

항공기용 레이다에서의 도플러 스펙트럼 분석

이종길*

*인천대학교

Analysis of Doppler Spectra in an Airborne Radar

Jong Gil Lee*

*University of Incheon

E-mail : jnglee@incheon.ac.kr

요 약

원격탐지를 목적으로 하는 레이다 시스템에서는 일반적으로 도플러 필터뱅크를 적용하여 목표물 반사 신호들의 스펙트럼을 분석함으로써 반사 신호의 크기 및 속도정보 등을 얻게 된다. 이러한 스펙트럼 추정방법은 오래 전부터 널리 이용되고 있는 FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 이용한 것으로 대부분의 레이다 시스템에서 채택하고 있는 방식이다. 그러나 레이다 시스템에서의 목표물 반사 신호 획득시간이 현저히 짧은 경우, 즉 고속으로 이동하는 항공기용 시스템이나 매우 빠른 목표물들의 즉각적인 탐지가 목적인 시스템에서는 기존 FFT 스펙트럼 추정방식으로는 높은 도플러 주파수 해상도를 얻을 수 없기 때문에 정확도가 현저히 떨어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 해상도 문제가 발생하지 않는 파라미터 추정방식인 AR 스펙트럼 추정 방법에 대하여 고찰하였다.

ABSTRACT

For the remote sensing purpose, radar systems extract the target information, such as the magnitude of reflectivity and the velocity from the spectrum analysis of return echoes through the Doppler filter bank. This conventional spectrum estimation method, FFT(Fast Fourier Transform) is widely used in most radar systems. However, the frequency resolution of return echoes can be seriously degraded in fast moving targets because of the short acquisition time. Since the high Doppler frequency resolution is important in the detection and tracking of fast moving targets, it can cause very unsatisfactory results. Therefore, in this paper, the parameter spectrum estimation method called AR(Autoregressive) spectrum estimation, is investigated to overcome these problems.

키워드

Doppler signal, FFT, AR 스펙트럼 추정, 항공기용 레이다

1. 서 론

레이다 시스템에서는 목표물로부터 반사되는 도플러 신호로부터 정보를 추출하여 이동 및 고정 물체의 탐지 및 속도 등을 알아내는데 활용하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 산악지형에 의한 강력한 지표면 반사 클러터의 영향을 받게 되

므로 시스템 위상잡음, 열악한 신호대 잡음비등을 고려하여야한다. 이러한 강력한 클러터 반사파들은 도플러 필터뱅크에 의하여 클러터의 제거가 원활히 이루어지는 경우라 하더라도 도플러 스펙트럼의 해상도가 많이 떨어지는 경우에는 목표물의 탐지 성능은 현저히 저하될 수 있다. 즉 항공기용 레이다 또는 빠른 이동 물체의 탐지를

위한 시스템에서는 레이더 안테나가 목표물의 반사 신호를 획득할 수 있는 dwell time 이 상당한 정도로 줄어들게 된다. 이러한 경우는 급변하는 기상정보를 추출하기 위한 기상레이더 시스템에서도 마찬가지로 발생하는데 즉, 광범위한 탐지공간을 빠른 시간 내에 원격 탐지하기 위해서는 기상신호의 획득시간에 제약이 주어지게 된다. 따라서 지금까지 대부분의 레이더 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) 스펙트럼 추정방식에 관하여 살펴보았다[1]. AR 스펙트럼 추정방식도 알고리즘에 따라 여러 가지 종류가 있을 수 있는데 본 논문에서는 일반적으로 정현파 성분의 분석을 위해서 가장 적합한 것으로 알려진 modified covariance method 를 적용하여 그 성능 정도를 분석하였다.

II. AR 스펙트럼 추정

일반적인 레이더 시스템에서는 레이더 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].

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

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 나타나

스펙트럼의 경우도 충실하게 표현되어질 수 있을 것이다. 그런데 레이더 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. 따라서 대부분의 레이더 시스템에서는 AR 스펙트럼 추정에서의 차수를 6 이하로 하는 것이 적절하다고 할 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. 즉,

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

식(2) 에서의 forward 및 backward 오차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} e_p^f[n] &= x[n-p] + \sum_{k=1}^p a_p^f[k] x[n-p+k] \\ e_p^b[n] &= x[n-p] + \sum_{k=1}^p a_p^{f*}[k] x[n-p+k] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 보는 것처럼 backward coefficient 는 forward coefficient 의 complex conjugate 로 표시될 수 있다[4].

