
FMCW 레이더에서의 비트 스펙트럼 추정에 관한 연구

이종길*

A Study on Estimation of a Beat Spectrum in a FMCW Radar

Jonggil Lee*

요 약

오래전부터 활용되어진 FMCW 레이더는 최근에 와서 고해상도 단거리 탐지 및 추적 등의 목적으로 다양하게 사용되어지고 있다. 이러한 레이더는 비교적 간단하게 구현이 가능할 뿐만 아니라 저 전력의 침투성 신호를 넓은 주파수 대역에 걸쳐서 송신하는 방식이기 때문에 외부기에 의한 전자파신호의 탐지 가능성을 현저히 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 레이더에서는 주파수 변조된 연속적인 파형의 신호를 송신하고 목표물에 의한 반사 신호의 복조 시에도 이러한 신호를 기준 주파수로 사용한다. 따라서 목표물의 거리 및 속도 정보 모두 비트 주파수 형태로 수신되어진다. 즉 이러한 비트 스펙트럼 영역에서 물체의 탐지여부를 판단하고 관련 정보를 추출하게 된다. 따라서 비트 스펙트럼 추정의 정확도 및 해상도가 우수하여야한다. 그러나 기존의 FFT(Fast Fourier Transform) 방식에 의한 스펙트럼 추정은 레이더 수신 신호의 획득시간이 짧을 경우 높은 주파수 해상도 및 낮은 부엽크기를 유지할 수 없는 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제는 반사 신호의 강도가 현저히 다른 인접 목표물들 간의 탐지를 어렵게 할뿐만 아니라 추출된 정보의 신뢰성을 떨어트린다. 따라서 본 논문에서는 모델 파라미터 추정 방법인 AR(Autoregressive) 및 EV(Eigenvector) 스펙트럼 추정을 적용하여 이러한 문제점들을 개선하였으며 그 모의실험 결과들을 비교하고 분석하였다.

ABSTRACT

Recently, a FMCW radar is used for the various purposes in the short range detection and tracking of targets. The main advantages of a FMCW radar are the comparative simplicity of implementation and the low peak power transmission characterizing the very low probability of signal interception. Since it uses the frequency modulated continuous wave for transmission and demodulation, the received beat frequency represents the range and Doppler information of targets. Detection and extraction of useful information from targets are performed in this beat frequency domain. Therefore, the resolution and accuracy in the estimation of a beat spectrum are very important. However, using the conventional FFT estimation method, the high resolution spectrum estimation with a low sidelobe level is not possible if the acquisition time is very short in receiving target echoes. This kind of problems deteriorates the detection performance of adjacent targets having the large magnitude differences in return echoes and also degrades the reliability of the extracted information. Therefore, in this paper, the model parameter estimation methods such as autoregressive and eigenvector spectrum estimation are applied to mitigate these problems. Also, simulation results are compared and analyzed for further improvement.

키워드

FMCW 레이더, 비트 스펙트럼, 단거리 탐지, 스펙트럼 추정

Key word

FMCW Radar, Beat Frequency, Short Range Detection, Spectrum Estimation

* 인천대학교 정보통신공학과

접수일자 : 2009. 06. 18

심사완료일자 : 2009. 07. 30

I. 서 론

레이다는 전자파를 이용한 원격센서 시스템의 하나로 오래전부터 주로 군사적인 목적으로 기술개발이 이루어져왔다. 그러나 레이다가 기상탐지 및 충돌방지용 등의 일반 상용목적으로도 다양하게 활용되어짐에 따라 비교적 크기가 작고 간단하면서도 경제적으로 구현이 가능한 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2]. 일반적으로 레이더 시스템에서는 목표물로부터 반사되는 전자파 신호를 거리 및 방위각별로 샘플링하여 신호의 크기 및 도플러주파수를 분석하여 목표물의 존재여부 및 속도정보를 추출하게 된다. 이러한 레이더는 펄스 도플러 레이더로 불리고 있으며 송신신호의 펄스 폭 및 펄스간의 간격에 따라 거리해상도, 거리 및 속도의 모호성 정도가 달라진다. 그러나 이러한 펄스 도플러 레이더는 거리해상도를 높이기 위하여 펄스폭을 좁힐 경우 시스템에서 요구되는 칩두치 전력이 지나치게 높아지게 된다. 즉 송신신호의 평균전력에 비하여 매우 높은 칩두치 전력을 순간적으로 발생시켜야 하는 시스템 구현상의 어려움이 발생한다. 또한 높은 칩두치 전력으로 인하여 다른 시스템에 심각한 간섭을 야기시킬 수 있을 뿐만 아니라 전자파 신호가 다른 시스템에 의하여 감지 또는 파악되기 쉽다는 보안상의 문제점도 발생하게 된다. 그러므로 사용목적에 따라서는 연속적인 신호파형(continuous wave)을 채택하는 것이 더 적절할 수 있다.

