
비대칭 도플러 스펙트럼 기상신호에서의 풍속 추정에 관한 연구

이종길*

A Study on the Estimation of Wind Velocity in Asymmetric Doppler Spectra of Weather Signals

Jonggil Lee*

이 논문은 인천대학교 2008년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

기상현상을 분석하기 위한 원격탐지 센서의 하나인 기상 레이더에서는 비, 구름 및 먼지 입자 등에 의하여 산란되는 전자파 신호를 수신하여 분석함으로써 여러 가지 특징적인 기상정보를 추출하게 된다. 이와 같은 기상 레이더에서 추출하는 정보중의 하나인 풍속은 돌풍 등 국지적인 기상재해를 예방하기 위한 매우 유용한 자료이다. 이러한 풍속추정은 일반적으로 펄스페어 방법을 이용하여 이루어지게 된다. 펄스페어 추정방식은 연산 양 측면에서 매우 효율적이면서도 신뢰성이 우수한 기법으로 인정되고 있다. 그러나 기상신호의 도플러 스펙트럼이 비대칭적인 가우시안 형태를 보이는 경우나 스펙트럼의 침투치가 두개 이상 나타나는 멀티 피크 도플러 신호인 경우 이러한 기존의 방법으로는 정확한 정보를 추출하는데 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 멀티피크 현상을 포함한 비대칭 기상 스펙트럼에서의 펄스페어 추정방식의 문제점을 분석하고 개선방법을 제안하였다.

ABSTRACT

A weather radar as one of the remote sensing devices to analyze the weather phenomena receives the return echoes which consist of scattered electromagnetic wave signals from rain, cloud and dust particles, etc. These received Doppler weather spectra are analyzed to extract the various characteristic weather information. The mean wind velocity is one of the important weather parameters which can be obtained by a weather radar and it may be useful in the prevention of weather hazards occurred by the abrupt shift of wind in small geographical scales such as microbursts. It is usually estimated by pulse pair method which is considered to be reliable and very efficient in the computational requirement. However, there are some problems in the accurate estimation of the mean velocity if Doppler spectra of weather signals appear to be asymmetric gaussian or multi-peak spectra. Therefore, in this paper, the problems in the mean estimation of asymmetric Doppler spectra are analyzed and the improved method is suggested.

키워드

비대칭 도플러 스펙트럼, 기상 레이더, 펄스페어, 풍속 추정

I. 연구 목적

기상 레이다는 기상현상을 탐지하기 위한 원격센서로서 일반적인 기상 관측용 시스템으로 활용될 뿐만 아니라 공항, 항공기 등에 설치되어 기상급변에 의한 재난을 예방하는 목적으로도 이용되어지고 있다. 특히 최근에는 국지적으로 기상상태가 매우 급변하는 경우가 자주 발생하고 있기 때문에 기상 레이다를 이용한 정확한 실시간 기상상태 정보의 확보가 매우 중요하다. 기상 레이다의 관찰방향 및 거리영역에 따른 고해상도 풍속추정은 국지적이면서도 순간적으로 발생할 수 있는 돌풍 및 난기류 등에 의한 헬기 및 항공기 사고를 예방하는데 필요한 핵심적인 자료를 제공하여 준다 [1][2][10]. 따라서 기상 레이다 신호로부터 추출되는 풍속 추정치의 정확도 및 신뢰성을 높이는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 기상레이다에서의 풍속추정은 펄스페어(pulse pair) 방법을 채택하고 있다. 펄스페어 추정방법은 연산 양 측면에서 매우 효율적이면서도 비교적 정확하고 신뢰성 있는 기법으로 잘 알려져 있다[3][4]. 그러나 이와 같이 하여 얻은 펄스페어 추정치는 기상신호의 도플러 전력 스펙트럼이 대칭적인 가우시안 형태로 표시될 수 있다는 것을 가정하고 있다. 그러나 경우에 따라서는 25% 정도의 비율로 비대칭적인 도플러 스펙트럼을 보이는 상황도 자주 발생하는 것으로 발표되고 있다[5]. 또한 기상상태에 따라서는 기상 도플러 스펙트럼의 피크 점들이 여러 개 나타날 수 있다. 이러한 비대칭적인 스펙트럼이나 여러 개의 첨두치를 갖는 기상신호의 경우에는 펄스페어 추정치가 부정확하거나 무의미한 값을 표시할 수 있다. 따라서 멀티피크 스펙트럼을 포함한 비대칭적인 가우시안 도플러 스펙트럼인 경우에는 일반적으로 널리 쓰이고 있는 펄스페어 추정방법에 대한 신뢰성 분석 및 재고찰을 필요로 한다. 그러므로 본 논문에서는 펄스페어 추정방법을 이용한 평균 도플러 주파수 추정, 즉 풍속추정에 대한 문제점을 분석하고 그 개선 방법을 제시하였다. 또한 기상 도플러 스펙트럼이 여러 개의 피크 값을 갖는 경우에는 도플러 스펙트럼의 평균치보다는 피크 주파수를 표시하여 주는 것이 풍속변화에 관한 정보를 더 잘 표시할 수 있다.