III. 도플러 신호 및 결과

이제 앞장에서 설명한 방법을 이용하여 AR 스펙트럼 추정 결과를 얻기 위하여 우선적으로 모의 도플러 신호를 발생시켰다. 모의 도플러 신호는 기상 레이더에서의 전형적인 수신신호들을 모델로 하였다. 즉 상당히 좁은 도플러 스펙트럼 폭을 갖는 클러터와 두 개의 첨두 점을 갖는 비교적 폭이 넓은 기상 도플러 스펙트럼을 가정하였다. 기상신호에서의 풍속은 최대 60m/sec 로 동작 주파수는 9 GHz 로 설정하였다. 따라서 스펙트럼 중첩을 피하기 위하여 샘플링 주파수인 PRF(Pulse Repetition Frequency)는 4.8 KHz 되도록 하였다. 또한 모의 도플러 신호에서는 배경 잡음 및 클러터, 그리고 클러터에 대하여 -20 dB 정도의 적은 반사 신호 전력을 갖는 기상신호 스펙트럼을 발생시켰다. 모의된 원래의 도플러 스

펙트럼은 2048 포인트를 갖는 즉 데이터 획득시간이 0.43 초 정도 되는 것을 가정하였다. 이러한 획득시간이 1/16 또는 1/32 로 줄어들게 되면 이에 따라 얻을 수 데이터 수는 감소하게 된다. 그림 1 에서는 발생시킨 원래의 모의 도플러 스펙트럼을 보여주고 있으며 그림 2 는 그림 1에서 표시되는 원래의 도플러 스펙트럼에 대한 시간영역에서의 획득시간을 1/16 로 줄인 경우의 기존의 FFT 추정방식의 스펙트럼을 표시하고 있다. 그림 3 에서는 그림 2에서 얻은 바와 같은 시간영역에서의 블록 데이터에 6차 AR 스펙트럼 추정방법을 적용한 결과를 나타내고 있다. 그림 3으로부터 알 수 있는 것처럼 AR 스펙트럼 추정의 경우 줄어든 데이터 획득시간의 문제점을 거의 완전히 해결할 수 있을 정도로 정확한 스펙트럼 피크 점들을 나타내는 매우 우수한 추정결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

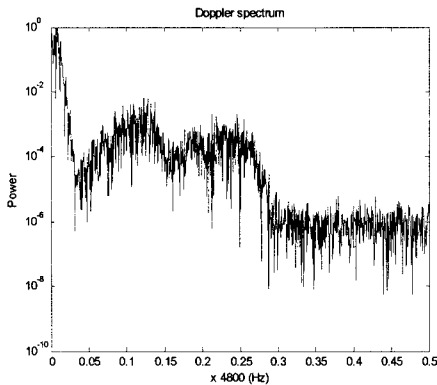


그림 1. 클러터 및 기상신호가 포함된 도플러 스펙트럼

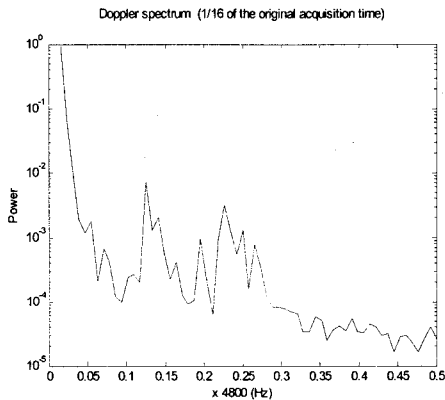


그림 2. 데이터 획득시간이 원래의 1/16 인 경우에서의 클러터 및 기상신호가 포함된 FFT 도플러 스펙트럼 추정

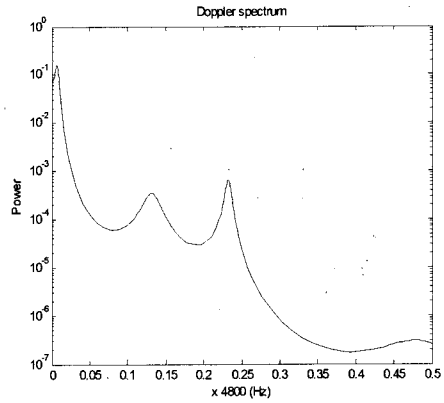


그림 3. 획득시간이 원래의 1/16 인 경우에서의 AR 도플러 스펙트럼 추정

그림 4는 같은 환경 및 조건에서 두 번째로 모의 발생 시킨 도플러 스펙트럼을 나타내고 있다. 클러터 및 노이즈, 기상신호의 피크 점들을 볼 수 있다. 그림 5 에서는 그림 4와 같이 표시되는 도플러 신호의 시간영역에서의 데이터 획득시간을 1/32 로 줄인 후 기존의 FFT 스펙트럼 추정을 이용하여 그 결과를 표시하였다. 따라서 데이터 획득시간이 현저히 감소함에 따라 해상도가 많이 떨어져서 기상신호의 침두치 점들을 판별하기가 어려워진다는 것을 알 수 있다. 그림 6의 경우는 1/32 로 줄어든 즉 64개의 시간영역 데이터 값만을 이용하여 AR 스펙트럼 추정 기법을 적용한 결과이다. 그림 6에서 보는 것처럼 1/32 로 대폭 줄어든 데이터 획득시간을 갖는 경우임에도 불구하고 파라미터 추정방식을 통하여 클러터 및 기상신호의 침두치 점들이 비교적 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

