
레이다 시스템에서의 효율적인 도플러 스펙트럼 추정

이종길*

*인천대학교

Efficient Doppler Spectrum Estimation in Radar Systems

Jonggil Lee*

*University of Incheon

E-mail : jnglee@incheon.ac.kr

요 약

이동 목표물 및 기상 현상 등의 원격탐지를 위한 레이다 시스템에서는 수신되는 전자파 반사 신호로부터 유용한 정보를 추출하기 위하여 각 거리별로 도플러 스펙트럼의 추정이 필요할 수 있다. 그러나 이제까지 일반적으로 적용되어졌던 FFT 주파수 추정방법은 안테나의 dwell time 이 짧은 경우 해상도 문제가 발생하거나 또는 상대적으로 강한 반사 신호의 부엽 확산으로 인하여 상대적으로 약한 목표물의 탐지가 어려울 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 시간영역에서의 도플러 신호모델 파라미터 추정을 통한 효율적인 도플러 스펙트럼 추정방법에 관하여 비교하고 고찰하였다.

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. However, The conventional spectrum estimation method, FFT(Fast Fourier Transform), called the Doppler filter bank, causes the frequency resolution problem if the dwell time is relatively short. This short acquisition time also spreads the side lobe levels of return echoes further, resulting in difficulties for the discrimination of weak target signals included in relatively strong target echoes. Therefore, in this paper, the efficient Doppler spectrum estimation methods are compared and investigated through the parameter spectrum estimation in the time domain to overcome these problems.

키워드

Doppler spectrum, FFT, Parameter estimation, 레이다 시스템

1. 서 론

레이다 시스템에서는 목표물로부터 반사되는 도플러 신호로부터 정보를 추출하여 이동 및 고정 물체의 탐지 및 속도 등을 알아내는데 활용하고 있다. 원격 탐지 및 추적 레이다에서는 거리별 도플러 스펙트럼을 분석함으로써 목표물의 거리 및 속도정보를 추출하게 된다. 최근의 이러한 레이다 시스템에서는 탐지대상의 목표물의 속도추

정 정확도에 대한 중요성이 갈수록 높아지고 있다. 특히 최근에 자동차 충돌 방지용으로 개발되고 있는 초단거리용 선형주파수변조 방식의 CW 레이다의 경우 거리 및 속도 추정치의 정확도는 매우 중요한 문제이다. 그러나 이러한 거리 및 주파수 해상도 및 정확도가 현저히 떨어지는 경우에는 목표물의 탐지 및 추적성능은 심각한 정도로 저하될 수 있다. 즉 빠른 이동 물체의 탐지를 목표로 하는 시스템이나 시스템의 특성상 레이다

안테나가 목표물의 반사 신호를 획득할 수 있는 dwell time 이 상당히 짧게 주어지는 경우가 있다. 이러한 경우는 급변하는 기상정보를 추출하기 위한 기상레이다 시스템에서도 마찬가지로 발생하는데 즉, 광범위한 탐지공간을 빠른 시간 내에 원격 탐지하기 위해서는 기상신호의 획득시간에 제약이 주어지게 된다. 따라서 지금까지 대부분의 레이다 시스템에서 활용하고 있는 FFT(Fast Fourier Transform) 방법은 신호의 획득 시간이 현저히 짧아지는 경우 도플러 주파수 해상도의 열화가 심하게 나타내게 된다. 따라서 이러한 주파수의 해상도의 열화는 도플러 및 거리 셀에서의 탐지 성능 및 속도 정보 추출에 심각한 악영향을 미치게 된다.

따라서 본 논문에서는 기존의 Fourier 스펙트럼 추정방식이 아닌 파라미터 추정방식으로 도플러 스펙트럼을 얻는 기법을 활용하여 이러한 문제점을 해결하는 방법에 대하여 고찰하였다. 그러나 이러한 파라미터 스펙트럼 추정방식은 일반적으로 기존의 방법보다 많은 연산량이 요구된다는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 비교적 간단한 연산으로 구현이 가능한 AR (Autoregressive) 및 Eigenvector 알고리즘을 이용한 스펙트럼 추정방식에 관하여 살펴보았다[1]. AR 스펙트럼 추정방식은 알고리즘에 따라 여러가지 종류가 있을 수 있는데 본 논문에서는 일반적으로 정현파 성분의 분석을 위해서 가장 적합한 것으로 알려진 modified covariance method를 적용하여 그 성능 정도를 분석하였다.

