
FM-CW 레이다 시스템에서의 위상잡음 영향 분석에 관한 연구

이종길*

A Study on Analysis of Phase Noise Effects in a FM-CW Radar System

Jonggil Lee*

이 논문은 인천대학교 2010년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

FM-CW 레이다 시스템에서는 이동 목표물 및 기상 현상 등의 정밀한 원격탐지를 위하여 대상 목표물의 거리 및 이동 속도에 따른 주파수 변이와 수신 신호의 크기 정도를 정확하게 추출하여야 한다. 따라서 이러한 목적으로 최종 수신 단에서 얻어진 비트 신호에 대한 스펙트럼 추정을 하게 된다. 그러나 대부분의 레이다 운용환경에서는 매우 큰 클러터 반사가 나타나게 되며 레이다 시스템에서의 위상잡음은 이러한 강력한 클러터들뿐만 아니라 목표물 반사 신호의 스펙트럼들도 추가적으로 확산시키게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 위상잡음이 클러터 및 목표물 신호의 비트 스펙트럼에 미치는 영향을 분석하였다. 위상잡음의 특성에 따라 클러터와 비트신호가 확산되며 그 정도에 따라 인접신호의 분리 가능정도가 결정됨을 확인할 수 있다.

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 beat frequency band is the important parameter in the detection and tracking of targets. However, strong clutter echoes do exist in most radar operation environments and the system phase noise spreads both the clutter and signal echoes of the target. In this paper, the effects of this system phase noise are analyzed concerning the clutter and the signal beat spectrum. It is shown that the separation capability of adjacent beat signal depends on the degree of spread in the clutter and beat signal caused by the radar system phase noise

키워드

FM-CW, 위상잡음, 비트 신호, 레이다 시스템

Key word

FM-CW, Phase noise, Beat signal, Radar system

I. 서 론

FM-CW 레이더 시스템에서는 목표물로부터 반사되는 전자파 신호로부터 거리 및 도플러 비트신호의 정보를 추출하여 이동 및 고정 물체의 탐지 및 속도 추정 등을 수행하게 된다. 따라서 원격 탐지 및 추적 레이더에서는 이러한 거리 및 도플러의 비트 주파수 스펙트럼을 정확하게 추정함으로써 대상 목표물의 거리 및 속도 정보를 추출하게 된다[1][2]. 그러나 이러한 거리 및 속도 정보를 얻기 위한 비트신호의 주파수 해상도 및 정확도가 현저히 떨어지는 경우에는 목표물의 탐지 및 추적 성능은 심각할 정도로 저하될 수 있다. 즉 빠른 이동 물체의 탐지를 목표로 하는 시스템이나 시스템의 특성상 레이더 안테나가 목표물의 반사 신호를 획득할 수 있는 dwell time 이 상당히 짧게 주어지는 경우가 있다. 특히 클러터나 목표물들에 의한 강력한 반사 전자파가 존재하는 경우에는 거리 및 속도 정보가 결합되어 나타나는 강력한 비트신호들이 존재하게 된다. 이러한 비트신호들이 시스템 위상잡음에 의하여 분산되는 경우 거리 및 속도 영역에서 인접하여 있는 상대적으로 매우 미약한 반사 전자파 신호를 가지는 목표물들을 탐지하는데 심각한 장애를 초래하게 된다.

따라서 본 논문에서는 FM-CW 레이더 시스템에서의 위상잡음의 특성을 분석하고 이러한 위상잡음이 비트 신호 및 시스템 성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. FM-CW 레이더에서의 위상잡음 특성

