

위상잡음이 레이더 시스템에 미치는 영향 분석

Analysis of Effects of Phase Noise in Radar System

박진성*

Jinsung Park

ABSTRACT

In this paper, the effects of phase noise on the radar system were analyzed in terms of 3 point of view. The impact(s) on the compressed pulse waveform, the FMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) radar performance and the receiver sensitivity were investigated. From the investigation, it was indicated that the phase noise over 10 kHz offset frequency makes the side lobe level of compressed pulse worse. Also it was founded that the FMICW radar performance, especially at the noise level of range profile, is related to the phase noise. Finally, the investigation showed that the phase noise at local oscillator affects the receiver sensitivity.

Keywords : Phase Noise, Radar, Pulse Compression, FMICW, Receiver Sensitivity

1. 서론

이상적인 정현파(sine wave)는 주파수 축에서 하나의 주파수 성분만을 가지는 델타 함수(delta function)로 나타낼 수 있으나, 실질적인 발진기는 반송파를 중심으로 여러 개의 주파수 성분을 가지는 형태로 나타나고, 반송파를 제외한 불필요한 주파수 성분을 위상잡음(phase noise)이라고 한다. 위상잡음은 원인 및 현상에 따라 크게 5종류^[1]로 나뉜다. 첫째로 random walk FM 잡음이며 반송파에 매우 근접해 나타나고 $1/f^4$ 스펙트럼 특성을 가진다. 일반적으로 기계적 충격, 진동, 온도와 같은 물리적 환경에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 둘째로 flicker FM 잡음이며 물리적 공명

원리나 발진기 내부 전기 소자의 설계에 의하여 결정되는 것으로 이해되고 있다. $1/f^3$ 의 스펙트럼 특성을 가진다. 셋째로 white FM 잡음이며 $1/f^2$ 스펙트럼 특성을 가진다. 세슘이나 루비듐 발진기와 같은 높은 Q 특성을 가지는 소자에 위상 잠금(phase lock)이 걸린 발진기에서 일반적으로 나타나는 잡음으로 알려져 있다. 넷째로 flicker PM 잡음이며 $1/f$ 스펙트럼 특성을 가진다. 일반적으로 발진기 자체의 공명 원리에 의해서 나타나지만 증폭기와 같은 주변 회로 잡음에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 마지막으로 white PM 잡음이며 넓은 주파수 대역에 존재한다. 발진기의 공명 원리와는 관계가 적으며, 증폭기에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

위상잡음의 영향성에 대한 연구는 많은 분야에서 이루어져 왔으며, 특히 레이더 분야에서도 많은 연구가 이루어졌다^[2,3]. 하지만 위상잡음과 레이더 시스템적인 고려를 통한 구체적인 규격을 도출하는 연구는

† 2013년 3월 7일 접수~2013년 5월 17일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 박진성(funfish1@add.re.kr)

미흡하였다.

최근 무기체계의 레이더 시스템은 그 복잡도와 가능성이 확대되어 하나의 무기체계로서 인식되고 있으며 다양한 기능을 수행하기 위해 다양한 파형과 모드를 선택할 수 있도록 개발되고 있다.

본 논문에서는 이러한 레이더의 다기능화 추세에 따라 단일 파형이 아니라 FMICW 파형, 펄스 압축 파형을 시스템적인 요소로 고려하여 위상잡음의 영향을 분석하고 구체적인 규격 설정에 적용하는 것을 목표로 하여 접근하였다. 또한 파형과 관계없이 위상잡음에 의하여 결정되는 잡음 수준을 분석하여 수신기 민감도와와의 관계를 분석하였다.

본문에서는 위상잡음이 이러한 각 시스템 요소에 미치는 영향을 분석하기 위해, 수학적인 모델을 세우고 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 또한 실제 제작된 소형 레이더를 이용하여 FMICW 파형에 대한 거리 해상도 시험을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 검증은 하였다. 결론에서는 레이더의 위상잡음 규격을 도출할 때, 시스템적으로 고려해야 할 각 요소에 대하여 분석된 내용을 종합하여 제시하였다.

2. 본론

가. 위상잡음과 펄스 압축

펄스 압축을 하기 위하여 사용되는 정합 필터(matched filter)에 왜곡(distortion)이 일어날 경우에 관한 연구는 참고문헌^[4]에서 제시된 paired echo theory 등이 알려져 있다. 위상잡음이 고려되지 않은 이상적인 정합 필터는 왜곡이 없는 필터 형태를 가지지만 위상잡음이 고려되면 일종의 주파수 왜곡 혹은 위상 왜곡의 형태로 정합 필터의 형태를 왜곡시킨다. 즉 이상적인 선형 형태가 아니라 비선형적인 특성을 갖는 정합 필터의 형태를 가지게 된다. 본 논문에서는 선형 주파수 변조(linear frequency modulation) 파형이 정합 필터로 사용되어 펄스 압축을 한다는 가정 하에 위상잡음과 압축된 펄스간의 관계를 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 시뮬레이션에 적용한 펄스 압축의 전체적인 블록도는 Fig. 1과 같다. 각각의 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$m(t) = \cos(\omega_0 t + \mu t^2 / 2) \tag{1}$$

여기서

- t = 시간 변수, $\mu = 2\pi BW_{\text{chirp}}/T$
- BW_{chirp} = 선형 주파수 변조 대역폭
- T = 펄스 폭.

