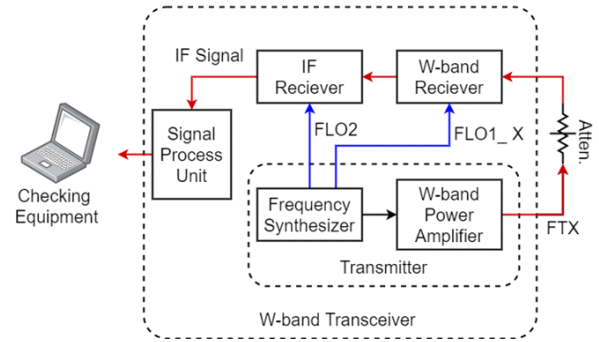


그림 9. W대역 소형 레이더의 출력신호(IF신호) 스펙트럼 측정 셋업

Fig. 9. Experimental setup for measuring spectrum of W-band compact radar's output signal.

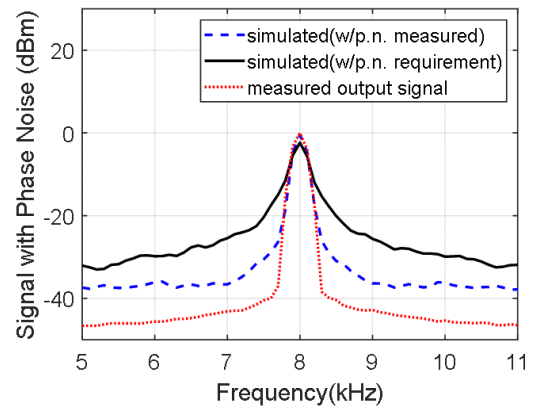


그림 10. W대역 소형 레이더 수신기의 출력신호 스펙트럼 측정 결과와 계산 결과의 비교

Fig. 10. Comparison of measurement result and simulation result of output signal spectrum for W-band compact radar.

출력신호의 위상잡음 측정값을 식 (2)에 적용하여 계산된 수신기 출력신호의 스펙트럼을 비교하였다. 측정 결과와 계산 결과의 비교가 쉽도록 각 신호의 최대값을 동일하게 정규화(normalize)하여 그림 10에 나타내었다.

W대역 소형 레이더 송신부 출력신호들의 위상잡음이 규격에 비해 우수하며, 각 신호에서 공통이 되는 기준신호에 의한 영향으로 위상잡음 cancellation이 일부 발생하여 예상보다도 레이더 출력신호의 스펙트럼 폭이 더 좁은 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 W대역 소형 레이다용 송신부의 위상잡음 영향성에 대해 분석하고 그 결과를 반영하여 새로운 위상잡음 규격을 도출하였다. 또한, 이를 바탕으로 개발된 W대역 소형 레이다의 출력신호를 확인하였다.

기존의 Ku대역 소형 레이다의 위상잡음 규격보다 $20\log(F_W/F_{Ku})$ 만큼 악화되는 위상잡음을 W대역 신호에 반영하면, 넓은 스펙트럼 폭에 의해 신호처리 후 주파수 해상도 규격을 만족할 수 없는 것을 확인하였다. 반면에, 주파수 해상도에 직접 영향을 미치는 100 Hz, 1 kHz, 3 kHz 오프셋 주파수의 위상잡음이 25 dB 낮아지면, 1 FFT cell 대역폭이 100 Hz일 때 300 Hz 간격의 신호 구분이 가능해졌다. 이 결과를 반영하여 W대역 신호인 FTX, X대역 신호인 FLO1(FTX_X), S신호인 FLO2 및 기준신호의 위상잡음을 새로 도출하였다.

클럭신호로 사용되는 기준신호의 경우, 신호처리관점에서 추가로 분석한 결과, 체비셰프 70 dB 윈도우에 의한 스펙트럼 폭과 클럭신호의 지터잡음에 의한 스펙트럼 폭이 유사하였다. 따라서 새로 도출된 위상잡음을 바탕으로 한 기준신호를 클럭신호로 활용하는 것은 적절함을 확인하였다.

추가적으로, 본 논문에서 도출된 위상잡음 규격을 바탕으로 개발한 W대역 소형 레이다의 수신기 출력신호 스펙트럼을 측정하였다. 개발된 송신부의 출력신호 위상잡음 성능이 규격보다 우수하였으며, 일부 발생된 신호사이의 cancellation에 의해 레이다 출력신호의 스펙트럼 폭이 예상보다도 더 좁은 것을 확인하였다. 본 결과에 따라, 개발된 W대역 소형 레이다는 시스템의 주파수 해상도 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] J. Xicheng, *Digitally-Assisted Analog and Analog-Assisted Digital IC Design*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 281-288, 2015.
- [2] C. Poole, I. Darwazeh, *Microwave Active Circuit Analysis and Design*, London, Elsevier, p. 564, 2016.
- [3] W. Wu, R. B. Stazewski, and J. R. Long, *Millimeter-Wave Digitally Intensive Frequency Generation in CMOS*, London, Elsevier, pp. 110-112, 2016.
- [4] C. Alabaster, *Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications*, Edison, NJ, SciTech, pp. 143-144, 2012.
- [5] D. Rönnow, S. Amin, M. Alzadeh, and E. Zenteno, "Phase noise coherence of two continuous wave radio frequency signals of different frequency," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 77-85, Jan. 2017.
- [6] J. Park, E. I. Kim, and K. H. Kim, "Analysis of degradation phase noise by vibration of frequency synthesizer for compact radar using high resolution waveform," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 7, pp. 651-660, Jul. 2021.
- [7] K. Siddiq, R. J. Watson, S. R. Pennock, P. Avery, R. Poulton, and B. Dakin-Norris, "Phase noise analysis in FMCW radar systems," in *2015 European Radar Conference(EuRAD)*, Paris, Sep. 2016, pp. 501-504.
- [8] C. Azeredo-Leme, "Clock jitter effects in sampling: A tutorial," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 26-37, 2011.

서 미 희 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3441-0190>



2006년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)
2013년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
2013년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 초고주파 송수신기 개발

김 소 수 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1110-7896>



1993년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1996년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 소형 레이더

김 현 주 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6699-5720>



2006년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학 (공학사)
2008년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학석사)
2013년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학부 (공학박사)
2013년 3월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리