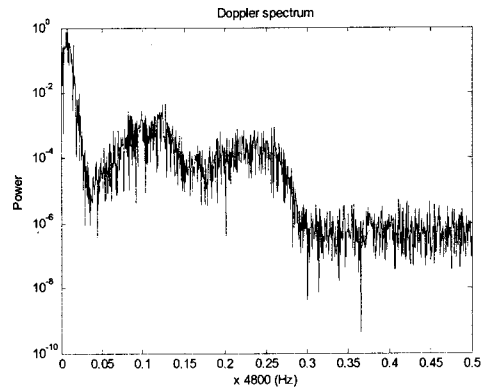


그림 4. 클러터 및 기상신호가 포함된 두 번째 도플러 스펙트럼

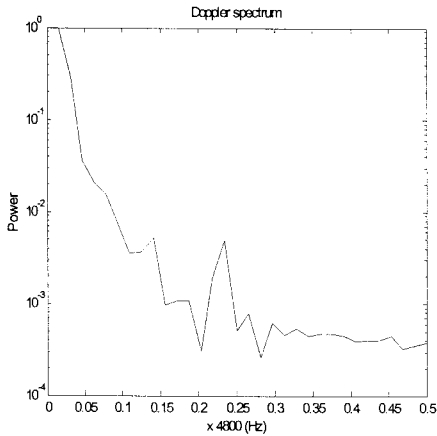


그림 5. 데이터 획득시간을 1/32 로 줄인 경우의 FFT 스펙트럼 추정

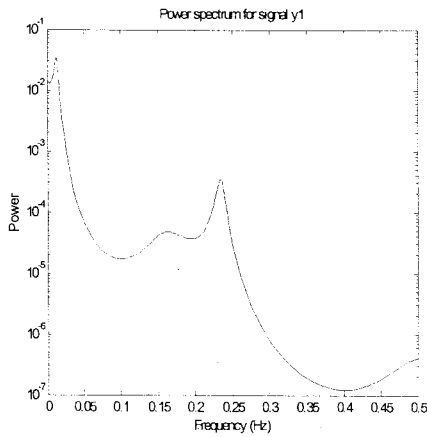


그림 6. 데이터 획득시간을 1/32 로 줄인 경우의 AR 도플러 스펙트럼 추정

IV. 결 론

레이더 시스템에서 안테나의 목표물에 대한 dwell time 이 줄어드는 경우 기존의 FFT 방식에 의한 스펙트럼 추정을 적용할 경우 심각한 해상도 문제로 인하여 시스템의 성능이 현저히 나빠질 수 있다. 그러나 결과 그림들에서 보는 것처럼 AR 스펙트럼 추정기법을 사용하면 기존의 Doppler filter bank 방식에 비하여 상대적으로 훨씬 더 나은 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. AR 스펙트럼 추정방식의 경우 연산량이 다소 증가할 수 있으나 실제로 추정하는 스펙트럼의 특징을 고려하여 볼 때 높은 차수의 AR 스펙트럼 추정은 불필요뿐만 아니라 오히려 정확도를 떨어트릴 수 있다. 따라서 비교적 낮은 차수 즉 6 차 이하 정도의 AR 스펙트럼 추정 방식인 경우

그 연산량의 증가정도는 크지 않다. 특히 신호처리용 하드웨어의 성능이 날로 개선되고 있어 약간의 연산량 증가는 시스템 구현에 큰 장애가 되지 않는다.

그러므로 항공기용 레이더나 고속 이동 물체를 탐지하는 경우 등, 즉 안테나의 dwell time 이 짧아져 데이터를 획득할 수 있는 시간이 제한되는 시스템에서 높은 도플러 스펙트럼 해상도를 얻기 위해서는 기존의 방식보다는 파라미터 추정을 통한 AR 스펙트럼 추정방식을 적용하는 것이 더 좋은 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] P. Mahapatra, *Aviation weather surveillance systems*, The Institution of Electrical Engineers and The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [6] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 2001.