따라서 이러한 기상 도플러반사신호의 피크 주파수를 추정하기 위하여 하모닉 신호의 주파수 추정에 적합한 것으로 알려진 고유벡터를 이용한 추정방법을 적용하여 그 결과를 고찰하고 분석하였다.

II. 비대칭 기상신호에서의 펄스페어 추정

펄스페어 방식을 이용한 풍속 추정치인 도플러 평균 주파수는 펄스 쌍(pulse pair)의 열들로부터 기상신호의 자기상관 함수(autocorrelation function), $R(T_s)$ 의 추정을 통하여 얻어지게 된다. 즉,

$$\hat{R}(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} W^*(iT)W(iT + T_s) \tag{1}$$

여기서 M 은 수신되는 펄스열들에서의 펄스 쌍의 숫자를 나타내며 T 는 펄스 쌍들 간의 간격을 T_s 는 펄스 쌍 내에서의 간격을 의미한다. 또한 W^* 는 켈레복소수(complex conjugate)를 의미한다. 따라서 이러한 자기상관 함수 추정치를 이용하여 거리 방(range cell)에서의 평균 풍속을 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{V} = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \arg \hat{R}(T_s) \tag{2}$$

여기서 λ 는 기상 레이다에서 사용하는 전자파 파장을 나타낸다. 그런데 자기상관 함수 $R(T_s)$ 는 기상 도플러 전력 스펙트럼으로 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(T_s) = e^{j2\pi f_d T_s} \int_{-1/2T_s}^{1/2T_s} S(f) e^{j2\pi f T_s} df \tag{3}$$

여기서 $S(f)$ 는 도플러 주파수 0에서 첨두치를 갖는 기상신호 전력스펙트럼을 나타내며 f_d 는 도플러 주파수를 표시한다. 따라서 식(2)에서와 같은 평균 풍속 추정방법은 기상신호의 도플러 스펙트럼이 대칭이 되어 식(3)

에 표시되는 적분 항에서의 허수 부분(imaginary term)이 0 으로 표시된다는 것을 가정하고 있다. 따라서 대칭이 아닐 경우 다음과 같은 편향 오차(bias error)가 나타나게 된다.

$$\epsilon = \int_{-1/2T_s}^{1/2T_s} S(f) \sin(2\pi fT_s) df \quad (4)$$

펄스페어 평균풍속 추정방법은 T_s 에서의 복소 자기상관 함수 추정치를 이용하게 된다. 따라서 평균 도플러 주파수 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{f}_d = \frac{1}{2\pi} \lim_{T_s \rightarrow 0} \frac{d}{dT_s} \hat{\theta}(T_s) \equiv \frac{1}{2\pi} \frac{\hat{\theta}'(T_s)}{T_s} \quad (5)$$

편향오차가 없는 경우 정확한 평균 도플러 주파수를 구할 수 있을 것이다. 그러나 편향오차가 존재하는 비대칭적인 스펙트럼의 경우에는 큰 오차가 발생할 수 있는데 왜냐하면 추정된 위상함수는 T_s 에 대한 선형함수로 표시될 수 없기 때문이다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해서는 추정된 위상함수를 다음과 같이 n 차 다항식으로 표시하여야 할 것이다.

$$\hat{\theta}(T_s) \equiv \sum_{i=1}^{n, odd} a_i T_s^i \quad (6)$$

식 (6)에서 n 값이 홀수로 나타나는 이유는 푸리에 변환 관계를 갖는 전력 스펙트럼이 실수 값으로 표시되므로 복소 자기상관함수에서의 위상성분은 기함수로 나타나기 때문이다. 따라서 비대칭 도플러 스펙트럼에서의 평균 도플러 주파수 추정치는 다음과 같이 근사적으로 쓸 수 있다.

$$\hat{f}_d = \frac{1}{2\pi} \lim_{T_s \rightarrow 0} \frac{d}{dT_s} \hat{\theta}(T_s) \equiv \hat{a}_1 \quad (7)$$

그러므로 다항식에서 a_1 값의 추정치를 구하기 위해서는 첫 번째 지연 T_s 에서의 복소 자기상관 함수 값뿐만 아니라 n 번째 지연, 즉 nT_s 까지의 추정치가 요구된다.