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \mu t^2 / 2) \times \cos(\omega_{LO} t + \phi(t)) \tag{2}$$

$$= \cos(\omega_0 t + \mu t^2 / 2 + \omega_{LO} t + \phi(t))$$

여기서 $\phi(t)$ = 위상잡음.

$$r(t) = s(t - t_d) \tag{3}$$

여기서

- t_d = 왕복 지연 시간 = $2R/c$
- R = 표적까지의 거리
- c = 빛의 속도.

$$d(t) = r(t) \times \cos(\omega_{LO} t + \phi(t)) \tag{4}$$

$$= \cos[\omega_0(t - t_d) + \mu(t - t_d)^2 / 2 - \omega_{LO} t_d + \phi(t - t_d) - \phi(t)]$$

위상잡음은 국부발진기(local oscillator)에 의해서 생성되는 것으로 모델링 하였으며, 정합 필터를 왜곡시키는 성분인 위상잡음은 $d(t)$ 의 수식에서 확인할 수 있듯이 $\phi(t-t_d) - \phi(t)$ 의 형태로 정합 필터에 입력된다. 정합 필터는 다음과 같은 수식적 모델을 적용하여 시뮬레이션 하였다.

$$h(t) = \sqrt{\frac{2\mu}{\pi} \cos\left(\omega_0 t - \frac{\mu t^2}{2}\right)} w(t) \tag{5}$$

여기서 $w(t)$ = Hamming weighting 함수.

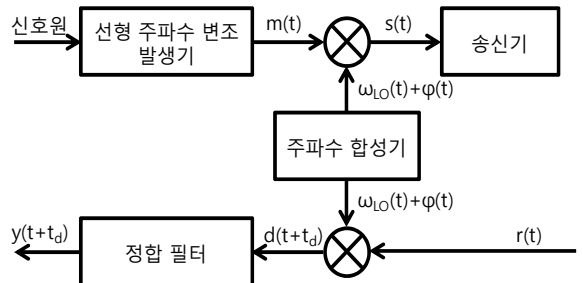


Fig. 1. 펄스 압축 블록도

또한, 위상잡음 모델링은 다음과 같은 수식적 모델을 적용하여 시뮬레이션 하였다.

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{S_{\phi}(f)} N(f) \exp(j2\pi ft) df \quad (6)$$

여기서

- $S_{\phi}(f)$ = 위상잡음의 전력 스펙트럼 밀도 함수
- $n(t)$ = 가우시안 랜덤 잡음(표준 정규 분포)
- $N(f)$ = $n(t)$ 의 푸리에 변환 함수.

시뮬레이션 흐름을 정리하면 아래와 같다.

- step 1. 위상잡음 프로파일에 의한 $S_{\phi}(f)$ 생성
- step 2. $n(t)$ 생성
- step 3. $n(t)$ 로부터 FT(Fourier Transform) 수행하여 $N(f)$ 생성
- step 4. 위상잡음을 step 2와 step 3의 결과로부터 $\phi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \sqrt{S_{\phi}(f)} N(f) \exp(j2\pi ft) df$ 수행하여 생성
- step 5. 생성된 위상잡음을 이용하여 $d(t)$ 생성
- step 6. 정합 필터링 수행

위상잡음 프로파일은 Fig. 2와 같이 설정하고 시뮬레이션 하였다. Fig. 2에 동그라미와 함께 표기된 숫자는 각각의 case 숫자를 의미하고, Radar는 Fig. 7의 측정치를 얻는데 사용된 레이더의 위상잡음 프로파일이다. 후에 분석할 FMICW 레이더의 실험에 사용된 레이더의 위상잡음 프로파일을 의미한다. 펄스 압축과 위상잡음의 관계를 분석하기 위하여 위상잡음 프로파일 case 1~4가 사용되었다. case 1은 위상잡음이 매우 낮은 이상적인 상태이고, case 2은 case 1 대비 약 40 dB 악화된 위상잡음 수준이다. case 3은 case 2에서 3 kHz 이하 offset 주파수에서 약 40 dB 악화된 위상잡음이며, case 4는 case 2의 10 kHz 이상의 offset 주파수에서 약 20 dB 악화된 위상잡음이다.

