

## 저고도 기상 레이다에서의 도플러 스펙트럼 추정

이종길\*

### Doppler Spectrum Estimation in a Low Elevation Weather Radar

Jonggil Lee\*

\*Professor, Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012 Korea

#### 요약

기상 레이다 시스템은 일반적으로 강우 및 풍속 등과 관련된 기상 현상을 나타낸다. 이러한 시스템은 대부분의 경우 장거리용이며 비교적 높은 고도를 지향하고 있어 넓은 지역에서의 전체적인 기상 현상을 파악하는 목적으로는 매우 유용하다. 그러나 최근에 와서 국지적인 폭우나 또는 돌풍 등에 의한 재난현상이 빈번히 발생되고 있기 때문에 이러한 기상이변 현상의 탐지가 매우 중요한 문제이다. 국지적인 기상 이변 탐지목적의 기상 레이다는 저고도 탐지 및 급변하는 국지적인 기상상황의 빠른 탐지가 필요하다. 이러한 운용환경에서는 상대적으로 지표면 클러터가 큰 영향을 미치며 안테나의 신호 획득시간도 매우 짧아진다. 따라서 기존의 도플러 스펙트럼 추정방법에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 AR(autoregressive) 도플러 스펙트럼 추정 방법들을 적용하고 결과들을 고찰하였다. 적용된 방법들을 이용하면 기존의 FFT(Fast Fourier Transform) 방법에 비하여 향상된 도플러 스펙트럼 추정이 가능함을 보였다.

#### ABSTRACT

A weather radar system generally shows the weather phenomena related with rainfall and wind velocity. These systems are usually very helpful to monitor the relatively high altitude weather situation for the wide and long range area. However, since the weather hazards due to the strong hail and heavy rainfall occurring locally are observed frequently in recent days, it is important to detect these weather phenomena. For this purpose, it is necessary to detect the fast varying low altitude weather conditions. In this environment, the effect of surface clutter is more evident and the antenna dwell time is much shorter. Therefore, the conventional Doppler spectrum estimation method may cause serious problems. In this paper, the AR(autoregressive) Doppler spectrum estimation methods were applied to solve these problems and the results were analyzed. Applied methods show that improved Doppler spectra can be obtained comparing with the conventional FFT(Fast Fourier Transform) method.

**키워드** : 기상 레이다, 저고도 탐지, 도플러 스펙트럼, 국지적 기상변화

**Keywords** : Weather radar, Detection of low elevation, Doppler spectra, Local weather variation

Received 8 August 2020, Revised 15 August 2020, Accepted 16 August 2020

\*Corresponding Author Jonggil Lee(E-mail:jnglee@inu.ac.kr, Tel:+82-32-835-8286)

Professor, Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.11.1492>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

기상 레이더 시스템은 민수용으로 지금까지 다양한 목적으로 널리 활용되어 왔다. 현재 설치되어 운용되는 대부분의 기상 레이더는 중장거리용으로 매우 넓은 영역에 걸친 기상 상황을 파악하는데 유용하게 활용되고 있다. 즉 이러한 기상 레이더들은 비교적 높은 고도와 넓은 영역에서 발생하는 전반적인 기상 상태를 파악하는 목적으로는 적합하다고 할 수 있다. 그러나 최근에 와서는 국지적인 기상 이변 현상이 빈번히 관찰되고 있고 이에 따른 기상 위협이나 기상재해가 심각한 문제로 대두되고 있다[1]. 문제시 되고 있는 이러한 국지적인 기상급변 현상을 탐지하기 위해서는 지역별로 단거리이지만 상대적으로 저고도 및 빠른 기상변화의 탐지가 가능한 소형 기상 레이더 망의 구축에 대한 필요성이 지속적으로 제기되고 있다[2-4]. 따라서 이러한 목적의 기상 레이더 시스템은 탐지 영역의 공백을 메우기 위하여 저고도 탐지가 가능하여야 할뿐만 아니라 빠른 기상 변화현상을 실시간으로 파악하고 기상 정보를 추출하여 재난예보나 위험사항들을 사전에 알려줄 수 있어야 한다.