연속적인 파형의 신호를 안테나를 통해 방사하는 레이더는 펄스 레이더와 달리 반사 목표물에 대한 거리 정보를 얻기 위하여 시간에 따른 주파수 변조를 이용하고 있다. 주파수 변조방식에는 여러 가지 방법이 있으나 비교적 수신신호의 처리과정이 간단한 선형적인 주파수 변조방식이 많이 활용되고 있다[3][4]. 펄스 레이더와는 달리 거리 및 속도 정보의 추출을 위해서는 수신된 신호를 송신신호를 기준으로 복조하여 비트신호의 스펙트럼 정보를 추출한다. 이러한 비트신호의 크기 및 주파수는 목표물의 탐지뿐만 아니라 도플러 및 거리정보를 추출하기 위한 중요한 파라미터이다. 이러한 파라미터들

을 신뢰성 있게 추출하기 위해서는 강력한 클러터의 효율적인 제거 뿐만 아니라 비트 주파수 추정에서의 높은 정확도가 요구된다. 그러나 레이더 시스템에서의 위상잡음은 이러한 과정에 심각한 문제점들을 발생시킬 수 있다.

이러한 위상잡음을 고려하여 FM-CW 레이더에서 송신되는 주파수 변조된 신호를 표시하는 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (1)에서 A 및 b_i 는 상수를 나타내며 $\phi(t)$ 는 레이더 시스템에서 발생하는 위상잡음을 표시한다. 비트 주파수를 추출하기 위해서는 수신 단에서 송신 신호에 수신신호의 complex conjugate 를 곱하게 되며 출력은 다음과 같이 표시된다.

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

여기서 t_d 는 지연 시간을 나타내며 r 은 송신신호의 감쇄 및 반사등을 포함한 복소수 파라미터이다. 따라서 출력신호는 다음과 같이 나타난다.

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

식(3)에서 보는바와 같이 송신파형은 수신단의 믹서에도 똑같이 인가되어 복조되는데 속도로 인한 도플러 주파수 변이를 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_d(t) &= C \exp \left[j \left\{ \Phi_0 + \left(2b_2 t_d - \frac{4\pi v}{\lambda} \right) t \right\} \right] \times \\ &\quad \exp[j(\phi(t) - \phi(t - t_d))] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Φ_0 는 일정한 위상변이 양을 나타내는 상수이다. 그러므로 수신 단에서 얻는 비트 신호의 주파수는 위

상잡음이 없는 경우 다음과 같이 표시된다.

$$f_b = \frac{2}{c} \left[\frac{b_2}{\pi} R - f_c v \right] \quad (5)$$

식 (5)에서 b_2/π 는 선형 주파수 변조에서의 기울기를 표시하며 R 은 목표물의 거리를 v 는 레이더 시선 방향의 속도로서 레이더로 접근하는 경우 양의 값을 멀어지는 경우 음의 값을 각각 나타내며 f_c 는 송신 중심 주파수를 표시한다. 따라서 두 개의 영역, 즉 업, 다운 영역에서의 비트 스펙트럼을 분석하여 비트 주파수를 구하고 거리 및 속도 정보는 $R-v$ 영역에서의 교점으로 나타나게 된다.

이제 식(4)에서 표시한 것처럼 시스템 위상잡음이 이러한 비트신호에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수신 신호의 자기상관 함수(*autocorrelation function*)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{y_d}(\tau) = C^2 \exp \left[j \left(2b_2 t_d - \frac{4\pi v}{\lambda} \right) \tau \right] \times E \left[\begin{array}{l} \exp \{ j(\phi(t) - \phi(t - \tau)) \} \times \\ \exp \{ j(\phi(t - t_d - \tau) - \phi(t - t_d)) \} \end{array} \right] \quad (6)$$

식 (6)에서의 E 는 기대치(*expected value*)를 표시하며 위상잡음 성분은 서로 독립적인 랜덤변수로 가정할 수 있으므로 위상잡음 $\phi(t)$ 에 대한 지수함수의 자기상관 함수를 이용하여 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$R_{y_d}(\tau) = C^2 \exp \left[j \left(2b_2 t_d - \frac{4\pi v}{\lambda} \right) \tau \right] \times R_p(\tau) R_p^*(\tau) \quad (7)$$

식 (7)에서의 R^p 는 다음과 같이 표시되는 자기상관 함수이다.