즉, 다중 펄스페어 추정을 하여야 한다.

이제 적절한 비대칭 기상 도플러 신호모델을 설정하고 이러한 비대칭 모델을 이용하여 기존의 추정치와 앞에서 언급한 다항식 근사법을 이용한 다중 펄스페어 추정치의 값이 어떻게 나타나는지 살펴보자. 먼저 비대칭 기상 도플러 스펙트럼 모델은 다음과 같이 비대칭 정도(skewness)에 따라 대칭 및 비대칭성의 정규화된 가우시안 형태로 표현이 가능하도록 설정하였다.

$$S_n(f) = \frac{2}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi} w_1} \times \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2w_1^2}\right) \quad \text{for } f_d \leq 0$$

$$S_n(f) = \frac{2p}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi} w_2} \times \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2w_2^2}\right) \quad \text{for } f_d > 0 \quad (8)$$

여기서 표준편차로 표시되는 스펙트럼 폭의 비를 나타내는 $p=w_2/w_1$ 값은 비대칭성 정도를 나타내는 g 값을 결정하게 된다[6]. 즉,

$$g = \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \left[(1+p^{-2})^{-3/2} - (1+p^2)^{-3/2} \right] \quad (9)$$

따라서 식(8)과 같은 모델을 이용하여 w_1, w_2 및 파라미터 p 값, 즉 비대칭성 정도인 g 값을 변화시킴으로써 다양한 비대칭 모의 기상신호를 얻을 수 있다. 그림 1에 모의 구현한 비대칭 도플러 스펙트럼의 예를 나타내었다. 그런데 기존의 펄스페어 추정치 및 다중 펄스페어 추정치의 편향오차를 분석하기 위해서는 모의 구현한 기상신호에서 평균 도플러 주파수의 참 값이 어떻게 표시되는지 알아야 한다. 기상 레이더에서의 송신 펄스 반복 주기 T_s 가 충분히 작을 경우 참 값은 식 (8)의 정규화된 스펙트럼 모델을 이용하면 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$f_m = \int_{-1/2T_s}^{1/2T_s} f S_n(f) df$$

$$= \frac{2}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (pw_2 - w_1) + f_d \quad (10)$$

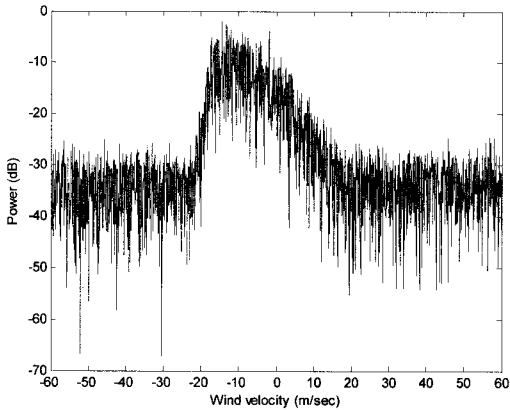


그림 1. 모의구현 된 비대칭 기상 도플러 신호 (SNR=15 dB, g=2.94, mode velocity=-15 m/sec)
 Fig. 1. A simulated asymmetric weather Doppler signal (SNR=15 dB, g=2.94, mode velocity=-15 m/sec)

III. 다중 침두치를 갖는 도플러 스펙트럼에서의 주파수 추정

국지적으로 풍속이 급격하게 변화하는 상황에서는 기상 도플러 스펙트럼이 비대칭이면서 여러 개의 침두치를 가질 수 있다. 이러한 경우에는 다음과 같이 정규화된 형태로 모델링 할 수 있다.

$$S_i = \sum_{i=1}^n A_i S_{ni}(f) \text{ and } \sum_{i=1}^n A_i = 1$$

where $S_{ni}(f) = S_n(f; f_{di}, p_i, w_{1i}, w_{2i})$ (11)

즉 식 (11)에서 보는 것과 같은 확장된 정규화 모델을 사용하면 여러 개의 침두치를 갖는 비대칭 또는 대칭형 스펙트럼을 표시할 수 있다. 그런데 이와 같은 다중 침두치를 갖는 스펙트럼에서의 평균치 추정은 무의미한 결과를 보이는 경우가 많다.