그러므로 기존의 기상 레이더와는 달리 이러한 국지적 기상 레이더 시스템은 빠른 안테나의 회전을 통한 기상 급변 자료의 실시간 획득 과 저고도 기상 현상의 탐지가 매우 중요하다. 따라서 저고도 영역의 탐지 및 빠른 안테나의 회전을 통한 기상급변 영역에 대한 기상 레이더 자료의 실시간 자료 갱신이 필수적으로 요구된다. 그러나 이러한 조건을 만족하기 위해서는 빠른 안테나의 회전 또는 전자적인 스캔 및 안테나 빔의 저고도 지향이 요구된다. 이러한 운용상황은 강력한 클러터의 잔존 가능성을 키울 뿐만 아니라 수신 안테나에서의 기상 신호의 획득시간을 현저히 단축시킨다[5]. 따라서 기상 자료 및 정보 추출을 위하여 기존에 활용되고 있는 기상 신호의 도플러 스펙트럼 추정 방법에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 즉, 기존의 FFT(Fast Fourier Transform) 방법을 적용할 경우에는 저고도 영역에서 크게 발생하는 강력한 클러터의 잔존으로 인하여 도플러 스펙트럼 추정이 심각하게 왜곡될 수 있다. 또한 기상신호에서의 짧아진 획득시간은 관련 기상 도플러 스펙트럼에서의 해상도를 현저히 열화 시키게 된다.

이러한 문제점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 AR 스펙트럼 추정 방식을 이용한 기상 스펙트럼 추정

방법을 도입, 적용하였으며 그 결과들을 비교하고 분석하였다.

## II. 기상 도플러 스펙트럼 추정

기상 레이더에서는 일반적으로 강우정도, 풍속 및 대기교란(turbulence) 정도에 관한 정보를 추출하기 위하여 수신 기상신호 전력의 강도, 도플러 주파수, 그리고 도플러 스펙트럼의 분산을 추정하게 된다. 이러한 기상 정보들은 수신 기상신호로부터 전체적인 도플러 스펙트럼 추정을 하지 않더라도 펄스 페어 추정이라 불리는 방법을 적용하여 비교적 간단하게 계산할 수 있다[6]. 이러한 방법은 알고리즘이 간단하여 연산 량이 작기 때문에 아직도 많은 기상 레이더에서 활용되고 있는 방법이다. 그러나 고정 및 이동 클러터에 의하여 왜곡되거나 잘못된 기상 신호의 선별적인 제거가 매우 어렵다. 따라서 최근에 활용되고 있는 대부분의 기상 레이더에서는 FFT 알고리즘을 적용하여 전체적인 도플러 스펙트럼을 추정하는 방식을 채택하고 있다. 즉, 수신 기상신호의 도플러 전력 스펙트럼,  $S(f)$ 를 추정한 후 0번째 첫 번째 그리고 두 번째 모멘트를 구하는 다음과 같은 방식으로 수신 기상신호의 강도, 풍속, 그리고 대기 교란 정도에 관련된 정보들을 추출한다.

$$\hat{P} = \sum_{i=1}^N \hat{s}(f_i), \quad \hat{f}_d = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \hat{s}(f_i)}{\hat{s}(f_i)} \quad (1)$$

$$\hat{w}_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \hat{f}_d)^2 \hat{s}(f_i)}{\sum_{i=1}^N \hat{s}(f_i)} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서의  $\hat{f}_d$ 는 도플러 주파수 추정치를  $\hat{w}_d^2$ 는 기상 도플러 스펙트럼의 분산을 나타낸다. 이러한 추정치들은 상대적으로 훨씬 더 간단한 펄스 페어 방법에 의하여도 계산될 수 있으나 도플러 스펙트럼 추정을 하지 않는 방식이기 때문에 오염되거나 왜곡된 기상 도플러 신호의 선별적인 제거나 구별이 매우 어렵다. 따라서 최근의 기상 레이더들은 도플러 스펙트럼 추정을 한 후에 이러한 기상 정보들을 추출하고 있다. 그러므로 기상 레