$$R_p(\tau) = E \left[\exp \{ j(\phi(t) - \phi(t - \tau)) \} \right] \quad (8)$$

그러므로 식 (8) 과 같이 나타나는 위상잡음에 대한

자기 상관함수를 구하여야 한다. 식 (8)에 나타나는 각 위상잡음의 성분들을 가우시안 랜덤변수로 가정하면 기대치는 다음처럼 표현된다[5].

$$R_p(\tau) = \exp \left[- \int_{-\infty}^{\infty} S_{\phi}(f) (1 - \cos 2\pi f \tau) df \right] \quad (9)$$

식 (9)에서의 $S_{\phi}(f)$ 는 위상잡음에 대한 전력 스펙트럼을 표시하는데 시스템의 전체적인 위상잡음 특성을 고려한다면 근사적으로 다음과 같이 가우시안 스펙트럼 형태로 나타낼 수 있다[6][7].

$$S_{\phi}(f) = D \exp \left[- \frac{f^2}{(\Delta f)^2} \right] \quad (10)$$

따라서 대부분 비교적 작은 값을 가지는 위상잡음 전력은 아래와 같이 표현된다.

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\phi}(f) df = \sqrt{\pi} D \Delta f \quad (11)$$

식 (9)에서의 해석학적인 해를 구하기 위하여 가우시안으로 표시되는 식 (10)의 위상잡음 스펙트럼 모델을 이용하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$R_p(\tau) = \exp \left[-\sigma^2 \left\{ 1 - \exp(-\pi^2 \Delta f^2 \tau^2) \right\} \right] \quad (12)$$

그러므로 식 (7)을 지금까지의 결과들을 이용하여 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{y_d}(\tau) = C^2 \exp \left[j \left(2b_2 t_d - \frac{4\pi v}{\lambda} \right) \tau \right] \times \exp \left[-2\sigma^2 \left\{ 1 - \exp(-\pi^2 \Delta f^2 \tau^2) \right\} \right] \quad (13)$$

따라서 식 (13)의 결과에서 보는 것처럼 **FM-CW** 레이더에서의 거리 및 속도가 결합되어 나타나는 엇다운 영역에서의 비트신호들은 위상잡음 전력의 크기 및 그 분산정도에 따라서 주파수 영역에서 확산되어 나타나게 된다는 것을 알 수 있다.

이제 이러한 확산 정도가 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 위상잡음의 전력 크기 및 분산 정도에 따라서 비트신호의 스펙트럼 확산이 일어나는 정도를 고찰하여 본다.

III. 위상잡음에 의한 주파수 영역에서의 비트신호 확산 고찰

이제 앞의 결과들을 이용하여 위상잡음이 비트신호 스펙트럼에 미치는 영향을 분석하여 보았다. 우선 식 (12)와 같이 표시할 수 있는 위상잡음의 자기상관 함수가 위상잡음 전력의 크기 σ^2 및 분산 정도를 나타내는 스펙트럼 폭(width) Δf 에 따라 어떻게 나타나는지 그림 1과 그림 2에 표시하였다. σ^2 및 Δf 의 값들은 전형적으로 나타날 수 있는 레이더 시스템 위상잡음 파라미터 범위에 속하는 값들을 사용하였다. 이러한 그림들은 τ 값에 따른 자기상관 함수의 변화 정도를 나타내고 있다. 위상잡음에 대한 자기상관 함수는 식 (12)에서 알 수 있는 것처럼 위상잡음 전력이 0이거나 Δf 가 0인 이상적인 환경에서는 τ 값에 무관하게 항상 1이라는 상수 값을 나타내게 된다. 따라서 τ 값의 변화에 따른 자기상관 함수의 변화 정도가 작을수록 비트 신호의 스펙트럼 확산에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있다.