일반적으로 거리 해상도가 그렇게 높지 않아도 되는 중장거리용 탐지 및 추적 레이더나 고출력의 칩두치 신호를 발생시킬 수 있는 증폭기를 적용할 수 있는 경우에는 펄스신호 열들을 송출하는 방식을 채택하고 있다. 그러나 자동차 충돌방지용 레이더, 미사일 근접센서 등의 경우와 같이 단거리 및 초단거리에서 주로 이용되어지는 고해상도 레이더 시스템은 비교적 소형이면서 경제적으로 구현되어질 수 있어야 한다. 따라서 연속적인 파형을 사용하게 되면 낮은 칩두치 전력을 유지함으로써 반도체 증폭기 등을 사용할 수 있다. 또한 homodyne 수신기에서는 송신된 파형을 기준 주파수로 하여 복조된 기저대역 신호를 직접 추출하는 방식이기 때문에 구현이 매우 간단해지는 장점을 가지고 있다[3].

연속적인 파형의 신호를 이용하는 FMCW 레이더에서는 펄스 도플러 레이더와 달리 수신 단에서 복조된 신호들은 거리 및 속도정보가 모두 비트 스펙트럼으로 표시되며 비트 주파수(beat frequency) 별 스펙트럼의 전력크기에 따라 탐지여부가 결정되어진다. 따라서 단거리 시스템에서 거리 및 속도정보를 정확하게 얻기 위해서는 고해상도의 비트 스펙트럼 추정기가 필요하다. 그러나 기존의 스펙트럼 추정방식인 FFT 방법을 적용할 경우 신호획득 시간의 제약 및 다중 목표물에서의 전자파 반사 신호강도의 현격한 차이 등으로 인하여 주파수 해상도 문제가 발생할 뿐만 아니라 강한 반사 신호에 의한 부엽이 약한 반사 신호의 탐지를 가리는 현상이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 모델 파라미터 추정방식인 AR 및 EV 방법들을 적용하여 그 결과들을 각각 분석하고 고찰하였다.

II. FMCW 레이더에서의 비트 주파수

연속적인 파형의 신호를 안테나를 통해 방사하는 FMCW 레이더는 펄스 레이더와 달리 반사 목표물에 대한 거리정보를 얻기 위하여 시간에 따른 주파수 변조를 이용하고 있다. 주파수 변조방식에는 여러 가지 방법이 있으나 비교적 수신신호의 처리과정이 간단한 선형적인 주파수 변조방식이 많이 활용되고 있다. 시간에 따라 선형적으로 주파수 변조된 송신신호를 정규화 된 복소 신호 형태로 표시하면 다음과 같이 표시된다.

$$U = \exp\left(j2\pi\left(\frac{1}{2}st^2\right)\right) \quad \text{for } 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

식(1)에서 s 는 선형 주파수 변조에서의 기울기를 표시한다.

그런데 목표물이 속도를 가지고 이동하는 경우에는 도플러 주파수 변이에 의하여 비트 주파수가 변하게 된다. 따라서 거리정보와 속도 즉, 도플러 주파수 정보가 결합되어 비트 주파수로 나타나게 된다. 이러한 경우에는 거리 및 속도정보의 개별적인 추출이 가능

하지 않다. 그러나 그림 1에서 표시한 것처럼 송신파형을 시간에 따라 삼각형 형태로 up-down 선형 주파수 변조함으로써 도플러 주파수 및 거리정보를 구별하여 추출하는 것이 가능하다. 즉 up 주파수 변조영역에서는 도플러 주파수만큼 낮아진 비트 주파수가 나타나며 반대로 down 주파수 영역에서는 도플러 주파수만큼 더 높은 비트 주파수를 가지게 된다. 이러한 비트 주파수를 갖는 신호를 표시하여 보면 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$S = \begin{cases} A \cos[2\pi(f_r - f_d)t + \phi_0] & \text{for } \tau \leq t \leq T/2 \\ A \cos[2\pi(f_r + f_d)t + \phi_0] & \text{for } \tau + T/2 \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