Table 1. 펄스 압축 시뮬레이션 변수

변수	값
송신 주파수	100 MHz
국부발진기 주파수	60 MHz
표적까지의 거리	10 km
펄스 폭	6 us
선형 주파수 변조 대역폭	9 MHz

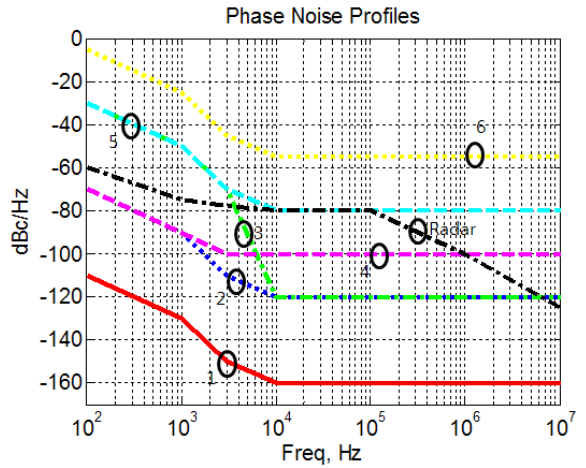


Fig. 2. 시뮬레이션에 사용된 위상잡음 프로파일

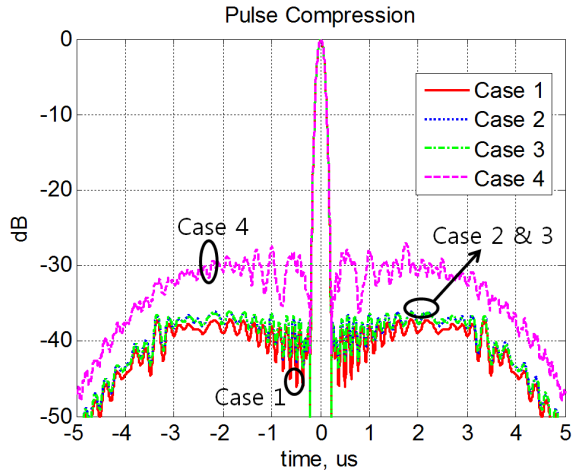


Fig. 3. 펄스 압축 결과

3 kHz를 기준으로 위상잡음의 가중치를 달리 준 이유는, 레이더가 진동 환경에 노출될 경우, 일반적으로 수 kHz 대역의 임의의 진동(random vibration)을 겪게 되므로 이를 모사하여 진동과 펄스 압축간의 관계를 분석하기 위함이다.

시뮬레이션 결과인 Fig. 3의 각 case별 비교 분석을 통하여 위상잡음과 펄스 압축 사이에 다음과 같은 연관성이 있음을 알 수 있다.

- 1) case 1 대비 40 dB 만큼 악화된 case 2는 펄스 압축을 거친 후에 최대 1.5 dB 전체적인 부엽 준위가 상승하였다. 따라서 case 2에서 예시된 위상잡음보

다 낮은 경우는 위상잡음에 의한 효과가 펄스 압축에 미치는 영향이 부엽 준위 기준 최대 1.48 dB 미만으로 제한적이다.

- 2) case 3는 case 2 대비 3 kHz 이하의 offset 주파수에서 위상잡음을 40 dB 악화시켰지만, 펄스 압축 결과 case 2와 2~3 us 구간을 제외하고는 동일한 결과를 얻었다. 즉, 레이더가 진동 환경에 노출되어 위상잡음을 악화시키더라도 예시된 case 3의 위상잡음 수준 이하에서는 펄스 압축에 미치는 영향이 극히 제한적이다.
- 3) case 4는 case 2 대비 10 kHz 이상의 offset 주파수에 대하여 20 dB 위상잡음을 악화시켰으며, 그 결과 부엽 수준이 전체적으로 약 10 dB 정도 상승하였다. 따라서 10 kHz 이상의 위상잡음은 펄스 압축된 파형의 부엽 준위에 미치는 영향이 상대적으로 10 kHz 이하의 offset 주파수에 비하여 크며, 제시된 case 4의 예에서는 최대 10.6 dB 부엽 준위가 상승하였다.
- 4) Fig. 3에 나타내지는 않았으나 case 5는 case 1 대비 전체적으로 부엽수준이 약 20 dB 상승하였으며, case 6은 펄스 압축 파형을 알아 볼 수 없을 정도로 부엽수준이 악화되고 침투값이 형성되지 않았다. 즉, 전반적인 위상잡음의 상승은 펄스 압축의 부엽 준위 상승과 밀접한 연관이 있다.

즉, 위와 같은 분석으로부터 알 수 있듯이 펄스 압축의 부엽 수준은 특정 offset 주파수 대역의 위상잡음 보다는 전체적인 위상잡음 준위와 관련이 있으며, 악화된 위상잡음 준위는 부엽 수준을 전체적으로 상승시킨다.