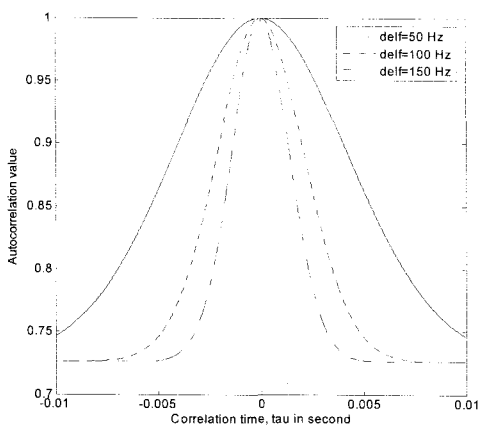


그림 1. 고정된 위상잡음 전력 값이 0.16 인 경우 스펙트럼 폭에 따른 자기상관 함수 변화
Fig.1. Variation of the phase noise autocorrelation function with different spectral widths and the fixed phase noise power of 0.16

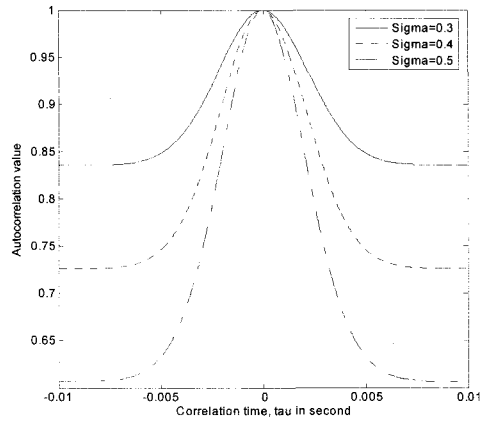


그림 2. 스펙트럼 폭이 100 Hz 인 경우 위상잡음 전력 파라미터, σ 에 따른 자기상관 함수 변화
Fig 2. Variation of the phase noise autocorrelation function with different phase noise powers and the same spectral width of 100Hz

그림 1 및 그림 2에 위상잡음 전력 σ^2 및 스펙트럼 폭 Δf 의 변화에 따른 위상잡음의 자기상관 함수 값을 표시하였다. 그림 1과 그림 2의 결과 그림들에서 확인할 수 있는 바와 같이 위상잡음에 대한 자기상관 함수의 변화 정도는 스펙트럼 폭 보다는 위상잡음 전력의 크기에 의하여 더욱 많은 영향을 받을 수 있다.

즉 시스템 위상잡음 스펙트럼 폭은 주파수에 따른 비트 스펙트럼 확산 정도에 영향을 주지만 위상잡음 전력의 크기 증가는 전체적인 비트 주파수 대역에서의 확산 증가를 나타내게 된다. 식 (13)에서 보는 것처럼 수신된 비트신호의 주파수가 이상적인 경우 즉 주파수 분산이 없는 경우에 위상잡음 스펙트럼 폭, Δf 와 위상잡음 전력, σ^2 값들에 따른 비트 스펙트럼 확산 정도를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림 3에서는 같은 위상잡음 전력 값 $\sigma^2=0.16$ 에서의 스펙트럼 폭에 따른 비트 스펙트럼의 확산 주파수 영역 및 그에 따른 상대적인 전력 값을 표시하였다. 그림 4의 경우는 고정된 스펙트럼 폭에서의 위상잡음 전력 증가에 따른 비트 스펙트럼 확산을 나타내며 비트 스펙트럼 확산 영역에서의 상대적인 전력 값이 전체적으로 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

그러나 실제로 FM-CW 레이더에서 목표물로부터 반사되는 수신 신호들을 복조하여 얻는 비트 신호들은

완전한 정현파 형태로 나타나지 않는다. 즉, 안테나에 의한 변조나 목표물에 따른 도플러 변이 주파수들의 분산 등으로 인하여 비트 주파수 영역에서 일반적으로 가우시안 스펙트럼 형태로 표시된다. 그러므로 이러한 현상을 고려하여 식 (13)을 다시 표시하여 보면 다음과 같다.