이다에서의 도플러 스펙트럼 추정이 정확하게 이루어져야만 신뢰성 있는 기상 자료의 추출이 가능하다. 그런데 이러한 FFT 방법에 의한 스펙트럼 추정은 비교적 간단하고 효율적이라 많이 사용되고 있지만 스펙트럼 해상도 문제나 부엽에 의한 왜곡 등이 발생할 수 있다. 특히 국지적인 기상 위험 탐지를 목적으로 하는 경우 저고도 탐지가 가능하면서도 급변하는 기상 상황의 실시간 추적이 가능하여야 한다. 따라서 이러한 운용환경에서는 기존의 스펙트럼 추정 방식은 해상도 문제나 강력한 클러터의 부엽 발생 등으로 인하여 도플러 스펙트럼 추정에 심각한 문제가 나타날 수 있다. 이러한 문제들은 관련되어 얻어지는 기상 정보의 신뢰성에 심각한 손상을 초래하게 된다. 그러므로 이러한 국지적인 기상 이변 현상 탐지의 목적에 맞도록 열악한 레이다 운용환경에서도 기상 도플러 스펙트럼 추정의 정확도를 높일 수 있는 방법을 선택하여야 한다. 본 논문에서는 파라미터 추정 방식중의 하나인 autoregressive(AR) 스펙트럼 추정 방법을 적용하여 스펙트럼 추정의 정확도를 비교하였다. p차 modified covariance AR 스펙트럼 추정 방법을 적용할 경우 N 개의 복소 데이터에서의 곱 및 합의 연산량은  $Np+6p^2$ 이다. 여기서 차수 p의 값은 적용 목적을 고려하면 3~5 정도의 범위라고 할 수 있다. 따라서 요구되는 연산량을 그다지 크게 증가시키지 않으면서도 기존 FFT 방식의 스펙트럼 추정에서 나타나는 문제점들을 극복할 수 있을 것으로 예상된다.

### III. AR 스펙트럼 추정

AR 스펙트럼 추정 방식에는 Burg 방법 외에 몇 가지 종류가 있으나 본 논문에서는 연산량이 크게 증가하지 않으면서도 스펙트럼 추정 편이나 스펙트럼 분지 현상 같은 문제가 거의 일어나지 않는 modified covariance 방법을 적용하였다[7-8].

수신 단에서 샘플링 되어 얻어진 N개의 I(inphase) 및 Q(quadrature) 기상 신호 데이터, Z에 대한 p차 AR 파라미터 추정에 의한 순방향 및 역방향 예측 오차를 표시하면 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e_p^f(n) = z(n) + \sum_{k=1}^p c_p(k)z(n-k) \quad (3)$$

$$e_p^b(n) = z(n-p) + \sum_{k=1}^p c_p^*(k)z(n-p+k) \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 f는 순방향, b는 역방향을 표시하며 stationary random process 에서의 역방향 오차의 경우는 순방향 예측 계수의 complex conjugate 로 표시할 수 있다. 따라서 (N-p) 개의 순방향 및 역방향 오차는 다음과 같이 벡터 및 행렬을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_p^f \\ e_p^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_p \\ T_p^* K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ c_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 K는  $(p+1) \times (p+1)$  반사(reflection) 행렬이다. 또한  $p \times 1$  벡터  $c_p$ 와  $(N-p) \times (p+1)$  데이터 행렬,  $T_p$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$c_p = \begin{bmatrix} c_p(1) \\ \vdots \\ c_p(p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_p = \begin{bmatrix} z(p+1) & \cdots & z(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z(N-p) & \cdots & z(p+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z(N) & \cdots & z(N-p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

따라서 순방향 및 역방향 예측 오차제곱들의 평균을 최소화하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$R_p c_p = \begin{bmatrix} 2\epsilon_p \\ \mathbf{0}_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서  $\mathbf{0}_p$ 는 p개의 행이 모두 0인 벡터를 의미한다. 또한 순방향 및 역방향 예측 오차제곱들의 평균을 표시하는  $\epsilon_p$  및 행렬  $R_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_p = \frac{1}{2} \left[ \sum_{n=p+1}^N |e_p^f(n)|^2 + \sum_{n=p+1}^N |e_p^b(n)|^2 \right] \quad (9)$$

$$R_p = \begin{bmatrix} T_p \\ T_p^* K \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} T_p \\ T_p^* K \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)에서 H는 Hermitian 연산자를 의미한다. 식 (8)의 행렬  $R_p$ 의 centrosymmetry 특성을 이용하면 스펙트럼 추정을 위한 효율적인 연산이 가능하다. 이러한 방법으로 구한 스펙트럼 추정은 Burg 방법에 비하여 스펙

트럼의 왜곡현상이 덜 나타나는 특징을 보인다. 따라서 본 논문에서는 앞에서 설명한 바와 같이 비교적 연산량이 적으면서도 정확한 도플러 스펙트럼 추정이 가능한 modified covariance 방법을 적용하여 스펙트럼 추정 결과들을 얻었다. 다음 장에서는 저고도 기상레이더의 모의 데이터 구현 방법에 대하여 간략하게 설명하였으며 이러한 기상 데이터들을 이용하여 구한 스펙트럼 추정 결과들을 기존의 FFT 스펙트럼 추정 결과들과 비교하고 분석하였다.

