
FM-CW 레이더에서의 위상잡음 분석

이종길*

*인천대학교

Analysis of Phase Noise in a FM-CW Radar

Jonggil Lee*

*University of Incheon

E-mail : jnglee@incheon.ac.kr

요 약

FM-CW 레이더 시스템에서는 이동 목표물 및 기상 현상 등의 원격탐지를 위하여 각 거리에 따른 변이 주파수 및 추가적인 도플러 스펙트럼의 추정이 필요하다. 이러한 주파수 대역에 따른 신호의 크기는 목표물의 탐지 여부 및 추적을 위한 매우 중요한 파라미터이다. 그러나 레이더 운용환경에서는 매우 큰 크기를 갖는 클러터등의 성분이 효과적으로 제거되지 않는다면 시스템의 성능이 현저히 저하될 수 있다. 즉 레이더 시스템에서의 위상잡음으로 인하여 신호 및 클러터 등이 스펙트럼 영역에서 분산되어 나타나는 경우 클러터 제거뿐만 아니라 추정 주파수에도 심각한 악영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 이러한 위상잡음이 목표물 정보 추출을 위한 주파수 추정에 미치는 영향을 분석하였다.

ABSTRACT

It is necessary to estimate the Doppler spectrum for each range cell for the extraction of useful information from the return echoes in radar systems used for the remote sensing purpose such as detection of moving targets and weather surveillance. The signal amplitude in the given frequency band is the important parameter in the detection and tracking of targets. However, the system performance can be seriously degraded if the efficient removal of the strong clutter is not possible. If the phase noise spreads both the signal and clutter, the clutter removal can be very difficult and the accuracy of frequency estimates is also deteriorated. Therefore, in this paper, the effects of phase noise are analyzed in the estimation of beat frequencies.

키워드

Spectrum estimation, FM-CW, Phase noise, 레이더 시스템

1. 서 론

FM-CW 레이더 시스템에서는 목표물로부터 반사되는 도플러 신호로부터 정보를 추출하여 이동 및 고정 물체의 탐지 및 속도 등을 알아내는데 활용하고 있다. 원격 탐지 및 추적 레이더에서는 거리별 도플러 스펙트럼을 분석함으로써 목표물의 거리 및 속도정보를 추출하게 된다. 최근의 이러한 레이더 시스템에서는 탐지대상의 목표물의

속도추정 정확도에 대한 중요성이 갈수록 높아지고 있다. 특히 최근에 개발되고 있는 초단거리용 FM-CW 레이더의 경우 거리 및 속도 추정치의 정확도는 매우 중요한 문제이다. 그러나 이러한 거리 및 주파수 해상도 및 정확도가 현저히 떨어지는 경우에는 목표물의 탐지 및 추적성능은 심각할 정도로 저하될 수 있다. 즉 빠른 이동 물체의 탐지를 목표로 하는 시스템이나 시스템의 특성상 레이더 안테나가 목표물의 반사 신호를 확

득할 수 있는 dwell time 이 상당히 짧게 주어지는 경우가 있다. 이러한 경우에는 위상잡음으로 인한 추가적인 주파수 해상도의 열화뿐만 아니라 도플러 및 거리 셀에서의 탐지 성능 및 속도 정보 추출에도 심각한 악영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 논문에서는 FM-CW 레이더 시스템에서의 위상잡음이 시스템 성능에 미치는 악영향 및 문제의 심각성 정도를 분석하였다.

II. FM-CW 레이더에서의 위상잡음

FM-CW 레이더 시스템에서는 연속적인 파형의 신호를 송신함으로 일반적인 펄스 레이더와는 달리 거리 및 속도 정보의 추출을 위해서는 그림 1에서 보는 바와 같이 비트 주파수 정보를 추출하여야 한다. 이러한 비트 주파수는 도플러 및 거리 정보를 추출하기 위한 중요한 파라미터이다. 이러한 파라미터를 정확하게 추출하기 위해서는 클러터 제거 및 비트 주파수 추정 이 제대로 이루어져야 할 것이다. 그러나 레이더 시스템에서의 위상잡음은 이러한 과정에 상당한 문제를 발생시킬 수 있다. FM-CW 레이더에서 송신되는 주파수 변조된 신호는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$S_i = A \exp[j(b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \phi(t))] \quad (1)$$

식 (1)에서 $\phi(t)$ 는 레이더 시스템에서 발생하는 위상잡음을 표시하며 stationary Gaussian 랜덤 신호로 모델링 될 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 비트 주파수를 추출하기 위해서는 수신단에서 다음과 같이 송신신호에 수신단 신호의 complex conjugate 를 곱하게 된다. 즉, 수신단의 출력신호는 다음과 같이 표시된다.