나. 위상잡음과 FMICW 레이더 거리 해상도

레이더 거리 해상도에 대하여 장점을 갖는 파형 중의 하나인 FMICW 파형은 참고문헌^[5]에 잘 기술되어 있으며, 이에 대하여 위상잡음과의 관계를 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 특히, 다중 표적 환경에서 표적을 구별하기 위하여 요구되는 위상잡음 수준을 분석하였다.

분석에 사용된 FMICW 파형에는 선형 주파수 변조 파형이 사용되는 것으로 가정하였다. 개념적인 블록도는 Fig. 4와 같다.

선형 주파수 변조 파형 발생기에서 생성된 신호는 결합기를 통과하여 두 신호로 분주된다. $u(t)$ 는 국부발

진신호와 혼합되어 $e(t)$ 가 되어 송신기를 통하여 송신되고, $u'(t)$ 는 혼합기의 국부발진신호로 인가되어 f_b (beat frequency)를 만드는데 사용된다. 표적에 의하여 반사되어 수신된 신호 $k(t)$ 는 국부발진신호와 혼합되어 하향변환되고 다시 $u'(t)$ 와 혼합되어 f_b 를 추출하는데 이용되는 $b(t)$ 로 변환된 후 신호처리기에 인가된다. 개념도에서 보는 것과 같이, 위상잡음은 국부발진신호에 포함되어 있는 것으로 모델링하였다. 모델링 방법은 기본적으로 펄스 압축 시뮬레이션에 사용하였던 위상잡음 모델링 방법과 유사하다. Fig. 5는 송수신 신호를 시간과 주파수 축에 대하여 그린 것이다. 참고문헌^[5]에 따르면 표적과의 거리를 판별하는 시간 지연 및 거리 해상도는 식 (7), (8)과 같이 주어진다.

$$f_b = \frac{\mu}{2\pi} t_d \tag{7}$$

- 여기서
- $\mu = 2\pi BW_{chirp}/T$
- $T =$ chirp 신호의 1 주기.

$$Range\ Resolution = \frac{c}{2BW_{chirp}} \tag{8}$$

즉, 표적과의 거리인 t_d 는 신호처리기에서 측정하는 값인 f_b 를 통해서 구할 수 있다. 펄스 레이더(pulse radar)에서 이용하는 방식인 직접적인 수신 신호의 지연 시간 측정이 아니라 비트(beat) 주파수를 측정하고, 이를 이용하여 표적과의 거리를 산출하는 방식이다.

본 논문에서는 선형 주파수 변조 파형에 사용되는 신호원의 위상잡음이 레이더의 거리 해상도에 미치는 영향을 MATLAB 시뮬레이션을 이용하여 분석한다. 위상잡음이 존재하게 되면 선형 주파수 변조 파형을 왜곡시키게 되고, 그 형태는 앞선 분석하였던 펄스 압축에 사용되는 정합 필터를 왜곡시키는 것과 개념적으로 동일하다. 시뮬레이션의 순서는 다음과 같다.

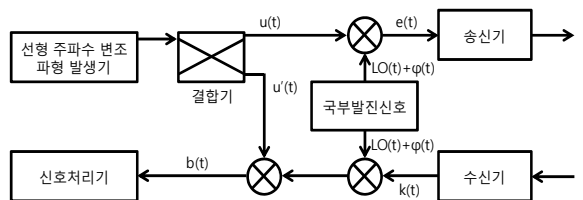


Fig. 4. FMICW 레이더 개념도

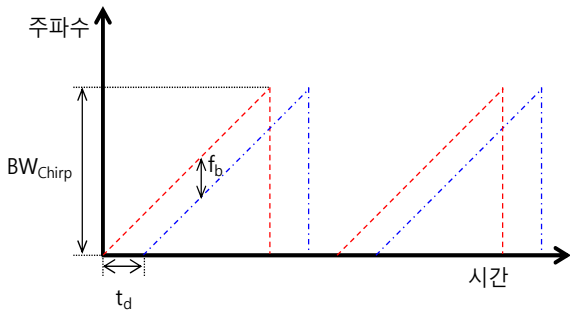


Fig. 5. FMICW 주파수 변조 파형

- step 1. 선형 주파수 변조 파형 생성 $u(t)$ 생성
- step 2. 펄스 변조 파형 $p(t)$ 를 생성하여 $u(t)$ 및 $u'(t)$ 와 혼합
- step 3. 펄스 압축 시뮬레이션에서 생성한 방식과 동일한 방식으로 주어진 위상잡음 프로파일에 근거한 위상잡음 $\phi(t)$ 생성
- step 4. $u(t)$ 신호와 $\phi(t)$ 신호 혼합
- step 5. 레이더 방정식에 의한 공간 손실 고려
- step 6. $k(t) = e(t-t_d)$ 와 $\phi(t)$ 신호 혼합
- step 7. $u'(t)$ 와 $k(t)$ 신호 혼합
- step 8. 주파수 도메인에서 beat 주파수 스펙트럼 분석
- step 9. 다중 표적일 경우, 루프를 이용하여 step 1~step 8 재수행 후 최종 결과를 더하여 주파수 스펙트럼 비교

step 2에서 사용된 펄스 변조 파형 $p(t)$ 는 펄스 반복 주파수(PRF) PRF_1 Hz, 듀티(duty) 1/3의 펄스 변조 파형이다.