II. Eigenvector 및 AR 스펙트럼 추정방법

일반적인 레이다 시스템에서는 레이다 안테나가 특정 목표물 또는 공간을 일정한 시간동안 바라보는 동안 신호를 획득하여 이렇게 얻어진 도플러 신호를 분석하게 된다. 따라서 얻어진 블록 데이터를 이용하여 AR 스펙트럼 추정에 필요한 파라미터들을 추출하여야 한다. AR 스펙트럼 파라미터 추정이 이루어지게 되면 AR 스펙트럼은 다음과 같이 표현되어질 수 있다[2].

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

식 (1)에서 T 는 샘플링 간격을 나타내며 $\hat{\rho}_w$ 은 잡음분산(driving noise variance)의 추정치를 나타낸다. 여기서 p 는 모델의 차수(order) 를 나타내게 되는데 일반적으로 p 값이 커질수록 스펙트럼 추정치의 분산이 커지는 경향을 보이게 되며 연산양도 많아지게 된다. 그러나 도플러 해상도의 질적이 면이 개선되어 많은 피크점이 나타나는

스펙트럼의 경우도 충실하게 표현되어질 수 있을 것이다. 그런데 레이다 시스템에서 특정한 거리방 (range cell) 영역에서의 반사 도플러신호의 스펙트럼 형태는 일반적으로 많아야 몇 개 정도의 피크 점만을 갖는 경우가 대부분이다. 따라서 지나치게 p 의 값을 높게 설정하게 되면 연산양만 늘어날 수 있으며 추정된 스펙트럼도 불필요한 스펙트럼 해상도 증가에 따른 문제점, 즉 실제 스펙트럼에는 존재하지 않는 잘못된 피크 점들이 나타날 수 있다. 본 논문에서 적용한 Modified covariance 방법은 forward 및 backward 에서의 오차에 대한 자승 값을 최소화 하는 기법이다[3]. 그러므로 다음과 같이 주어진 블록 데이터에서의 forward 및 backward 예측 에러의 자승 값에 대한 평균을 최소화 하는 방법으로 나타낼 수 있다 [4]. 즉,

$$\rho_p^{fb} = \frac{1}{2} \left[\sum_{n=p+1}^N |e_p^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |e_p^b[n]|^2 \right] \quad (2)$$

Eigenvector 주파수 추정방법은 잡음 부공간의 eigenvector 들은 정현파 신호벡터들과 직교한다는 특성을 이용하여 다음과 같이 스펙트럼을 추정하는 방식이다[5][6].

$$P(f) = \frac{1}{\mathbf{e}^H(f) \left(\sum_{k=M+1}^p \frac{1}{\lambda_k} \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^H \right) \mathbf{e}(f)} \quad (3)$$

식(3)에서 \mathbf{v} 는 p-M 잡음 부공간에서의 eigenvector 들을 표시하며 λ 는 eigenvalue 를 나타낸다. 또한 여기서 \mathbf{e} 는 다음과 같은 복소정현파 신호벡터를 의미한다.

$$\mathbf{e}(f) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j2\pi fT) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi fMT) \end{bmatrix} \quad (4)$$

III. 레이다 도플러 신호발생 및 추정결과

이제 앞장에서 설명한 방법을 이용하여 eigenvector 및 AR 스펙트럼 추정방법에 의한 결과를 얻기 위하여 우선적으로 모의 도플러 신호를 발생시켰다. 모의 도플러 신호는 일반적으로 나타나는 레이다에서의 전형적인 수신신호들을 모델로 하였다. 즉 이동 목표물들로부터 반사된 도플러 신호를 발생시키기 위하여 비교적 좁은 도플러 스펙트럼 폭을 가지면서 서로 전력 값이 상당히 다른 두 개의 침두치를 갖는 레이다 수신