#### IV. 결과 분석 및 고찰

기존의 스펙트럼 추정 방법과의 비교 및 분석을 위해서는 다양한 기상 신호의 모의구현이 필요하다. 따라서 이러한 목적으로 본 논문에서는 범용 도플러 전력 스펙트럼 모델을 사용하였다[9]. 즉 0 부근의 도플러 주파수에서 나타나는 해수면 또는 지표면 클러터를 포함하는 저고도 기상 도플러 전력 스펙트럼은 많은 경우에서 다음과 같은 가우시안 스펙트럼 형태의 합으로 모델링 되어질 수 있다.

$$P(f) = \sum_{i=0}^{L-1} a_i S_i(f) + N_0 \quad (11)$$

$$\text{where } S_i(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} w_i} \exp\left(-\frac{(f-f_i)^2}{2w_i^2}\right)$$

식 (11)에서  $a_i$ 는 각각의 중심 도플러 주파수에 따른 가우시안 스펙트럼 전력의 크기를 나타내며  $N_0$ 는 시스템의 배경잡음 전력밀도를 나타낸다. 따라서 이러한 가우시안 스펙트럼 모델을 사용하여 다양한 기상환경에서의 신호 및 클러터들을 구현할 수 있다. 배경 잡음전력 밀도, 신호 및 클러터 전력의 비를 적절하게 조정함으로써 실제와 유사한 시간 영역의 I, Q 데이터를 IFFT를 이용하여 간단하게 모의구현 할 수 있다. 여기에서는 전형적으로 나타나는 클러터와 기상 신호등을 고려하여 식 (11)에서의 L 값은 2 이하로 하였으며 SNR(signal to noise ratio), SCR(signal to clutter ratio)에 따라 관련  $a_i$ 나  $N_0$  파라미터 값들을 조정하여 시간 영역의 I, Q 데이터들을 모의 구현하였다. 그림 1은 CNR(clutter to noise ratio)이 40dB 인 경우로 고정 클러터, 즉 도플러 중심 주파수가 0으로 나타나는 강력한 지표면 클러터

등이 존재하는 경우이다. 일반적인 기상 레이더에서는 충분한 신호획득 시간이 보장되므로 강력한 고정 클러터가 포함되어 있는 경우라도 도플러 스펙트럼 추정상의 오차나 왜곡등과 관련된 문제는 나타나지 않는다. 그러나 급변하는 기상상황, 즉 저고도 기상 현상을 신속하게 탐지하고 추적, 갱신하기 위해서는 기상 레이더 안테나의 빠른 회전이 필수적이며 이러한 상황에서는 기상 신호 획득을 위한 충분한 시간을 확보하기 어렵다. 따라서 이러한 경우 해상도 문제 때문에 기상 도플러 스펙트럼 추정상의 심한 왜곡 현상이 발생할 수 있다. 그림 2에서는 그림 1과 동일한 기상 조건에 따른 도플러 스펙트럼 추정 결과를 보여주고 있으나 빠른 기상 정보의 갱신이 필요한 경우로 기상 신호 획득시간의 충분한 확보가 어렵기 때문에 기존의 FFT 방식의 기상 도플러 스펙트럼 추정에 심각한 편향이나 오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 환경, 즉 급변하는 저고도 기상현상의 탐지를 위하여 앞에서 언급한 AR 스펙트럼 추정 방법을 이용하여 구한 도플러 스펙트럼 추정 결과를 그림 3에 나타내었다. 결과는 그림 2와 동일한 시간 영역의 I, Q 데이터를 이용하였다.

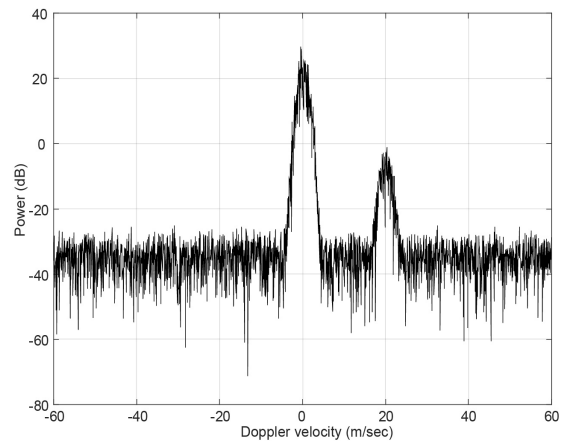


Fig. 1 The weather Doppler spectrum with CNR of 40dB and SNR of 10 dB

그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 AR 스펙트럼 추정을 이용하면 매우 제한된 획득 데이터로도 비교적 정확한 스펙트럼 추정 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 적용된 스펙트럼 추정 결과들의 향상 정도를 기존의 FFT 스펙트럼 추정 결과들과 비교하고 분석하기 위하여 다양한 기상 상황 및 기상 레이