$$y(t) = S_i(t)[rS_i(t-t_d)]^* \quad (2)$$

여기서 r 은 송신된 전자파 신호의 감쇄 및 반사 등을 포함한 복소수 파라미터이다. 따라서 출력신호는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} y(t) &= Ar^* \exp[j(b_1 t_d + b_2 t_d^2 + 2b_2 t_d t)] \\ &\quad \times \exp[j(\phi(t) - \phi(t-t_d))] \\ &= C \exp[j(\Phi_0 + 2b_2 t_d t)] \times \\ &\quad \exp[j(\phi(t) - \phi(t-t_d))] \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식(3)에서 비트 주파수는 $f_b = b_2 t_d / \pi$ 로 표시되며 Φ_0 는 위상편이 양을 나타내는 상수이다. 이제 위상잡음의 영향을 분석하기 위하여 출력신호에 대한 자기상관 함수를 표시하면 다음과

같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} R_y(\tau) &= C^2 \exp(j2b_2 t_d \tau) \times \\ &E[\exp\{j(\phi(t) - \phi(t-\tau))\}] \\ &\quad \times \exp\{j(\phi(t-t_d - \tau) - \phi(t-t_d))\} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 E 는 expected value 를 나타내며 위상잡음 성분은 서로 독립적이라고 볼 수 있으므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_y(\tau) &= C^2 \exp(j2b_2 t_d \tau) \times \\ &R_j(\tau)R_j^*(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서의 R_j 는 다음과 같이 표시된다.

$$R_j(\tau) = E[\exp\{j(\phi(t) - \phi(t-\tau))\}] \quad (6)$$

따라서 식 (6)에서 표시되는 레이더 위상잡음에 의한 autocorrelation 함수 값을 구하여야 한다. 이러한 값은 다음과 같이 쓸 수 있다[1].

$$R_j(\tau) = \exp\left[\int_{-\infty}^{\infty} S_\phi(f)(1 - \cos 2\pi f\tau) df\right] \quad (7)$$

식 (7)에서 $S_\phi(f)$ 는 위상잡음의 전력 스펙트럼을 표시한다. 레이더 시스템에서의 위상잡음 전력은 대부분 매우 작게 나타나며 다음과 같이 Gaussian 스펙트럼으로 근사적인 표현이 가능하다[2]. 즉,

$$S_\phi(f) = D \exp\left[-\frac{f^2}{(\Delta f)^2}\right] \quad (8)$$

따라서 위상잡음 전력 σ^2 는 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_\phi(f) df = \sqrt{\pi} D \Delta f \quad (9)$$

식 (8)을 이용하면 식 (7) 의 해석학적인 값을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$R_j(\tau) = \exp\left[-\sigma^2 \left\{1 - \exp(-\pi^2 \Delta f^2 \tau^2)\right\}\right] \quad (10)$$

그러므로 식 (5)를 간략히 하여 나타내면 다음과 같이 나타난다.

$$R_y(\tau) = C^2 \exp(j2b_2t_d\tau) \times \exp\left[-2\sigma^2 \left\{1 - \exp(-\pi^2 \Delta f^2 \tau^2)\right\}\right] \quad (11)$$

그러므로 속도 및 거리 정보에 따라 나타나는 비트 주파수는 식 (11)에서 보는 것처럼 잡음 전력 스펙트럼 정도에 따라 분산되어 나타나게 됨을 알 수 있다.