신호를 가정하였다. 목표물의 속도는 최대 200m/sec 로 가정하였으며 동작 주파수는 30 GHz 로 설정하였다. 따라서 스펙트럼 중첩을 피하기 위하여 펄스 레이더인 경우 샘플링 주파수인 PRF(Pulse Repetition Frequency)는 80 KHz 가 되도록 하였다. 또한 모의 도플러 신호에서는 배경 잡음을 인가하였으며 서로 신호전력이 다른 즉 각각 20dB 및 15dB 정도의 차이를 갖는 두 개의 목표물에 대한 전형적인 도플러 신호를 발생시켰다. 모의된 원래의 도플러 스펙트럼은 2048 포인트를 갖는 즉 데이터 획득시간이 30 msec 정도 되는 것을 가정하였다. 그러나 이러한 dwell time 이 이러한 획득시간이 1/32 즉 1ms 정도로 줄어들게 되면 기존의 FFT 방식으로는 도플러 해상도 저하 및 side lobe level 의 확산으로 인하여 목표물의 정보를 정확하게 추출하기가 어려워진다. 그림 1은 기존의 FFT 방식으로 도플러 해상도의 저하 및 side lobe level 확산으로 15dB 전력차이가 나는 2개의 목표물에 대한 정확한 정보추출이 어려운 경우를 보여준다. 그림 2는 같은 시간영역에서의 블록 데이터에 5차 AR 스펙트럼 추정방법을 적용한 결과를 나타내고 있다. 그림 3은 eigenvector 방법으로 추정한 스펙트럼을 보여준다. 그림 4의 경우는 20dB 전력신호 차이가 나는 두 개의 목표물에 대한 FFT 도플러 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 5 및 그림 6은 같은 시간 영역 데이터에 AR 및 eigenvector 추정방법을 사용하여 얻은 결과이다. 결과들에서 볼 수 있는 것처럼 기존의 FFT 스펙트럼에 비해서는 AR 방법이나 eigenvector 추정방법이 더 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있으며 반사정도가 현저히 다른 두 개의 목표물을 정확히 판별하기 위해서는 eigenvector 추정방법을 적용하여야 한다는 것을 확인할 수 있다. 특히 eigenvector 스펙트럼 추정의 경우 정확한 스펙트럼 피크 점들을 나타내는 매우 우수한 추정결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