위상잡음 프로파일은 Fig. 2의 case 2, 5, 6을 이용하여 시뮬레이션 하였고, 시뮬레이션에 사용된 변수는 Table 2에 제시된 것과 같다. case 5는 case 2에 비하여 전체적으로 위상잡음이 40 dB 악화된 경우이고, case 6은 case 2 대비 65 dB 악화된 경우이다.

Fig. 6은 거리가 각각 300 m, 301.83 m인 두 개의 표적이 있는 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 위상잡음 프로파일은 Fig. 2의 case 2, 5, 6이다. 위상잡음이 상대적으로 낮은 수준인 case 2에 비하여 위상잡음 준위가 높은 case 5 및 6에서 다중표적을 구별하기 위한 첨두값(peak value)은 그 형태가 뚜렷하나, 시스템의 전반적인 잡음 수준은 올라가는 것을 확인할 수 있다. 또한 case 2 대비 90 dB가 악화된 위상잡음 조건에서는 첨두값과 잡음 준위가 대

등하여 식별이 불가능함이 확인되었다. 즉, 위상잡음의 악화는 FMICW 레이더의 잡음 준위를 높이는 방향으로 작용하며, 이는 결국 표적의 식별을 불가능하게 한다.

Table 2. FMICW 거리해상도 시뮬레이션 변수

변수	값
선형 주파수 변조 대역폭	BW_1 MHz
선형 주파수 변조 주기	0.1 msec
두 표적간의 전기적 거리	1.83 m

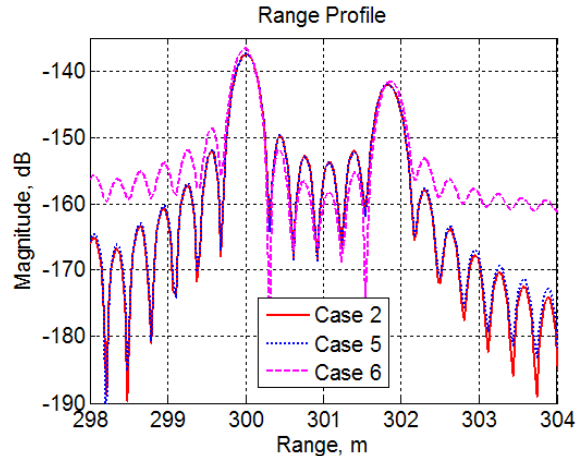


Fig. 6. FMICW 시뮬레이션 결과

Fig. 7은 시험에 사용된 FMICW 레이더와 시뮬레이션한 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션에 사용된 위상잡음 프로파일은 Fig. 2의 Radar를 사용하였으며, 이는 실험에 사용된 레이더의 위상잡음 프로파일과 동일한 모델링 수치이다. 실험은 Fig. 8과 같이 전자파 무반향 챔버에서 수행하였다. 2개의 혼 안테나를 이용하였으며, 혼 안테나 사이에 전기적 길이가 3.6 m인 RF 케이블을 삽입하였다. 또한 두 혼안테나와 실험에 사용된 소형 레이더가 서로 마주 보도록(line of sight) 배치하였다. 안테나가 수신하는 신호는 실험용 모의 신호 발생기를 이용하여 생성하였다. 모의 신호 발생기는 임의의 속도와 거리를 가지는 모의 표적을 생성할 수 있다.

Fig. 7의 시뮬레이션 결과에는 실제 실험용 레이더에 적용된 체비셰프(Chebyshev) 60 dB 원도우를 적용하여

부엽을 억제하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 실험치와 시뮬레이션의 거리 프로파일이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과는 위상잡음 이외의 열잡음과 같은 다른 잡음의 영향을 고려하지 않았으므로 열잡음의 영향이 위상잡음보다 더 큰 환경에서는 본 결과가 차이날 수 있다.

요컨대, 위상잡음의 악화는 FMICW 레이더의 잡음 준위를 높이는 방향으로 시스템에 영향을 미치며, 본 논문의 시뮬레이션 결과에 의하면 case 2 대비 위상잡음이 65 dB 악화된 case 6에서 최대 14.6 dB 악화됨을 알 수 있었으며 시스템 설계 단계에서 이를 고려하여 위상잡음 규격을 설정하여야 함을 확인하였다.