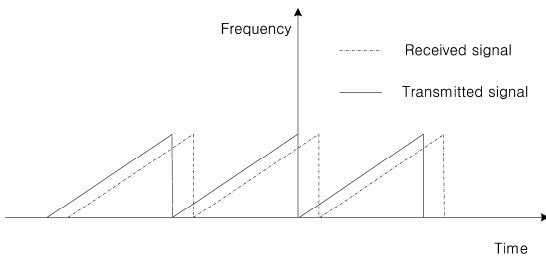


그림 1. FM-CW 레이더에서 선형적으로 주파수 변조된 전송 및 수신 신호

III. 위상잡음에 의한 스펙트럼 분산

이제 앞장에서 유도한 수식들을 이용하여 스펙트럼 분산의 정도를 위상잡음 전력 σ^2 와 위상잡음 스펙트럼 폭, Δf 로 표시하여 보자. 그림 2에 위상잡음에 의하여 나타나는 autocorrelation 값 $R_y(\tau)$ 를 표시하였다. 식(11)에서 보는 것처럼 autocorrelation 값은 잡음전력이 0 이거나 스펙트럼 폭이 0일 경우 그 값이 1로 나타나게 된다. 그림 2에서는 위상잡음 전력이 0.09 이고 $\Delta f=50$ Hz 인 시스템 위상잡음에 의하여 형성되는 autocorrelation 의 변화량을 보여주고 있다. 이러한 시스템 위상잡음에 의하여 비트 스펙트럼은 분산되어 나타나게 된다. 즉 다른 잡음 조건을 고려하지 않은 이상적인 비트 스펙트럼은 비트 주파수에서 피크를 형성하는 델타함수로 표시되어야 한다. 그러나 앞에서 언급한 것처럼 시스템 위상잡음은 이러한 스펙트럼을 분산시키게 되며 이러한 분산이 크게 일어나는 경우 비트 주파수 추정이나 클러터의 제거에 심각한 문제점을 발생시킬 수 있다. 그림 3에서는 $\sigma^2=0.09$, $\Delta f=50$ Hz 일때의 비트 스펙트럼 분산을 표시하고 있다. 본 논문에서의 시스템 위상잡음 변수는 대부분의 고성능 레이더 시스템에서 채택하는 비교적 적은 위상잡음을 가정하고 있으므로 그 영향이 비교적 적어 그래프로 보기가 어렵기 때문에 그림 4에 log 주파수 값으로 다시 표시하였다.

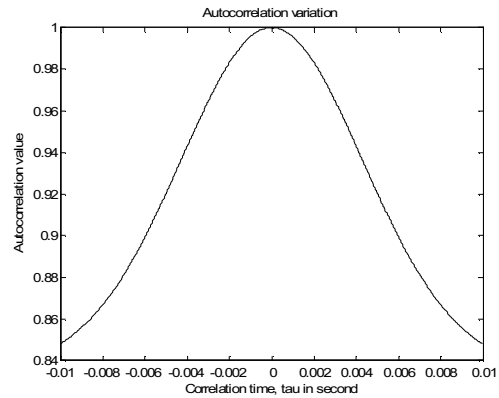


그림 2. 레이더 시스템 위상잡음에 의한 autocorrelation 값의 변화

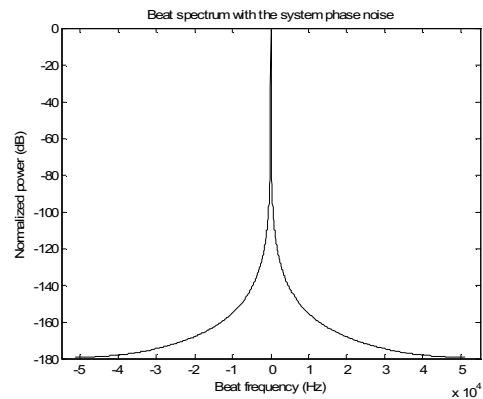


그림 3. 레이더 시스템 위상잡음에 의한 수신 비트 스펙트럼의 분산

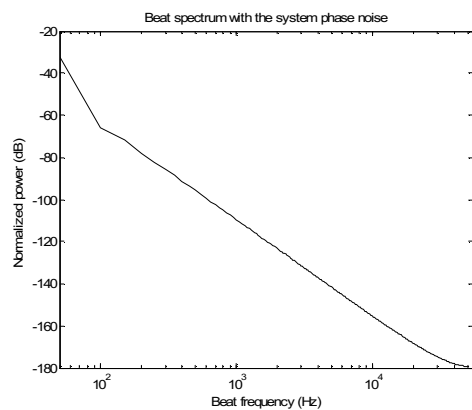


그림 4. 레이더 시스템 위상잡음에 의한 비트 스펙트럼 분산 현상

IV. 결 론

FM-CW 레이더 시스템에서의 위상잡음은 비트 스펙트럼을 분산시키게 되는데 결과에서 보는 바와 같이 전형적인 파라미터 값들을 적용할 경우 분산정도는 그다지 크지 않다. 그러나 분산된 비트 스펙트럼은 이동 목표물 및 클러터간의 간섭효과를 가져오게 되므로 클러터의 제거가 용이하게 이루어지지 않는다는 심각한 문제점을 발생시킬 수 있다. 즉 지표면 또는 인공 구조물 반사에 의한 대부분의 수신 클러터는 그 강도가 목표물 신호에 비하여 50~100 dB 이상의 세기를 가질 수 있으므로 클러터의 분산에 의한 간섭은 미약한 인접 목표물 신호에 심각한 악 영향을 초래할 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 레이더 시스템 위상잡음 효과를 시스템 목적에 맞게 적절히 제한 할 수 있도록 한다면 효율적인 시스템 설계에 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] J. Rutman " Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: fifteen years of progress", Proc. IEEE vol. 66, no. 9, Sept. 1978.
- [2] V. Y. Plekin, "Investigation of a tracking system for doppler frequency measurements in the presence of frequency fluctuations of the tracking heterodyne", Telecomm. Radio Engineering, part 2, vol. 21, no. 8, 1966.
- [3] J. A. Scheer and J. L. Kurtz, *Coherent radar performance estimation*, Artech House, 1993.
- [4] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 2001.