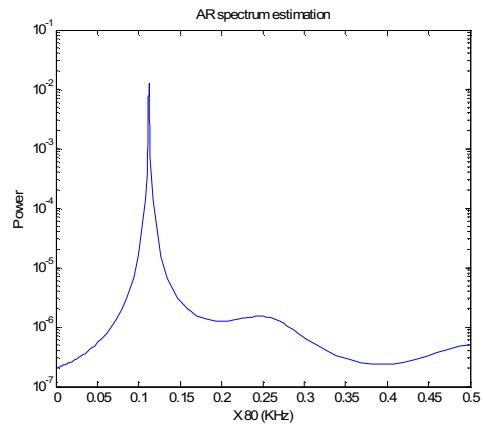


그림 2. 15dB 전력차이를 갖는 두 개의 목표물 반사 도플러신호에 대한 AR 추정치

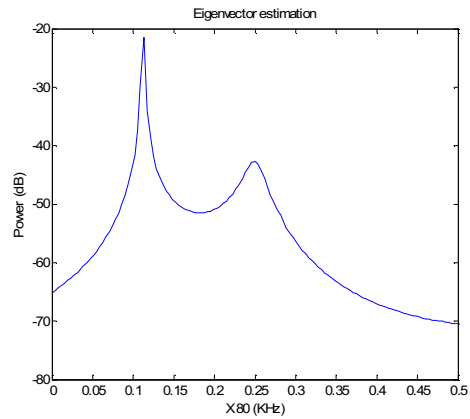


그림 3. 15dB 전력차이를 갖는 두 개의 목표물 반사 도플러신호에 대한 eigenvector 추정치

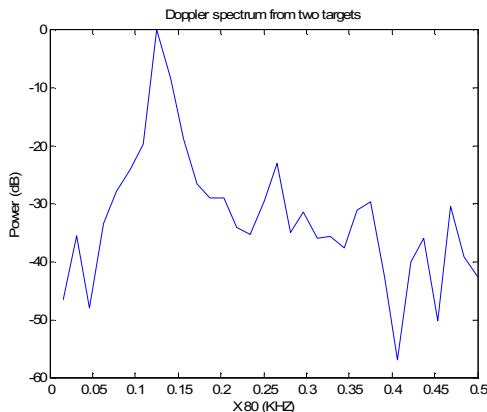


그림 1. 15dB 전력 차이를 갖는 두 개의 목표물로부터 반사된 도플러 신호

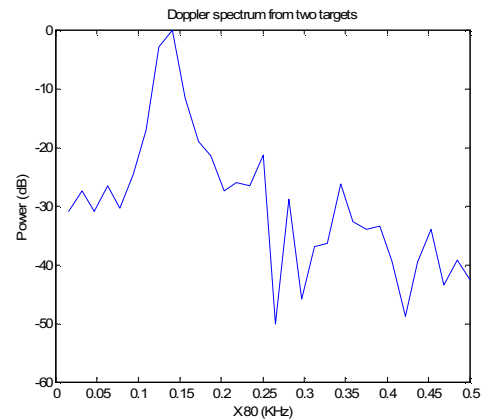


그림 4. 20dB 전력 차이를 갖는 두 개의 목표물로부터 반사된 도플러 신호

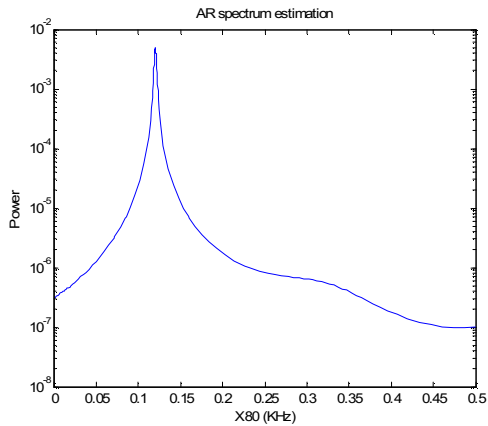


그림 5. 20dB 전력차이를 갖는 두 개의 목표물 반사 도플러신호에 대한 AR 추정치

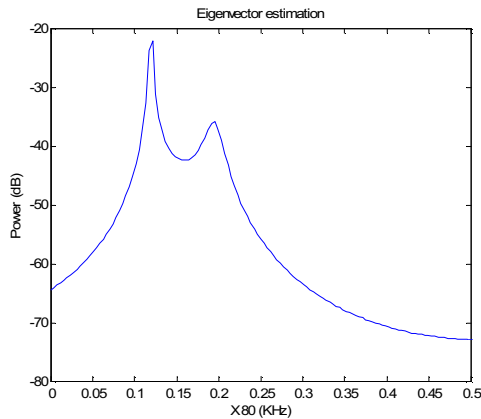


그림 6. 20dB 전력차이를 갖는 두 개의 목표물 반사 도플러신호에 대한 eigenvector 추정치

IV. 결 론

레이다 시스템에서 안테나의 목표물에 대한 dwell time 이 줄어드는 경우 기존의 FFT 방식에 의한 스펙트럼 추정을 적용할 경우 심각한 해상도 문제 및 도플러 side lobe level 확산으로 인하여 시스템의 성능이 현저히 나빠질 수 있다. 그러나 결과 그림들에서 보는 것처럼 AR 스펙트럼 추정이나 eigenvector 추정기법을 사용하면 기존의 Doppler filter bank 방식에 비하여 상대적으로 훨씬 더 나은 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 다중 목표물들에 의한 반사 도플러 신호분석에서 목표들의 반사 신호전력 차이가 20dB 정도 까지 크게 차이나는 경우 eigenvector 방법을 적용하여야 정확한 정보를 추출할 수 있음을 알 수 있다. eigenvector 방식은 AR 스펙트럼 추정방식의 경우보다 연산량이 다소 증가할 수 있으나 실제로 추정하는 스펙트럼의 특징을 고려하여 볼 때 신호벡터의 차원이 2개 또는 3개

정도로 비교적 낮은 차수를 가지게 되므로 그 연산량의 증가정도는 크지 않다. 특히 신호처리용 하드웨어의 성능이 날로 개선되고 있어 약간의 연산 양 증가는 시스템 구현에 큰 장애가 되지 않는다.

그러므로 레이다 시스템에서 고속 이동 물체를 탐지하거나 또는 안테나의 dwell time 이 짧아져 데이터를 획득할 수 있는 시간이 제한되는 경우나 또는 전력 차가 크게 나타나는 목표물들의 정확한 분리 및 탐지를 위해서는 기존의 방식보다는 파라미터 추정을 통한 방식이 더 우수한 성능을 나타낸다. 또한 목표물들의 반사신호 전력 차이가 크게 나는 경우 AR 보다는 eigenvector 스펙트럼 추정방식을 적용하는 것이 보다 더 정확한 결과를 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] S. L. Marple, Jr., "A new autoregressive spectrum analysis algorithm", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. ASSP-28, pp. 441-454, August, 1980.
- [2] H. Sakai, "Statistical properties of AR spectral analysis", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. ASSP-27, pp. 402-409, August, 1979.
- [3] M. Morf et al., "Efficient solution of covariance equations for linear prediction", IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. ASSP-25, pp. 429-433, October, 1977.
- [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. GE-21, pp. 180-190, April 1983.
- [5] D. H. Johnson, "The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems", Proc. IEEE, vol. 70, pp. 1018-1028, September 1982.
- [6] 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. ASSP-30, pp. 638-647, August 1982
- [7] P. Mahapatra, *Aviation weather surveillance systems*, The Institution of Electrical Engineers and The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [8] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 2001.