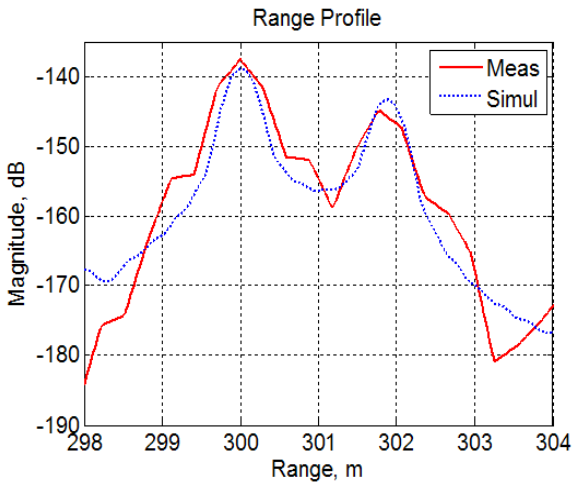


Fig. 7. 시뮬레이션과 측정치 비교

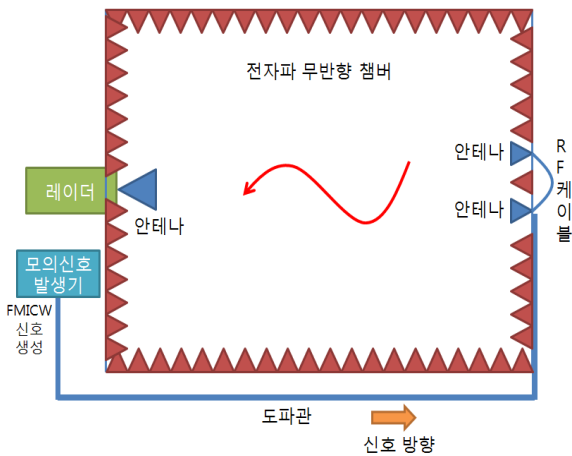


Fig. 8. 레이더 측정 구성도

다. 위상잡음과 수신기 민감도

표적이 아닌 클러터와 같은 반사체의 수신 전력은 높은 경우, 이에 의한 위상잡음에 의하여 수신기의 잡음 준위가 올라가는 경우가 발생한다. 또는 국부발진 신호에 포함된 위상잡음에 의하여 동일한 효과가 발생한다. 이 경우, 레이더의 최소 검출 신호, 최대 탐지 거리, 도플러 추적 성능 등이 악화되므로 이를 예측하여 대비하기 위한 위상잡음 수준에 대한 분석이 필요하다.

수신기의 잡음 준위를 계산하기 위하여 필요한 요소로는 다음과 같다.

- 1) 표적 혹은 클러터로부터 반사되어 레이더로 입력되는 전력
- 2) 위상잡음 프로파일
- 3) 수신기 버짓(budget) 설계
- 4) 수신기 대역폭

요소 1)인 클러터로부터 반사되어 레이더로 입력되는 전력을 구하기 위하여 Table 3과 같이 가정한다. 부엽에 의하여 클러터로부터 반사되는 전력을 크도록 하기 위하여 부엽 클러터 중에 일반적으로 가장 큰 클러터인 고도 클러터(altitude clutter)를 가정하였고, 해수면이 가장 잔잔한 상태인 sea state 1, 고도는 낮을수록 반사되는 전력이 커지므로 일반적인 상황에서 가정할 수 있는 아주 낮은 상태인 30 m, 고각방향의 일반적인 부엽 크기인 -10 dBi을 가정하였다. 분석용 위상잡음 프로파일은 Fig. 2의 case 4를 선정하였으며, 이는 위상잡음 프로파일 Radar와 비교가 용이하기 때문이다.

참고문헌^[6]에 의하여 클러터의 RCS는 다음과 같이 계산된다.

$$A_I(\text{Illuminated area}) = \pi[\text{고도} \times \tan(\text{빔폭}/2)]^2 = 13.8 \text{ m}^2$$

$$\beta_0 = 2.44(1+\text{Sea state})^{1.08} = 0.09 \text{ rad}$$

$$u = 1 \text{ (해면 클러터에서는 1임.)}$$

$$\sigma^0 = u/\tan^2\beta_0 = 122.8 \text{ m}^2/\text{m}^2$$

$$\sigma_{\text{clutter}} = A_I * \sigma^0 = 1697.6 \text{ m}^2$$

계산된 클러터의 RCS와 레이더 방정식을 이용하여 수신되는 전력을 계산하면 다음과 같다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma_{\text{clutter}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} = -50.2 \text{ dBm}$$