$$R_{y_d}(\tau) = C^2 \exp \left[j \left(2b_2 t_d - \frac{4\pi v}{\lambda} \right) \tau \right] \times \exp(-2\pi^2 w^2 \tau^2) \times \exp \left[-2\sigma^2 \left\{ 1 - \exp(-\pi^2 \Delta f^2 \tau^2) \right\} \right] \quad (14)$$

식 (14)에서 w 는 목표물 반사 신호에 의한 수신 가우시안 스펙트럼에서의 스펙트럼 폭, 즉 표준편차 (standard deviation)를 의미하게 된다. 따라서 식(14)의 모델에서 보는 바와 같이 위상잡음이 있는 경우에는 위상잡음에 의한 추가적인 확산현상이 나타나게 된다. 그러므로 이러한 추가적인 확산현상은 미약한 인접 비트 신호의 탐지 및 주파수 추정에 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

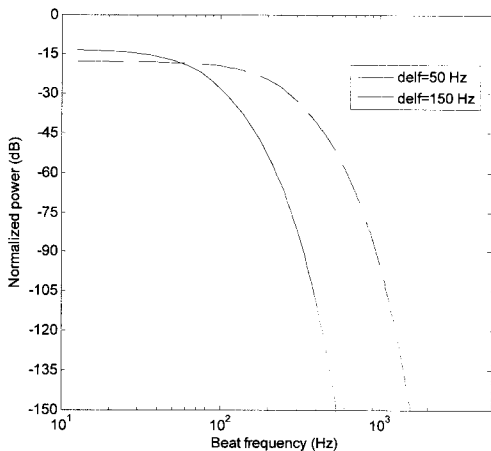


그림 3. 위상잡음 전력 값 $\sigma^2=0.16$ 인 경우 스펙트럼 폭 Δf 에 따른 비트 스펙트럼 확산

Fig 3. The beat spectrum spread according to the change of phase noise spectrum width for the fixed phase noise power, $\sigma^2=0.16$

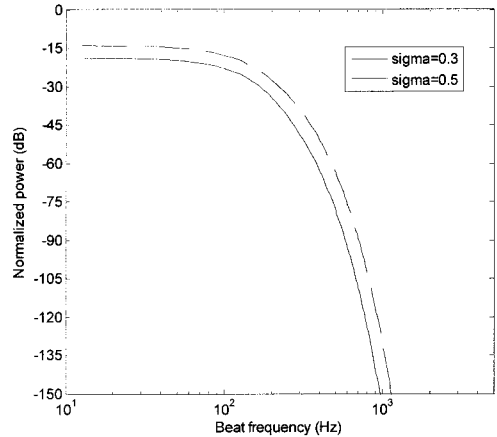


그림 4. 위상잡음 스펙트럼 폭 $\Delta f = 100$ Hz 인 경우 위상잡음 전력 파라미터 σ 에 따른 비트 스펙트럼 확산

Fig 4. The beat spectrum spread according to the change of phase noise power parameter σ for the fixed phase noise spectrum width, $\Delta f = 100$ Hz

이제 이러한 현상이 시스템에서의 비트 주파수 분석에 미치는 영향을 구체적으로 고찰하기 위하여 클러터 및 이동 목표물에 의한 비트 스펙트럼 모델 및 시스템 위상 잡음에 따른 스펙트럼 확산현상을 분석하여 본다. 일반적으로 클러터 및 목표물 반사파 전력 스펙트럼들은 가우시안으로 모델링할 수 있다. 따라서 위상잡음이 없는 경우에 나타나는 클러터 및 여러 개의 목표물에 의한 비트 신호들의 자기상관 함수들은 다음과 같이 표시될 수 있을 것이다. 즉,

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^n a_i \exp \left[j \left(2b_2 t_{d_i} - \frac{4\pi v_i}{\lambda} \right) \tau \right] \times \exp(-2\pi^2 w_i^2 \tau^2) \quad (15)$$