따라서 본 논문에서는 다중 침두치를 갖는 경우 침두치에서의 도플러 주파수, 즉 풍속을 추정하기 위하여 하모닉 신호에서의 고유 벡터를 이용한 스펙트럼 추정방식의 하나인 EV(eigenvector) 방법을 적용하였다[7]. 이 방법은 추정하고자 하는 신호의 특성이 부가성 백색잡음이 존재하는 환경에서의 복소 정현파 신호로 이루어진다는 것을 가정한다. 따라서 M 개의 복소 정현파 신호가 존재하는 경우라면 p 개의 고유벡터(eigenvectors) 및 M 개의 주 고유벡터(principal eigenvectors)를 갖는 자기상관 함수에서의 p-M 개의 잡음 부 공간 고유벡터들(noise subspace eigenvectors)은 정현파 신호벡터와 직교(orthogonal)한다. 그러므로 임의의 가중치 계수 α_k 를 포함하는 다음과 같은 식의 합은 0 이 된다. 즉

$$\sum_{k=M+1}^p \alpha_k |e^H(f) \mathbf{v}_k|^2 = 0 \quad (12)$$

여기에서 \mathbf{v} 는 잡음 부 공간 고유벡터를 e 는 복소 정현파 신호벡터를 각각 표시하며 H 는 Hermitian 을 나타낸다. 신호의 샘플링 시간을 T_s 라고 하면 식 (12)에서의 복소 정현파 신호벡터는 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{e} = [1 \exp(j2\pi f T_s) \dots \exp(j2\pi f M T_s)]^T \quad (13)$$

여기서 T 는 transpose 를 의미한다. 그러므로 다음과 같은 주파수 추정 함수 값은 각 정현파 신호 주파수에서 이론적으로 무한대의 값을 가지게 된다.

$$P(f) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^p \alpha_k |e^H(f) \mathbf{v}_k|^2} \quad (14)$$

그러나 실제로는 추정오차로 인하여 각 정현파 주파수에서 가파른 침두치를 형성하게 된다. 본 논문에서 적용한 EV 방법은 식 (14)에서의 가중치, α_k 를 각 잡음 부 공간 고유벡터에 대응하는 고유 값(eigenvalue), λ_k 의 역수로 하는 방식이다. 이러한 방식을 쓰게 되면 스펙트럼에서 불필요한 침두치를 형성하는, 즉 잘못된 침두치 주

파수 추정이 일어나는 경우를 억제할 수 있다[8][9].

IV. 결과 분석

1. 다중 펄스페어 추정 결과

앞장에서 설명한 바와 같이 비대칭 기상 도플러 스펙트럼에서의 평균속도 추정은 편향오차로 인하여 정확도가 떨어질 수 있다. 그러나 3차를 초과하는 고차 다항식 모델을 적용하기 위해서는 지나치게 많은 자기 상관 함수 값을 추정해야 하기 때문에 본 논문에서는 3차 다항식 모델을 적용하여 편향오차를 줄이는 방법을 적용하였다. 결과를 얻기 위하여 우선 평균속도 변화가 빠르게 나타나도록 12개의 기상 레이더 거리 방에서 비대칭 기상스펙트럼 신호를 모의발생 시켜 시간영역의 I(Inphase) 및 Q(Quadrature phase) 데이터를 얻었다. 이러한 I 및 Q 데이터는 비대칭 정도, 즉 skewness 값을 2.62으로 가정하였으며 기상신호의 SNR은 15 dB로 하여 발생시켰다.

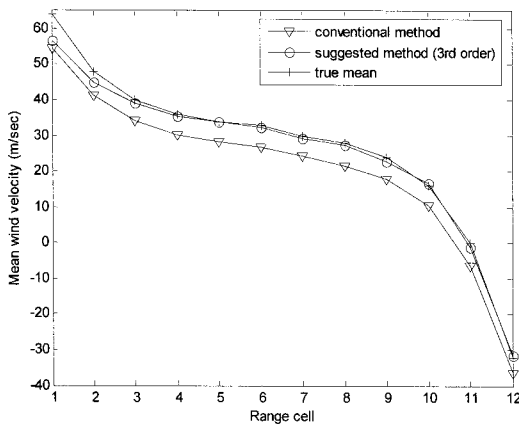


그림 2. 비대칭 기상 도플러 신호에서의 평균 풍속 추정 값 비교 (SNR=15 dB, g=2.62)