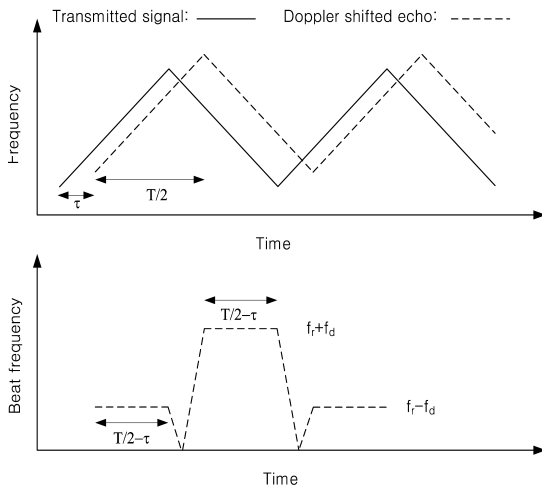


그림 1. 선형 주파수 변조된 송신파형에서의 도플러 변이된 이동 목표물의 반사파 복조 신호
 Fig. 1. A demodulated signal from a Doppler shifted moving target echo of a transmitted waveform with a linear frequency modulation

이러한 비트 신호 S에서의 주파수 성분을 분석하기 위하여 일반적으로 FFT 방법을 사용하고 있다. FFT 스펙트럼 추정방법은 목표물로부터 신호를 획득할 수 있는 시간인 dwell time 정도에 따라 주파수해상도가

결정될 뿐만 아니라 누설(leakage) 현상에 의하여 높은 부엽이 나타나게 된다. 이러한 높은 부엽들에 의한 문제점은 목표물들의 반사 신호의 크기가 크게 다를 경우 반사 전자파 신호전력의 강도가 미약하게 나타나는 인접 목표물들에 대한 신호의 탐지가 상대적으로 큰 부엽으로 인하여 거의 불가능해질 수 있다. 단거리 및 초단거리 탐지 및 추적에 이용되는 FMCW 레이더의 경우 매우 정확한 거리 및 속도 정보의 추출을 목적으로 하고 있기 때문에 이러한 해상도의 열화는 시스템 성능상의 심각한 장애요인이다. 따라서 기존의 방법을 이용한, 즉 FFT 스펙트럼 추정방식의 비트 주파수 탐지 및 추정은 극복할 수 없는 내재적인 한계를 가지게 된다. 이러한 문제점은 고속의 이동 목표물을 탐지하거나 추적하는 경우처럼 레이더의 dwell time 을 충분히 길게 할 수 없는 상황에서는 더욱 심각하게 나타날 수 있다.

따라서 이와 같은 내재적인 문제점들을 해결하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같은 제약사항들이 발생하지 않는 즉, 스펙트럼 모델 파라미터 추정방식을 이용한 비트 주파수 해석기법이 더욱 유용할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 비트 신호의 스펙트럼 추정에 모델 파라미터 추정 방식인 AR (Autoregressive) 및 EV(Eigenvector) 방법을 적용하여 기존의 FFT 방법과의 차이점을 비교하고 분석하고자 한다.

III. AR 및 EV 스펙트럼 추정 방법

FMCW 레이더 시스템에서도 목표물에 의한 반사신호를 안테나의 dwell time 동안 수신하여 데이터 블록 단위로 비트 신호에 대한 스펙트럼 추정을 수행하게 된다. 이렇게 수신되는 N 개의 블록 데이터에 대하여 기존의 DFT 또는 FFT 방식이 아닌 p 차수를 갖는 AR 파라미터 추정 방법을 생각하여 보자. Stationary 랜덤프로세스를 가정하면 N개의 데이터에 대하여 p 차수를 갖는 forward 및 backward AR 계수(coefficients)는 서로 켄레 복소수(complex conjugate) 관계에 있기 때문에 (N-p) forward 및 backward 예측 오차들은 다음과 같은 매트릭스 형태로 표시될 수 있다[4].

