

# 기상레이다에서의 비대칭 도플러 모델

이종길\*

\*인천대학교

## A Skewed Doppler Spectrum Model in a Weather Radar

Jong Gil Lee\*

\*University of Incheon

E-mail : jnglee@incheon.ac.kr

### 요 약

기상 레이다에서의 반사 신호는 비, 구름 등에 의하여 산란되는 전자파 신호로서 이러한 도플러 신호를 분석함으로써 여러 가지 특징적인 기상정보를 추출하게 된다. 그런데 이러한 기상정보를 정확히 추출하기 위해서는 지표면 클러터 및 레이다에서의 도플러 기상정보들이 어떻게 나타나는지 그 특징을 잘 파악하여야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 대칭형 도플러 스펙트럼 모델을 개선할 수 있는 비대칭 도플러 모델을 제안하였다. 제안된 기상 도플러 스펙트럼 모델은 기상조건, 운영환경 및 시스템 특성에 따라 다양하게 모의될 수 있으므로 기상 레이다 정보추출의 신뢰성 검증 및 성능향상에 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

### ABSTRACT

A weather radar extracts the weather information from the return echoes which consist of scattered electromagnetic wave signals from rain, cloud and dust particles, etc. The acquisition of accurate weather information depends on the operation environment which include the Doppler weather signal and ground clutter characteristics. Since the conventional symmetric weather Doppler model does not represent the measurements in real situations, the improved model is suggested to describe the skewness in the Doppler spectrum model. Using the suggested model, many various weather signals can be simulated to verify the accuracy of signal processing algorithms and the reliability of the extracted weather information

### 키워드

weather signal, skewed Doppler model, 기상레이다

### 1. 서 론

기상 레이다 시스템에서는 정확한 기상정보를 추출하여 기상재해 및 위험 등에 관한 정보를 제공하는 것이 가장 중요한 목적이라고 할 수 있다. 그러나 우리나라의 경우 산악지형에 의한 강력한 지표면 반사 클러터의 영향을 받게 되므로 시스템 위상잡음, 건조한 기상상황에서의 열악한 신호 대 잡음비등을 고려하여야 한다. 또한 대칭적인 도플러 스펙트럼을 가정하여 펄스페어 추정방법에 관한 성능분석이 이루어졌기 때문에 일반적으

로 널리 쓰이고 있는 펄스 페어 추정방법에 대한 신뢰성 고찰 및 재분석을 필요로 한다. 이를 위해서는 여러 가지 기상 환경 하에서 반복적인 신뢰도 시험 및 오차 분석 등을 행하여야 하나 이러한 과정은 많은 시간과 인력을 필요로 한다. 그러므로 기상 레이다 신호 및 데이터 처리부의 신뢰성 및 효율성 등의 검증을 위해서는 우선적으로 시스템 위상잡음 및 도플러 스펙트럼의 비대칭성을 고려한, 즉 다양한 레이다 시스템 운용 환경 하에서의 모의도플러 기상신호의 충실한 발생이