Fig. 2. Comparison of mean velocity estimates in asymmetric Doppler spectra (SNR=15 dB, g=2.62)

그림 2에 풍속이 빠르게 변화하고 있는 12개의 거리 방에서의 평균속도에 대한 추정결과를 보여주고 있다. 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 본 논문에서 제안한 방법, 즉 3차 다항식 모델을 적용할 경우 측정된 거의 모든 풍

속범위에서 기존 펄스페어 추정치에 비하여 더 정확한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

2. EV 방법을 이용한 도플러 스펙트럼 첨두치 추정

기상 도플러 스펙트럼의 비대칭성 정도가 심해질수록 편향오차가 크게 발생하는데 이러한 경우 평균속도를 제대로 추정하기 위해서는 다항식 근사화 방법을 적용하면 오차를 줄일 수 있다. 그런데 기상 레이더를 이용하여 기상재해 현상을 탐지하기 위해서는 평균속도(mean)가 아닌 도플러 스펙트럼에서의 첨두치 주파수를 추정하는 것이 더 효율적일 수 있다. 더구나 기상 도플러 신호의 첨두치가 여러 개 나타나는 경우에는 평균풍속의 추정이 무의미한 값을 나타낼 수 있다.

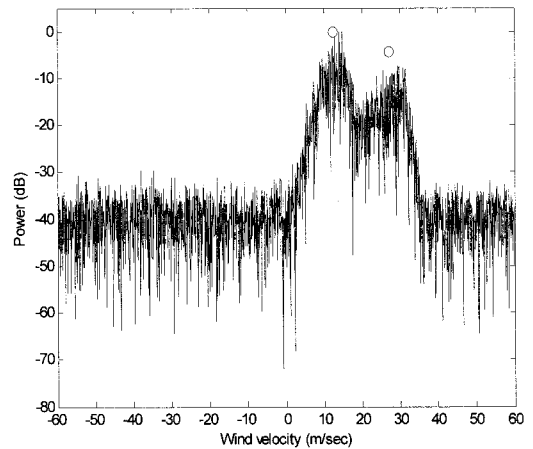


그림 3. 두 개의 첨두치를 갖는 비대칭 도플러 기상신호에서의 EV 방법에 의한 첨두치 풍속 추정 (g=-2.62 and -2.87, 전력비=3:1)

Fig. 3. Peak velocity estimation of asymmetric Doppler spectra with two peaks using EV method (g=-2.62 and -2.87, power ratio=3:1)

따라서 고유벡터를 이용한 EV 방법을 다중 첨두치를 갖는 기상신호 스펙트럼에 적용하여 보았다. 그러나 하나의 거리 방에서 세 개 이상의 첨두치를 갖는 경우는 매우 예외적인 현상이므로 여기서는 비교적 드물지 않게 발생하는 두 개의 첨두치를 갖는 기상 도플러 스펙트럼을 모의 구현하여 I, Q 데이터를 얻었으며 이러한 데이터에 EV 방법을 적용하여 그 추정 결과 값을 구하였다. 그

림 3의 경우는 비대칭성 정도가 각각 -2.62 및 -2.87 을 가지며 전력비가 3:1 인 두 개의 첨두치를 갖는 기상신호 스펙트럼에서의 추정결과를 보여준다. 여기서 EV 방법으로 추정된 기상 도플러 주파수를 동그라미로 표시하였다. 이와 같은 추정 주파수, 즉 피크 점에서의 추정 풍속은 모의 구현된 기상신호 피크 점에서의 도플러 주파수 및 전력을 거의 정확히 나타내고 있음을 결과로부터 확인할 수 있다.

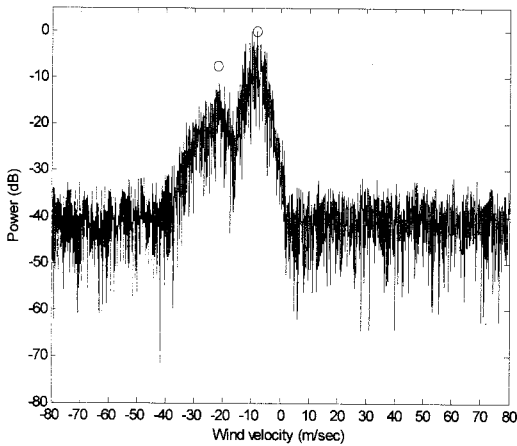


그림 4. 두 개의 첨두치를 갖는 비대칭 도플러 기상신호에서의 EV 방법에 의한 첨두치 풍속 추정 ($g=1.29$ and -2.87 , 전력비=10:1)