$$\mathbf{e}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_p^f \\ \mathbf{e}_p^{b*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_p \\ \mathbf{T}_p^* \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_p^{fb} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)에서 * 는 켈레 복소수를 나타내며 (N-p) 개의 값을 가지는 forward 및 backward 선형예측 오차벡터는 다음과 같이 표시하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_p^f &= [e_p^f[p+1] \cdots e_p^f[N]]^T \\ \mathbf{e}_p^b &= [e_p^b[p+1] \cdots e_p^b[N]]^T \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서의 T 는 transpose를 의미한다. 식 (3)에서 J 는 reflection 매트릭스, \mathbf{a}_p^{fb} 는 선형예측 계수벡터 를 \mathbf{T}_p 는 (N-p)×(p+1) Toeplitz 데이터 매트릭스를 나타낸다. 이러한 예러들의 제곱에 대한 평균값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_p^{fb} = \frac{1}{2} \mathbf{e}_p^H \mathbf{e}_p \quad (5)$$

여기서 H 는 Hermitian 을 표시한다. 따라서 식 (5)으로 표현되는 값을 최소화하는, 즉 modified covariance 방법에 의한 AR 파라미터 값을 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다[5].

$$\mathbf{R}_p \mathbf{a}_p^{fb} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_p \\ \mathbf{T}_p^* \mathbf{J} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \mathbf{T}_p \\ \mathbf{T}_p^* \mathbf{J} \end{bmatrix} \mathbf{a}_p^{fb} = \begin{bmatrix} 2\rho_p^{fb} \\ \mathbf{0}_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서의 \mathbf{R}_p 는 자기상관 함수(autocorrelation function) 를 나타낸다. 그러므로 추정된 AR 스펙트럼은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\hat{P}(f) = \frac{T \hat{\rho}}{\left| 1 + \sum_{n=1}^p \hat{a}[n] \exp(-j2\pi fnT) \right|^2} \quad (7)$$

식 (7)에서의 T는 샘플링 간격을 표시하며 $\hat{\rho}$ 은 잡음 분산(driving noise variance)의 추정치를 나타내게 된다. 여기서 모델의 차수인 p 가 커질수록 스펙트럼 추정치의 분산이 커지는 경향을 보이며 연산양도 많아지게 된다. FMCW 레이더의 경우 특정한 공간각, 즉 전자파 빔 폭 영역에 다수의 목표물이 존재하는 경우를 가정하기 어렵기 때문에 실제로는 많아야 몇 개 정도의 피크가 비트 스펙트럼 영역에 존재하게 될 것이다. 따라서 p의 값을 크게하면 연산 량의 증가 및 불필요한 해상도증가로 인한 잘못된 피크 점의 생성 등 문제점이 발생할 수 있다.

이제 eigenanalysis 방법을 이용한 비트 스펙트럼에서의 주파수 추정에 관하여 고찰하여 본다. 일반적으로 SNR 이 낮은 경우 AR 스펙트럼 추정 방법에 비하여 eigenanalysis 방법은 주파수 해상도 및 인접한 주파수 신호 추정에서 더 좋은 성능을 보인다. 즉, FMCW 레이더의 비트 스펙트럼 분석에서 인접한 정현파 신호들 또는 좁은 대역의 주파수 성분들을 정확히 구별하기 위해서는 eigenanalysis 방법이 더 좋은 성능을 보일 수 있다. 이 방법은 데이터 매트릭스 또는 자기상관 함수 매트릭스의 공간을 두 개의 벡터 부공간, 즉 신호와 잡음으로 분리하는 방식이다[6]. 가우시안 백색잡음이 부가된 복소 정현파 신호의 p차 Toeplitz 복소 자기상관 매트릭스는 각각 신호의 자기상관 매트릭스와 잡음 자기상관 매트릭스의 합으로 쓸 수 있다.