매우 중요한 과제이다. 기상레이다에 수신되는 I(Inphase) 및 Q(Quadrature) 신호는 거리 셀(range cell) 내의 수많은 강우 입자 또는 먼지입자들에 의해 반사되는 전자파 신호들이다. 셀내의 많은 입자들이 이동함으로 인해 생기는 도플러 스펙트럼의 수식모델은 다소 복잡하기는 하지만 해석학적으로 표시가 가능하다. 그러나 결국 셀내의 전체 스펙트럼은 각 반사입자가 만드는 도플러 신호의 합으로 표시될 것이다. 그러므로 central limit 정리를 적용하면 도플러 스펙트럼의 형태가 가우시안 분포를 가지게 됨을 예측할 수 있다. 실제로 관측된 도플러 스펙트럼의 자료 분석결과 대부분의 경우에는 대칭적인 가우시안 형태로 표시됨을 확인할 수 있다. 그러나 경우에 따라서는 비대칭적인 도플러 스펙트럼을 보이는 경우도 자주 발생하는 것으로 발표되고 있다[1]. 이러한 비대칭 도플러 스펙트럼 모델의 경우는 여러 가지 문제점을 야기할 수 있는데 현재의 기상레이다 신호 및 데이터 처리 방법은 대칭형 도플러 스펙트럼 모델을 가정하여 그 신뢰도 정도가 분석되어졌기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 우선 기상 레이다의 신호 및 데이터처리용 알고리즘 연구개발을 위한 비대칭 도플러 모델을 제안하였다. 또한 이러한 비대칭 도플러 모델을 이용하여 다양한 모의 기상신호를 발생시키는 기법에 대하여 연구하였다. 이를 위해서 여러 가지 종류의 실측 기상 레이다 자료를 분석하였을 뿐 아니라 운용환경에 의해 좌우되는 산, 지표면 및 건물 등에 의한 반사파 정도 등을 고려한 적절한 모델링 기술이 요구되므로 이러한 내용들을 설명하였다. 아울러 수신 기상신호의 도플러 스펙트럼을 주파수 영역에서 다양하게 발생시킬 수 있는 방법을 연구하고 이를 역푸리에 변환함으로써 실질적인 레이다 수신신호와 유사한 시간영역의 모의신호를 얻고자 한다. 또한 지표면 반사, 건물 등에 의한 클러터 잡음 등을 주파수영역에서 운용 환경에 따라 적절히 발생시켜 주파수영역의 모의 기상신호에 인가시킬 수 있도록 하는 효율적인 알고리즘을 제안하였다.

## II. 비대칭 기상 도플러 모델

시간영역에서 수신되는 기상레이다 신호를 실제와 매우 유사하게 얻어내기 위해서는 우선 주파수 영역에서 실제 관측되는 스펙트럼과 거의 일치하는 기상 스펙트럼 모델을 구하여야 한다. 먼저 수신되는 신호의 통계적 특성을 유도하여 보았다. 기상레이다에 수신되는 I (Inphase) 및 Q (Quadrature phase) 신호는 cell 내의 많은 강우 또는 먼지입자들에 의한 반사파로서 각각 서로 독립적인 랜덤변수로 볼 수 있으므로 I 와 Q 값의 확률밀도는 joint Gaussian 으로 나타낼 수 있다[3]. 따라서 신호의 크기는 Rayleigh 분포를 가지게 되며 여기서 얻고자 하는 전력신호 값은 지수분포(exponential distribution)를 가지게 된다는

것을 유도할 수 있다. 즉,

$$I(i) = s(i) \cos \phi(i) + n(i) \cos \psi(i) \quad (1)$$

$$Q(i) = s(i) \sin \phi(i) + n(i) \sin \psi(i)$$

(1)의 수식에서  $s(i)$ 는 Rayleigh 분포를 갖는 envelope 이며  $\phi(i)$  는 균일분포를 갖는 위상이 된다. 또한  $n(i)$  및  $\psi(i)$ 는 기상레이다 시스템의 잡음을 나타낸다. 그러므로 (1)식은 펄스반복 주파수(PRF: Pulse Repetition Frequency) 대역 내에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(i) + jQ(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{P_k} \exp(j \theta_k) \exp(j \frac{2\pi k i}{N}) \quad (2)$$

여기서  $P_k$  는 신호와 배경잡음을 합한 순간전력 값으로서 지수 함수적인 분포를 가지게 된다. 즉 확률분포는 다음과 같이 표시된다.

$$P(P_k) = \frac{1}{N(S_k + np)} \exp[-P_k / (S_k + np)] \quad (3)$$

여기서 시스템의 전체 배경잡음 전력은  $P_n = N \times np$  가 된다.