식(15)에서 a_i 는 각 전력 스펙트럼의 크기를 표시하며 클러터 및 목표물들에 의한 비트 신호의 상대적인 전력 크기를 나타낸다. w_i 는 각 비트 신호의 전력 스펙트럼 분산정도를 나타내게 된다. 따라서 위상잡음에 의하여 확산된 전력 스펙트럼 모델은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$S_T(f) = \sum_{i=1}^n a_i S_i(f - f_b)$$

where

$$S_i(f) = F \left[\begin{array}{l} \exp(-2\pi^2 w_i^2 \tau^2) \times \\ \exp[-2\sigma^2 \{1 - \exp(-\pi^2 \Delta f^2 \tau^2)\}] \end{array} \right] \quad (16)$$

식(16)에서 F는 푸리에 변환을 의미하며 f_b 는 비트 신호의 주파수를 나타낸다. 이제 식 (16)의 모델을 이용하여 클러터 및 목표물 신호의 침투치 전력 값 차이에 따른 위상잡음의 영향을 분석하여 보았다. 일반적으로 나타나는 지표면의 강력한 클러터를 고려하여 침투치 클러터 대 신호의 전력비는 30 dB로 설정하였다. 중심 비트 주파수의 차이 값을 변화시킴에 따라 나타나는 위상 잡음의 영향을 그림 5에서 그림 7까지 표시하였다.

여기서 각각의 스펙트럼 폭 w_i 는 클러터의 경우 80Hz로 목표물 반사 신호의 경우 40Hz로 가정하였다. 또한 전형적으로 나타나는 값에 근거하여 각 파라미터들을 정하였다. 즉, 시스템 위상잡음 전력 값, $\sigma^2=0.16$ 으로 스펙트럼 폭, $\Delta f=100\text{Hz}$ 로 하여 각각의 결과 그림들을 구하였다.

그림 5는 클러터 비트 주파수 및 목표물 반사 신호의 비트 주파수가 각각 10kHz와 11kHz로 중심 비트 주파수 차이가 비교적 크게 나타나는 경우이다. 이러한 경우에는 그림 5에서 보는 바와 같이 클러터와 목표물의 비트 신호 탐지 및 주파수 분리가 용이하게 이루어질 수 있다. 같은 조건에서 중심 비트 주파수 차이가 500Hz인 경우를 그림 6에 표시하였다.

그림 6에서 확인할 수 있는 것처럼 목표물 비트 신호를 클러터와 분리하여 탐지하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라 신호의 비트 주파수 추정도 정확하게 이루어질 수 없다. 각각의 중심 비트 주파수가 10kHz 및 10.3kHz로 그 차이가 300Hz인 경우의 결과를 그림 7에 나타내었다. 이러한 경우 클러터의 위상잡음 확산현상으로 클러터와 목표물 비트 신호의 분리가 불가능하므로 목표물의 탐지 및 비트 신호 주파수 추정은 불가능해 진다는 것을 확인할 수 있다.

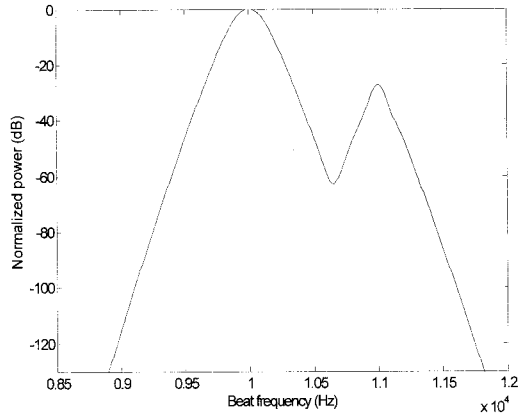


그림 5. 중심 비트 주파수 차이가 1kHz 인 경우 시스템 위상잡음 확산에 따른 클러터 및 목표물 반사 비트 신호의 정규화 된 전력 스펙트럼

Fig 5. The normalized power spectrum of a clutter and an echo beat signal considering the spreading effect by the system phase noise for the case of 1kHz difference between the centers of beat spectra