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{S}_p + \mathbf{W}_p \quad (8)$$

식 (8)에서 M개의 복소 정현파 신호가 존재한다고 가정하면 \mathbf{S}_p 및 \mathbf{W}_p 는 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{S}_p = \sum_{i=1}^M P_i \mathbf{s}_i \mathbf{s}_i^H, \mathbf{W}_p = \rho \mathbf{I} \quad (9)$$

식 (9)에서 ρ 는 잡음분산을 나타내며 I 는 (p+1)×(p+1) identity 매트릭스이다. 여기서 벡터 신호 s는 i 번째 정현파 신호에 대한 (p+1)차 column matrix 이다. 따라서 신호의 자기상관 매트릭스를 orthonormal eigenvector 및 eigenvalue 로 나타내면 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{S}_p = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (10)$$

이러한 eigenvector 는 신호벡터가 구성하는 신호 부공간과 같은 영역을 형성하게 된다. 마찬가지로 식 (9)에서의 identity 매트릭스도 orthonormal eigen vector 로 표시할 수 있다. 따라서 자기상관 매트릭스는 다음과 같이 두 개의 항으로 분리하여 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_p = \sum_{i=1}^M (\lambda_i + \rho) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H + \sum_{i=M+1}^{p+1} \rho \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (11)$$

따라서 잡음 부 공간에 근거한 주파수 추정함수를 나타낼 수 있다.

$$P(f) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^p \alpha_k |e^H(f) \mathbf{v}_k|^2} \quad (12)$$

여기서 \mathbf{e} 는 정현파 벡터를 나타낸다. 이 정현파 벡터가 신호 벡터들 중의 하나라면 분모 항은 0 이 되므로 이론적으로는 무한대의 값을 가져야 한다. 그러나 실제로 추정오차로 인하여 정현파 신호 주파수에서 매우 가파른 첨두치 값을 표시하게 된다. EV 방법은 식 (12)에서의 분모에 나타나는 가중치 계수를 각각의 잡음 부 공간에 대응하는 eigenvalue 의 역수로 하여 스펙트럼을 추정하는 방식이다[7]. 이러한 방법은 잘못된 첨두치가 나타나는 것을 억제하는데 효과적일뿐만 아니라 잡음 스펙트럼을 비교적 잘 나타나게 해준다. 따라서 본 논문에서는 EV 방법을 적용하였다.

IV. 결과 분석

결과를 얻기 위하여 FMCW 레이더에서의 이동물체의 거리 및 속도에 의한, 즉 비트 주파수 천이에 따른 비트 신호를 모의 구현하였다. 이러한 수신 비트 신호의

크기는 확률적으로 Rayleigh 분포임을 가정하였고 비트 주파수 스펙트럼의 형태는 좌우의 스펙트럼 폭을 다르게 나타낼 수 있는 skewed Gaussian 형태로 나타낼 수 있도록 하였다. 또한 배경잡음으로 부가성 백색잡음(AWGN)을 가정하였으며 잡음 전력정도를 조정할 수 있도록 하였다. 레이더에서의 선형적인 주파수 변조대역은 200 MHz 로 하였으며 사용 주파수는 30 GHz 로 설정하였다. 또한 상향변조 주파수 영역 및 하향변조 주파수 영역에서의 dwell time 즉, 각각의 신호획득 시간은 0.267 millisecond 로 하였으며 모의구현에서는 하향변조 주파수 영역에서의 비트 스펙트럼 분석에 대한 결과를 고찰하여 보았다. 먼저 두 개의 목표물들이 레이더로부터 500m 떨어진 동일한 거리에 위치하고 있고 이동속도가 각각 150 m/sec 및 175 m/sec 인 목표물들을 가정하여 보았다. 이러한 목표물들이 거의 이상적인 점 형 목표물(point target) 이라고 한다면 매우 가파른 피크를 형성하는 두 개의 비트 스펙트럼 첨두치를 나타내게 될 것이다. 두 목표물의 반사파 신호전력의 차이는 약 17dB 로 가정하였다. 그러나 근접거리에서의 빠른 목표물의 정확한 탐지를 위하여 신호획득시간을 0.267 millisecond 로 할 경우 주파수 해상도 저하 및 목표물 도플러 스펙트럼의 누설현상으로 인한 간섭으로 기존의 FFT 방법을 사용할 경우 실제로는 그림 2 와 같은 스펙트럼을 가지는 비트 신호를 수신하게 될 것이다. 따라서 이동 속도의 차이에 따라 두 개의 목표물을 구별하기가 거의 불가능하다는 것을 알 수 있다.