다 운용환경에 따른 조건들을 추가적으로 2가지 정도로 더 분류하여 모의 기상신호들을 발생 시켰다. 첫 번째는 지표면 등에 의한 중심 도플러 주파수가 0 인 클러터가 존재하지 않고 기상 신호만 존재하는 경우이다. 이러한 경우는 주로 하나의 침두치나 또는 두 개의 침두치를 형성하는 전형적인 기상 신호 도플러 스펙트럼이 될 것이다. 두 번째는 강력한 이동 클러터와 기상 신호가 동시에 존재하는 경우이다. 두 번째의 경우는 이동 중인 비행 물체 또는 조류 등이 탐지되는 경우라고 할 수 있다.

그림 4의 경우는 전형적인 기상 도플러 신호만 나타나는 경우를 보여주고 있다. 그러나 저고도 기상 레이다에서의 FFT 스펙트럼 추정은 그림 5에서 보는 것처럼 도플러 스펙트럼 추정에서의 해상도 저하 및 부엽으로 인하여 상당한 왜곡 및 오차가 발생하고 있음을 알 수

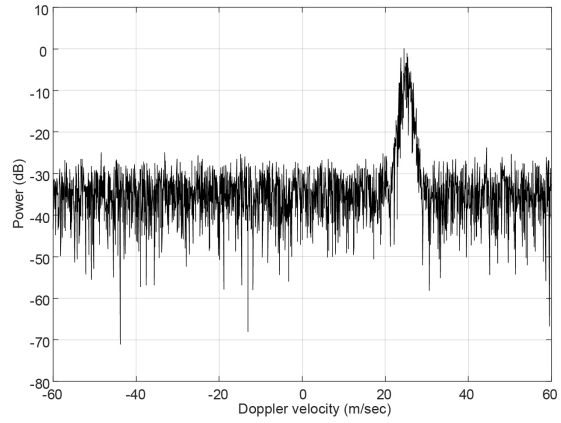


Fig. 4 The weather Doppler spectrum with the mean velocity of 25m/sec and SNR of 10dB

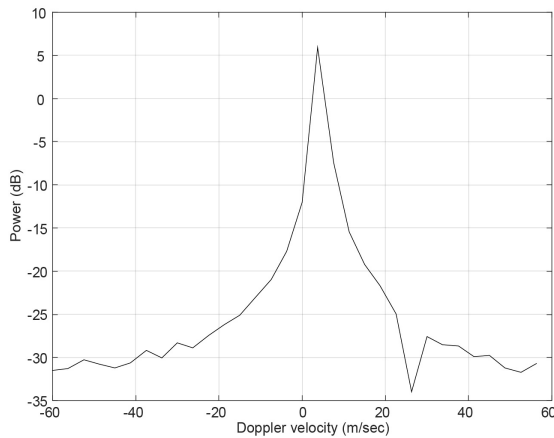


Fig. 2 The weather Doppler spectrum of Fig. 1 for the case of limited observation time

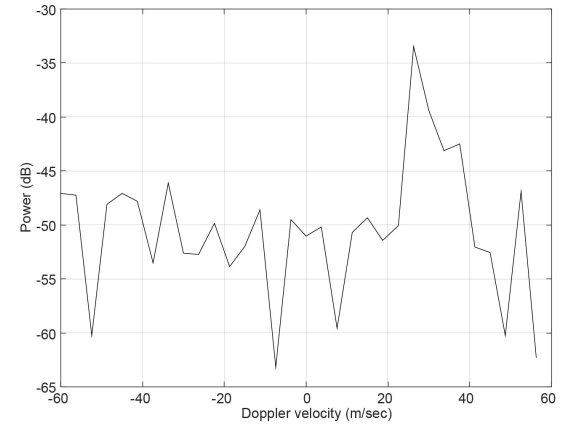


Fig. 5 The weather Doppler spectrum of Fig. 4 for the case of limited observation time