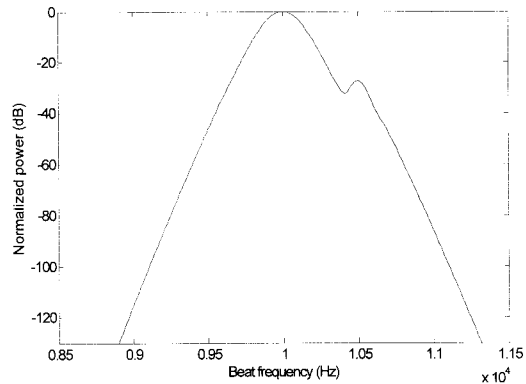


그림 6. 비트 주파수 차이가 500Hz 인 경우 클러터 및 목표물 반사 비트 신호의 전력 스펙트럼
Fig 6. The power spectrum of a clutter and an echo beat signal for the case of 500Hz difference

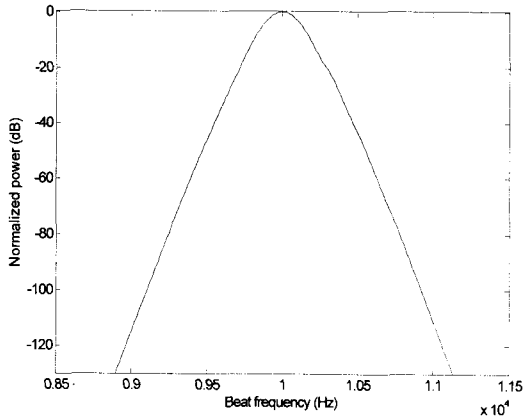


그림 7. 비트 주파수 차이가 300Hz 인 경우 클러터 및 목표물 반사 비트 신호의 전력 스펙트럼
 Fig 7. The power spectrum of a clutter and an echo beat signal for the case of 300Hz difference

IV. 결론

앞장의 결과 그림들에서 볼 수 있는 것처럼 위상잡음에 의한 강력한 클러터 스펙트럼의 확산 현상은 미약한 반사 신호의 탐지를 매우 어렵게 하거나 불가능하게 만드는 심각한 장애를 초래할 수 있다.

그러므로 본 논문에서 제시된 방법을 적용하면 개발하고자 하는 레이다 시스템의 요구사항, 운용 및 동작환경, 목표물의 특성 등을 종합적으로 고려하여 수신 비트 스펙트럼 분석 모델에서의 시스템 위상잡음, 클러터 및 목표물의 비트신호 파라미터들의 범위를 임의로 설정할 수 있다. 따라서 설계 목적의 모의구현을 통한 위상잡음 정도에 따른 성능 열화정도 분석 및 성능 검증 과정 등을 용이하게 수행할 수 있다. 또한 요구되는 비트신호 주파수 분리 정도에 따른 시스템 위상잡음 조건들을 결정할 수 있다.

참고문헌

[1] I. V. Komarov and S. M. Smolskiy, *Fundamentals of short-range FM radar*, Artech House, 2003.

[2] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 3rd ed. 2001.
 [3] S. O. Piper, "FMCW linearizer bandwidth requirements", Proc. IEEE National Radar Conference, pp. 142-146, March 1991.
 [4] J. A. Scheer and J. L. Kurtz, *Coherent radar performance estimation*, Artech House, 1993.
 [5] J. Rutman, "Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: fifteen years of progress", Proc. IEEE, vol. 66, no. 9, September 1978.
 [6] 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.
 [7] J. A. Barnes et al., "Characterization of frequency stability", IEEE Trans. Instr. Meas. vol. 20, no. 2, pp. 105-120, May 1971.

저자소개

이종길(Jonggil Lee)

한국해양정보통신학회논문지
 제 14권 제10호 참조