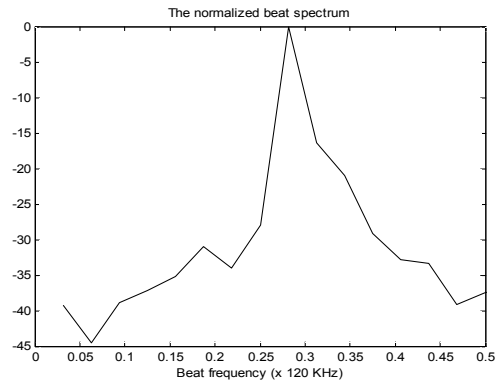


그림 2. 짧은 안테나 dwell time 으로 인한 비트신호의 FFT 스펙트럼 확산
Fig. 2. The spreaded FFT spectrum of a beat signal due to the short antenna dwell time

이제 기존의 방법이 아닌 앞장에서 설명한 파라미터 추정 방식인 AR 및 EV 방법을 적용한 비트 스펙트럼 추정 결과를 그림 3 및 그림 4에 나타내었다. AR 방법으로는 이동속도가 다른 두 목표물들을 도플러 천이에 의하여 나타나는 비트 주파수 차이로 구별한다는 것이 거의 불가능하였다. 반면 고유벡터를 사용한 EV 방법은 두 개의 목표물들을 비트 주파수에 따라 정확히 분리해 내고 있음을 확인할 수 있다.

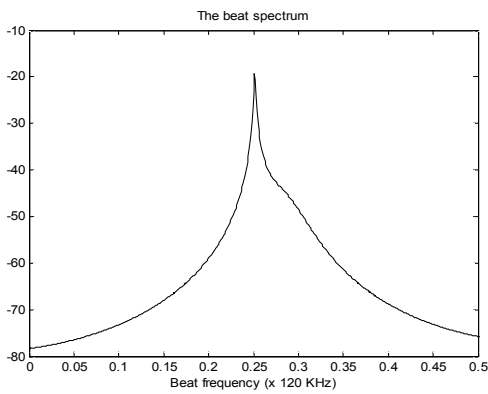


그림 3. 신호전력 차이가 17 dB 인 경우 AR 방법을 이용한 비트신호 스펙트럼 추정
 Fig. 3. Estimation of a beat spectrum with AR method for the case of 17 dB power difference

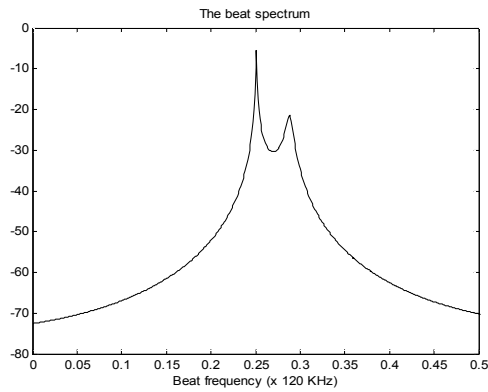


그림 4. 신호전력 차이가 17 dB 인 경우 EV 방법을 이용한 비트신호 스펙트럼 추정
 Fig. 4. Estimation of a beat spectrum with EV method for the case of 17 dB power difference

AR 방법에서 두 목표물간의 신호 분리가 제대로 이루어지지 않은 이유는 인접한 목표물의 반사 신호전력의 차이가 약 17dB 정도로 강한 반사 신호의 분산으로 인하여 약한 신호의 탐지가 상대적으로 매우 어렵게 되기 때문이다.

그러나 EV 방법은 정현파 신호벡터와 잡음 부공간의 특성을 이용하여 열악한 조건에서도 인접한 비트 주파수를 갖는 두 개의 목표물을 확실히 분리할 수 있게 해준다. 그러면 두 목표물들 간에 전자파 반사 신호전력의 강도가 큰 차이가 나지 않는, 즉 약 6 dB 정도의 차이를 갖는 두 개의 목표물들 모의 구현하였으며 이외의 조건들은 같다고 가정하였다. 앞의 경우와 마찬가지로 기존의 FFT 방법으로 분석하게 되면 확산되어 나타나게 되므로 두 개의 목표물에 대한 구별이 거의 불가능하다.