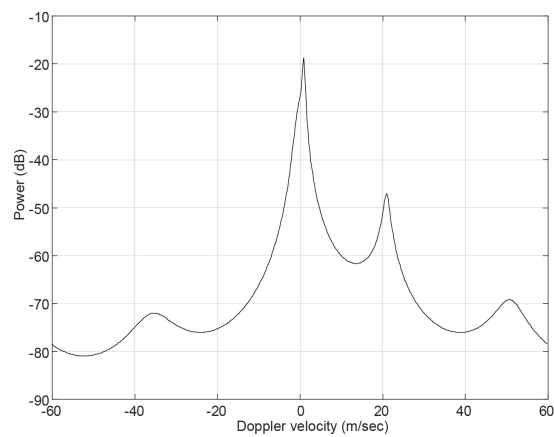


Fig. 3 The weather Doppler spectrum of Fig. 2 using AR spectrum estimation for the case of limited observation time

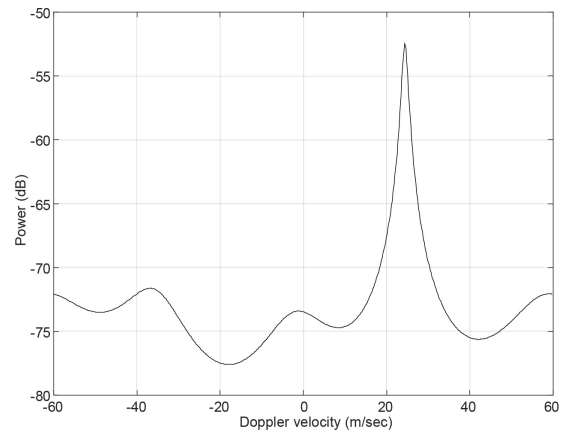


Fig. 6 The weather Doppler spectrum of Fig. 5 using AR spectrum estimation for the case of limited observation time

있다. 그림 6은 그림 5와 동일한 시간 영역상의 I, Q 데이터를 이용하여 modified covariance AR 스펙트럼 추정을 통하여 얻은 결과이다. 그림 6의 결과에서 보는 것처럼 제한된 획득시간으로 인한 문제점들이 거의 발생하지 않고 있다.

이제 이동 클러터와 기상신호가 동시에 존재하는 경우에서의 도플러 스펙트럼 추정 결과들을 비교하여 보았다. 이동 클러터는 기상신호에 비하여 상대적으로 좁은 도플러 스펙트럼 폭을 가지므로 클러터 전력 값들이 비교적 좁은 도플러 주파수 영역에 집중되어 나타난다.

그림 7은 이동 클러터와 기상신호가 도플러 주파수 영역에서 충분히 이격되어 나타나는 경우의 모의 도플러 스펙트럼 구현 결과이다. 이러한 경우에도 제한된 획득 시간으로 인하여 기존의 FFT 스펙트럼은 그림 8에서 보는 것처럼 방법상의 특징적인 제약들 때문에 정확한 추정이 제대로 이루어지지 않고 있음을 확인할 수 있다. 반면 그림 9의 결과를 살펴보면 그림 8과 동일한 시간 영역의 I, Q 데이터를 이용하였지만 AR 스펙트럼 추정을 한 경우에는 거의 정확한 스펙트럼 추정이 가능함을 확인할 수 있다.

이제 이동 클러터와 기상신호 전력이 인접하여 나타나고 두 개의 전력 값의 차이가 매우 큰 경우를 고려하여 보았다. 그림 10에 표시한 모의 도플러 스펙트럼은 이동 클러터와 기상신호전력의 차이가 20dB 인 경우로 이동 클러터 전력이 압도적으로 높게 나타나는 경우이다. 이와 같이 상대적으로 기상신호의 전력이 매우 약하게 나타나는 경우에는 제한된 신호획득 시간으로 인한 문제점 때문에 그림 11에서 확인할 수 있는 것처럼 기상신호전력을 이동 클러터와 구별해내는 것이 거의 불가능하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 경우에도 본 논문에서 언급한 AR 스펙트럼 추정 방식을 적용하는 경우에는 그림 12에서 보는 것처럼 두 개의 첨두치를 갖는 기상신호전력과 이동 클러터가 분리되어 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 상대적으로 기상신호 전력이 매우 약하게 나타나는 경우일 뿐만 아니라 강력한 클러터가 비교적 인접한 상황이라 할지라도 AR 스펙트럼 추정 방식을 사용하면 두 개의 도플러 전력에 대한 분리가 가능하다는 것을 알 수 있다. 즉 기존 방식에 의한 그림 11의 경우와 비교하면 상대적으로 더 정확한 도플러 스펙트럼 추정 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