Table 3. 클러터 계산 파라미터

파라미터	값
레이더 종류	Airborne
고도	30 m
Grazing 각도	90도
안테나 빔폭	8도
빔 조사 시간	빔 면적이 모두 조사될 만큼 충분한 시간
클러터 종류	해면 클러터, Sea state 1
송수신 안테나 이득	고도 방향으로 -10 dBi
송신 전력	1 kW
위상잡음 프로파일	Fig. 2의 case 4

여기서

- P_t = 송신 전력
- P_r = 수신 전력
- $G_t = G_r$ = 송수신 안테나 이득
- $\sigma_{clutter}$ = 클러터의 RCS
- λ = 한 파장의 길이(X 대역 사용)
- R = 전파 반사체까지의 거리(표적 혹은 클러터)

계산된 수신 전력과 위상잡음 프로파일 case 4의 경우를 적용하여 위상잡음에 의한 전력 분포를 그려보면 Fig. 9와 같이 그릴 수 있다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 클러터 반사에 의한 수신 안테나 후단의 잡음 준위는 -150.2 dBm/Hz이다.

국부발진신호에 의한 수신기 민감도 분석을 위하여 Table 4, 5와 같이 송수신 시스템의 변수들을 가정하였다. 가정된 변수들은 판매되고 있는 상용 RF 부품들의 일반적인 스펙들을 가정하였다.

P_r 로부터 수신기 출력에 예상되는 잡음 준위를 계산하면

$$\begin{aligned} \text{잡음 준위}_{\text{클러터}} &= -150.2 + \text{BFG} \\ &= -150.2 + 60 + 6.42 + 21 \\ &= -62.78 \text{ dBm/MHz} \end{aligned}$$

여기서

- B = 대역폭
- F = 잡음 지수
- G = 수신기 이득

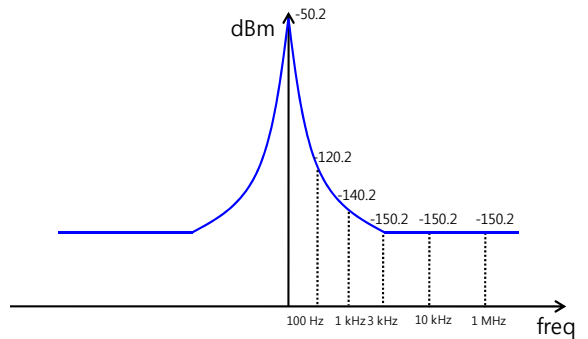


Fig. 9. 클러터에 의한 반사 전력

Table 4. 수신기 버짓

	이득	잡음지수
순환기	-1 dB	1 dB
리미터	-1 dB	1 dB
저잡음증폭기	11 dB	2 dB
혼합기	-8 dB	8 dB
증폭기	20 dB	4 dB
합계	21 dB	6.42 dB

Table 5. 시스템 변수

시스템 변수	값
Pr(반사 전력) 잡음 준위	-150.2 dBm
위상잡음 프로파일	case 4
혼합기 LO-IF 격리도	25 dB
수신기 대역폭	1 MHz
LO 신호 전력 준위	15 dBm
수신기 이득	21 dB
수신기 잡음지수	6.42 dB

다시 국부발진신호의 위상잡음으로부터 수신기 출력에 예상되는 잡음 준위를 계산하면

$$\begin{aligned} \text{잡음 준위}_{\text{국부발진신호}} &= 15 + \text{위상잡음} + \text{격리도} + \text{BFG} \\ &= 15 - 100 - 25 + 60 + 4 + 20 \\ &= -26 \text{ dBm/MHz} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{잡음 준위}_{\text{열잡음}} &= \text{KTBF}G \\ &= -174 + 60 + 6.42 + 21 \\ &= -86.58 \text{ dBm/MHz} \end{aligned}$$

여기서

- K = Boltzmann 상수
- T = Kelvin

일반적으로 Grazing 각도가 90°인 고도 클러터는 주엽 클러터를 제외한 부엽 클러터 중에서는 가장 큰 클러터이며, 고도가 낮을수록 클러터 신호의 세기는 커진다. 본 분석에서 가정한 고도는 30 m로 일반적인 항공기 레이더의 고도보다 낮으므로 클러터 반사 신호 세기는 일반적인 항공기 레이더보다 더 가혹한 조건이다. 그럼에도 불구하고 클러터와 국부발진신호의 위상잡음에 의한 잡음 준위 계산 결과에서 보듯이, 국부발진신호의 위상잡음이 수신기 민감도에 미치는 영향이 더 크다. 따라서 대부분의 경우에는 국부발진신호가 고도 클러터보다 잡음 준위 측면에서 더 큰 영향을 주며, 국부발진신호에 의한 수신기의 잡음 준위 악화를 예방하기 위해서는 앞서 수행하였던 시스템 분석을 통하여 적합한 위상잡음 규격을 도출하여야 한다. 또한 국부발진신호의 신호원 규격이 위상잡음 규격을 만족하지 못할 것이라고 판단될 시에는 대역통과여파기 등을 사용하여 IF 대역에 유입되는 위상잡음 신호를 차단하거나, 격리도 규격이 우수한 혼합기를 사용하여 누설 전력을 차단하여야 한다.