Fig. 4. Peak velocity estimation of asymmetric Doppler spectra with two peaks using EV method ($g=1.29$ and -2.87 , power ratio=10:1)

그림 4의 경우는 도플러 주파수가 음수 값을 가지 경우, 즉 바람의 방향이 관측 기상 레이더로부터 멀어지는 풍속을 갖는 기상신호 스펙트럼에서의 추정결과를 보여준다. 여기서는 비대칭성 정도가 각각 1.29 및 -2.87 값을 가지며 전력비가 10:1 인 두 개의 첨두치를 갖는 기상 도플러 스펙트럼을 사용하였다. 그림 4의 결과에서도 동그라미로 표시된 EV 방법에 의한 추정치들은 실제 기상신호의 피크 주파수 및 전력들을 매우 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

돌풍등 기상급변에 의한 위험을 탐지하기 위해서는 수신되는 기상 도플러 신호로부터 평균풍속을 정확히 추정하는 것이 매우 중요하다. 그러나 기존의 펄스페어 방법은 기상신호의 도플러 스펙트럼이 대칭적인 가우시안 형태를 가진다는 것을 가정하고 있다. 이러한 가정이 유효하지 않은 경우 편향오차가 일어날 수 있으며 다중 첨두치를 갖는 도플러 스펙트럼에서는 평균풍속의 추정이 무의미할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 비대칭 기상 레이더 신호에서의 효율적인 평균풍속 추정 방법을 고찰하였다. 기상신호가 비대칭적인 경우를 가정하여 다항 근사식에 의한 개선된 다중 펄스페어 방법을 제안하였으며 복잡도가 크게 증가하지 않는 3차 다항식 근사법을 적용하여 본 결과 기존방법에 비하여 더 높은 정확도를 보임을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 방법은 기상 도플러 신호가 심하게 비대칭성을 갖고 있거나 다중 첨두치를 갖는 경우에는 평균풍속도의 추정이 큰 의미를 가지지 못하는 경우가 많기 때문에 비효율적이다. 따라서 이러한 경우에는 도플러 신호의 모드(mode), 즉 첨두치 추정이 더 효과적이기 때문에 본 논문에서는 고유벡터를 이용한 EV 방법을 적용하였다. 결과들에서 보는 것처럼 두 개의 첨두치를 갖는 기상신호 스펙트럼에서의 첨두치 풍속, 즉 도플러 주파수 및 전력은 EV 방법을 적용하면 거의 정확하게 추정될 수 있음을 알 수 있다.

그러므로 본 논문에서 제안하거나 적용한 방법들을 활용하면 공간상에서의 풍속의 변화 정도를 더 효율적이며 신뢰성 있게 분석할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 기법들을 활용하면 기상재해 탐지에 필수적인 공간상에서의 풍속의 변화 정도를 실시간으로 더욱 신뢰성 있게 파악할 수 있으므로 돌풍 및 악천후 등에 의한 항공기 사고 등을 예방하는데 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] E. Kessler, " Wind shear and aviation safety", *Nature*, vol. 315, pp. 179-180, 1985.
- [2] R. A. Brown and V. T. Wood, "On the interpretation of single-Doppler velocity patterns within severe thunderstorms", *Weather and Forecast*, vol. 6, pp. 32-48, 1991.
- [3] D. S. Zrnic, "Estimation of spectral moments for weather echoes", *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, vol. 17, pp. 113-128, 1979.
- [4] T. Berger and H. L. Groginsky, "Estimation of the spectral moments of pulse trains", *Int. Conf. on Information Theory*, 1973.
- [5] L. H. Janssen and Van der Spek, "The shape of Doppler spectra from precipitation", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 21, pp. 208-219, 1985.
- [6] G. W. Snedecor, *Statistical methods*, The Iowa State University Press, 1956.
- [7] D. H. Johnson, " The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems", *Proc. IEEE*, vol. 70, pp. 1018-1028, 1982.
- [8] 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
- [9] M. Kaveh and A. J. Barabell, "The statistical performance of the MUSIC and the minimum-norm algorithms for resolving plane waves in noise", *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol. 34, pp. 331-341, 1986
- [10] P. Mahapatra, *Aviation weather surveillance systems*, pp. 79-120, IEE and AIAA, 1999.

저자소개



이 종 길 (Jonggil Lee)

1982년 2월 연세대학교 전자
공학과 (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