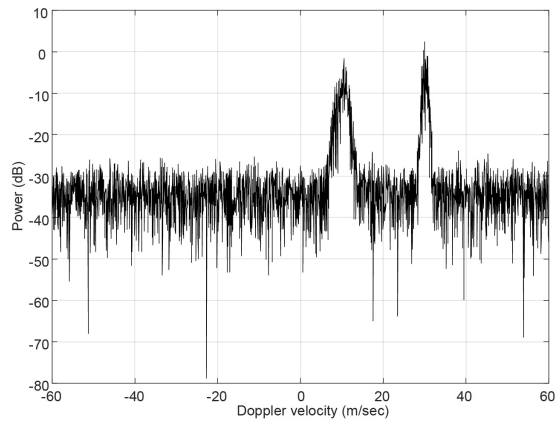


Fig. 7 The weather Doppler spectrum including the moving clutter with CNR of 10dB and SNR of 10dB

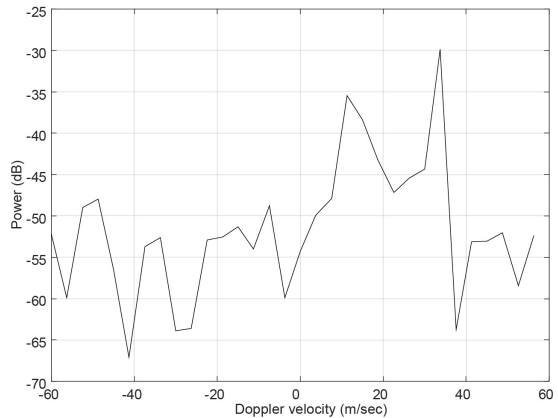


Fig. 8 The weather Doppler spectrum of Fig. 7 for the case of limited observation time

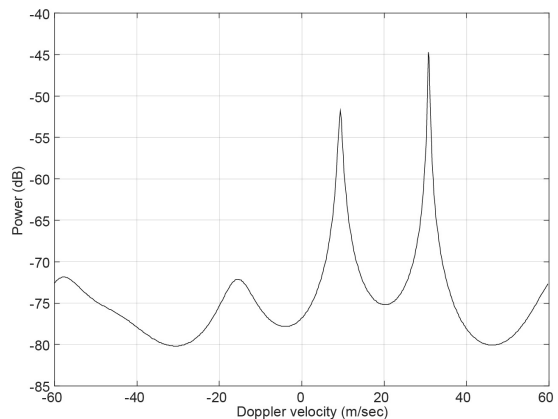


Fig. 9 The weather Doppler spectrum of Fig. 8 using AR spectrum estimation for the case of limited observation time

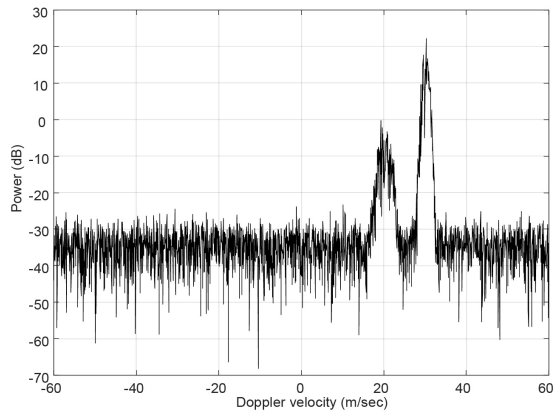


Fig. 10 The weather Doppler spectrum including the moving clutter with CNR of 30dB and SNR of 10dB

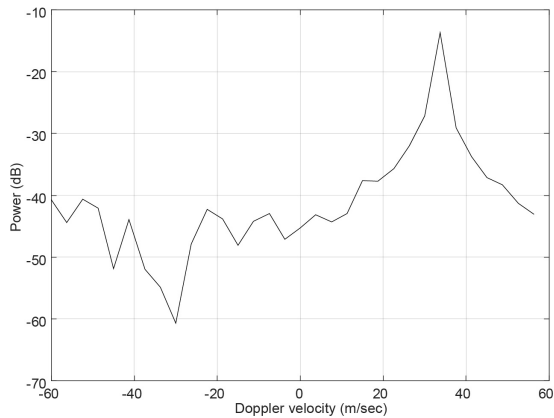


Fig. 11 The weather Doppler spectrum of Fig. 10 for the case of limited observation time