계산한 잡음 준위 중에서 고도(altitude) 클러터에 의한 잡음 준위는 속도 추적(도플러 추적)의 경우에도 영향을 미치는 요소이며, 다음과 같은 환경에서 그 영향을 더 크게 받는다.

- 레이더가 진동 상황에 노출될 때
- 표적의 신호가 약할 때(RCS가 작거나 표적이 멀리 있을 때)
- 표적과 레이더의 상대속도가 0에 가까워 질 때

표적이 Table 6과 같은 조건에 있다고 가정하면 레이더 방정식에 의하여 수신 전력은 -133.4 dBm으로 계산된다. 도플러 주파수와 상대속도는 다음과 같이 주어지므로 계산하면

$$V_R = \frac{f_d c}{2f_T} = 15 \text{ m/s} \tag{9}$$

Table 6. 표적 조건

파라미터	값
송신 전력	1 kW
거리	10 km
송수신 안테나 이득	20 dBi
RCS	0.1 m ²
주파수	X 대역

여기서

- f_d = 도플러 주파수(1 kHz)
- f_T = 송신 주파수
- V_R = 레이더와 표적의 상대 속도

계산된 수신 전력 -133.4 dBm이 Fig. 9의 도플러 주파수 1 kHz에서의 위상잡음 전력 -140.2 dBm보다 6.8 dB 높으므로 도플러 주파수 1 kHz에서의 신호대 잡음비(S/N)는 6.8 dB이다. 레이더 시스템에 따라서 필요한 최소한의 S/N은 다르지만, 편의를 위하여 본 논문에서는 표적 추적을 위한 최소한의 S/N을 6.8 dB로 가정한다.

f_d 에 1 kHz를 대입하여 식 (9)를 계산한 결과, 레이더와 표적의 상대 속도가 15 m/s이고 계산된 상대 속도보다 느린 상대 속도에서는 위상잡음에 의하여 S/N이 6.8 dB보다 낮아지므로 도플러 추적이 불가능하다. 따라서 레이더 시스템의 운용 환경과 도플러 추적 성능을 종합적으로 고려하여 위상잡음 규격을 설정하여야 한다.

3. 결론

본 논문에서는 위상잡음을 레이더 시스템적인 세 가지 관점에서 고려하여 그에 미치는 영향을 분석하였다. 첫째로 펄스 압축과 위상잡음의 관계에서는 오프셋 주파수 10 kHz 이상의 위상잡음이 펄스 압축의 부엽 준위를 높이는데 큰 영향을 미침을 시뮬레이션을 통하여 분석하였으며 case 2 대비 위상잡음이 65 dB 악화된 case 6에서 최대 14.6 dB 악화된 것을 확인하였다.

둘째로 위상잡음과 FMICW 레이더의 거리 해상도 관계에서는 전체적인 위상잡음의 악화가 레이더의 잡음 수준을 높임을 시뮬레이션을 통하여 분석하였으며,

시뮬레이션과 실험한 레이더의 실험 결과가 유사함을 확인하였다. 셋째로 위상잡음과 수신기의 민감도는 국부발진신호의 위상잡음이 결정적인 영향을 미침을 분석하였으며, 이에 대한 대안으로 격리도 특성이 우수한 혼합기 혹은 여과기를 사용할 것을 제안하였다.

본 논문에서 사용된 위상잡음의 예시 규격들을 활용/참고한다면 향후 레이더 시스템에서 위상잡음 규격을 설정함에 있어서 큰 도움이 되리라 기대된다.

References

- [1] Parker, T. E., "Characteristics and Sources of Phase Noise in Stable Oscillators", 41st Annual Symposium on Frequency Control, pp. 99~110, 1987.
- [2] Wu, L., Peng, S. S., Shi, X. Q., "Effects of Transmitter Phase Noise on Millimeter Wave LFMCW Radar Performance", International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, pp. 1415~1418, 2008.
- [3] C. John Grebenkemper, "Local Oscillator Phase Noise and Its Effect on Receiver Performance", Watkins-Johnson Company Tech-notes, Vol. 8, No. 6, 1981.
- [4] Charles E. Cook, "Marvin Bernfeld, Radar Signals", Academic Press, pp. 366~394, 1967.
- [5] Graham M. Brooker, "Understanding Millimetre Wave FMCW Radars", 1st International Conference on Sensing Technology, pp. 152~157, 2005.
- [6] Byron Edde, "Radar Principles Technology Applications", Prentice Hall, pp. 216~230.