그러나 그림 5에서 보는 것처럼 두 목표물들 간의 반사 신호전력 차이가 크지 않을 경우 AR 방법을 적용하여도 두 개의 목표물에 의한 비트 주파수가 비교적 정확하게 분리되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 비교를 위하여 동일한 조건의 시간영역 수신신호에 EV 방법을 적용하여 표시한 비트 스펙트럼을 그림 6에 표시하였다.

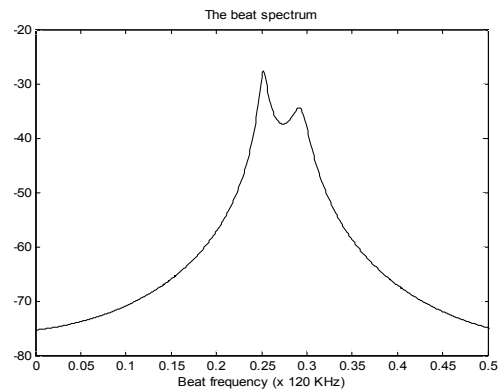


그림 5. 신호전력 차가 6 dB 인 AR 스펙트럼 추정
 Fig. 5. Estimation of a beat spectrum with AR method for the case of 6 dB power difference

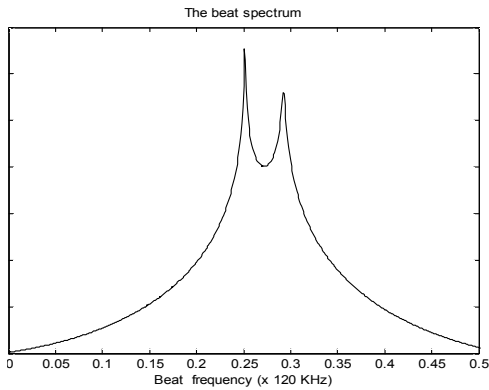


그림 6. 신호전력 차가 6 dB 인 EV 스펙트럼 추정
 Fig. 6. Estimation of a beat spectrum with EV method for the case of 6 dB power difference

V. 결론

본 논문에서는 FMCW 레이더에서의 비트신호 스펙트럼 추정을 기존의 FFT 방법이 아닌 AR 방법이나 EV 방법을 적용할 경우 레이더 시스템의 성능이 개선될 수 있음을 보였다. 결과 그림들에서 보는 것처럼 안테나 dwell time, 즉 반사파 신호를 획득할 수 있는 시간이 짧을 경우 기존의 FFT 방법으로는 동일한 거리에 나타난 두 목표물의 속도 차이에 따른 비트 주파수 구별이 거의 불가능하였다. 그러나 AR 방법이나 EV 방법을 적용할 경우 이러한 문제점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 전자파 반사 신호전력의 차이가 매우 클 경우 결과 그림들에서 보는 것처럼 AR 방법보다는 신호 및 잡음 부 공간 벡터를 이용하는 EV 방법을 적용하는 것이 주파수 분리 및 정확한 비트 주파수 추정에 더욱 효과적이다.

참고문헌

[1] T. Musch, "A high precision 24-GHz radar based on a fractional-N ramp-PLL", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurements*, vol. 52, pp. 324-327, 2003.
 [2] G. L. Charvat and L. C. Kempel, "Synthetic aperture radar imaging using a unique approach to frequency-

modulated continuous-wave radar design", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, pp. 171-177, 2006.
 [3] A. Tessmann et al. "Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial high-resolution sensor applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 12, pp. 2995-3001, 2002.
 [4] C. L. Nikias and P. D. Scott, "The covariance least-squares algorithm for spectral estimation of processes of short data length", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 21, pp.180-190, 1983.
 [5] T. J. Ulrych and R. W. Clayton, "Time series modeling and maximum entropy", *Phys. Earth Planet Inter.*, vol. 12, pp. 188-200, 1976.
 [6] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, pp. 276-280, 1986.
 [7] D. H. Johnson and S. R. DeGraaf, "Improving the resolution of bearing in passive sonar arrays by eigenvalue analysis", *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 30, pp.638-647, 1982.

저자소개



이종길(Jonggil Lee)

1982년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 1월 미국 Case Western Reserve University, Electrical Eng. (M.S.)

1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년 1월 ~ 1993년 2월 삼성전자 특수연구소
 1993년 3월 ~ 현재 인천대학교 정보통신공학과 교수
 ※관심 분야: 무선통신, 레이더신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석