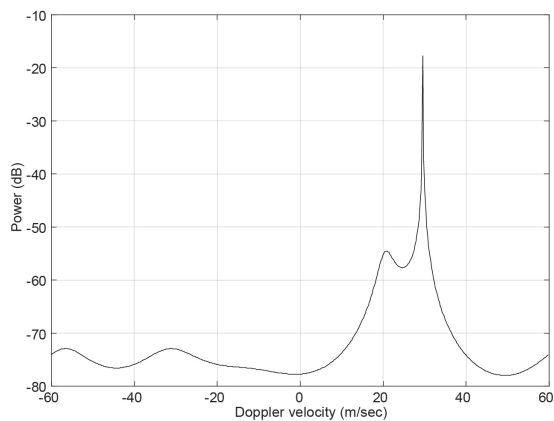


Fig. 12 The weather Doppler spectrum of Fig. 11 using AR spectrum estimation for the case of limited observation time

지금까지 비교, 분석한 다양한 스펙트럼 추정결과들을 살펴보면 기존의 FFT 스펙트럼 추정 방법의 신뢰성 및 정확도에 심각한 문제가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 기상 도플러 스펙트럼 추정에서의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위해서는 modified covariance 방식을 이용한 AR 스펙트럼 추정 방법을 적용하는 것이 필요하다. 이러한 방법은 앞에서 언급한 바와 같이 추가적인 연산량 증가를 최소화하면서도 정확한 스펙트럼 추정을 가능하게 할 것이다.

## V. 결론

저고도 기상 레이다는 매우 빠른 기상자료의 갱신을 필요로 하며 이와 같은 목적 및 운용환경에서는 필연적으로 기상 신호의 데이터 획득시간이 제한되어질 수밖에 없다. 이로 인한 기존의 FFT 스펙트럼 추정상의 문제점들을 분석하기 위하여 운용환경 및 기상상황에 따라 기존의 스펙트럼 추정 결과들과 modified covariance 방식의 AR 스펙트럼 추정 결과들을 비교하고 고찰하였다.

결과 분석에서 확인할 수 있는 것처럼 본 논문에서 적용한 AR 스펙트럼 추정 방법을 이용한다면 모든 경우에서 기존의 방법보다 더 신뢰성 있는 도플러 스펙트럼 추정이 가능함을 보였다. 향후 저고도 기상 레이다에서의 다양한 실측 자료들이 확보되면 추가적인 검증 및 성능 비교에 대한 연구를 별도로 진행할 예정이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Incheon National University Research Grant in 2019.

## REFERENCES

- [ 1 ] V. Chandrasekar, H. Chen, and B. Philips, "DFW urban radar network observations of floods, tornadoes and hail storms," in *Proceedings of 2018 IEEE Radar Conference*, Oklahoma City: OK, pp. 0765-0770, 2018.
- [ 2 ] B. Philips, T. Ryan, V. Chandrasekar, E. Lyons, T. Bradshaw, M. Fox, F. Junyent, and A. Bajaj, "Tracking

- tornados down streets: Using casa radars in real time severe weather warning operations in north central texas,” in *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Fort Worth: TX, pp. 5973-5976, 2017.
- [ 3 ] Q. Cao, M. Knight, M. Frech, and T. Mammen, “Measurement uncertainty and system assessment of weather radar network in Germany,” in *Proceedings of 2016 IEEE Radar Conference*, Philadelphia: PA, pp. 1-5, 2016.
- [ 4 ] J. Li, X. Wang, T. Wang, J. Liu, H. Gao, and V. Chandrasekar, “Circulation retrieval of wake vortex under rainy condition with a vertically pointing radar,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 4, pp. 1893-1906, Aug. 2017.
- [ 5 ] C. D. Curtis, M. Yeary, and J. L. Lake, “Adaptive nullforming to mitigate ground clutter on the national weather radar testbed phased array radar,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 3, pp. 1282-1291, Mar. 2016.
- [ 6 ] D. S. Zrnic, “Estimation of spectral moments for weather echoes,” *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 17, no. 4, pp. 113-128, Oct. 1979.
- [ 7 ] S. Haykin and S. Kesler, “The complex form of the maximum entropy method for spectral estimation,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, no. 5, pp. 822-823, May. 1976.
- [ 8 ] T. Thorvaldsen, “A comparison of the least squares method and the Burg method for autoregressive spectral analysis,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, no. 4, pp. 675-679, Jul. 1981.
- [ 9 ] J. Lee, “The efficient clutter simulation method for airborne radars,” *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1123-1130, Sep. 2019.



이종길(Jonggil Lee)

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

1991년 1월~1993년 2월 삼성전자 특수연구소

1993년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※관심분야: 무선통신, 레이더 신호처리, 레이더 시스템