이제 도플러 전력 스펙트럼 모델을 결정하여야 한다. 일반적으로 대칭적인 가우시안 모델을 가정하고 있으나 관측결과를 살펴보면 약 25% 정도는 대칭적인 가우시안 모델로는 그 형태를 제대로 표현할 수 없었다[1]. 따라서 대칭 및 비대칭 가우시안 도플러 모델들을 모두 표현하기 위하여 다음과 같은 정규화 된 skewed 가우시안 모델을 제안하였다.

$$S_d(f) = \frac{2}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi} W_1} \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2W_1^2}\right) \quad \text{when } f \leq f_d$$

$$S_d(f) = \frac{2p}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi} W_2} \exp\left(-\frac{(f-f_d)^2}{2W_2^2}\right) \quad \text{when } f > f_d \quad (4)$$

여기서  $W_1$ 과  $W_2$ 는 각 영역에서의 스펙트럼 분산정도를 표시하는 변수이며  $f_d$ 는 도플러 스펙트럼 첨두치(peak)에서의 주파수를 표시한다. 이러한 스펙트럼 모델의 전체 분산은  $(W_1^2 + pW_2^2)/(1+p)$ 로 표시될 수 있으며 식 (4)에서의  $p$ 는 각각의 스펙트럼 폭의 비로  $p = W_2/W_1$ 와 같이 나타낼 수 있으며 이러한  $p$ 는 도플러 스펙트럼의 skewness 정도를 표시하게 되는  $g$ 라는 값을 결정하는 파라미터이다. skewness 정도를 표시하는  $g$ 의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = 4\sqrt{\frac{2}{\pi}} [(p^{-2} + 1)^{-3/2} - (p^2 + 1)^{-3/2}] \quad (5)$$

이러한 skewness 정도를 결정하는  $g$ 의 값은 스펙트럼이 대칭인 경우 ( $p=1$ ) 0이 되며 비대칭성이 심할수록  $g$ 의 값은 커지게 된다[2].  $S_k$ 를 주파수별 신호전력으로 나타내고  $f_d$ 는 peak 도플러 주파수를 표시한다면 이러한 스펙트럼에서의 평균 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)에 관하여 고려하여 보면 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉,

$$SNR = \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} = \frac{\sum_{k=1}^N S_k}{P_n} \quad (6)$$

이제 (3)식과 같이 표시되는 지수분포를 일반적으로 많이 쓰이는 균일 분포를 갖는 0에서 1사이의 랜덤변수로 얻기 위한 방법을 생각하여 보자.

$X_k$ 를 0과1사이에서 균일 분포를 갖는 랜덤변수라고 하면 기본적인 확률이론에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립함을 알 수 있다.

$$P(P_k) dP_k = P(X_k) dX_k \quad (7)$$

양변을 각각 0에서  $P_k$ , 0에서  $X_k$ 까지 적분하면 다음과 같이 변환된 식을 구할 수 있다.

$$P_k = -\ln(1 - X_k) \times (S_k + np) \quad (8)$$

그러므로 (7)식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$P_k = -\ln(X_k) \times (S_k + np) \quad (9)$$

### III. 클러터 반사파 및 결과

기상레이다에서의 지표면 및 인공 구조물에 의한 반사 클러터를 고려하여 보자. 지표면 클러터의 경우 대부분의 기상 레이다가 산의 정상에 위치하고 있고 지표면은 초목들로 덮여있다고 볼 수 있다. 따라서 반사되는 도플러 클러터는 일반적으로 도플러 주파수 0을 중심으로 하는 가우시안 모델로 나타낼 수 있겠다[3]. 그러나 실제로 대부분의 기상관측 레이다는 360도 전 방향을 관측하기 위하여 안테나가 회전하고 있다. 이러한 안테나 스캐닝에 의해서 생기는 도플러 스펙트럼은 중심 쪽은 가우시안으로 모델링이 가능하고 중심으로 멀어질수록 가우시안 형태보다 더 가파르게 값이 떨어지게 된다[3][4]. 따라서 우리가 얻는 클러터 스펙트럼은 이러한 안테나 회전에 의한 도플러 스펙트럼과 풍속에 의해 분산이 결정되는 지표면 스펙트럼의 convolution으로 볼 수 있다. 그러므로 convolution으로 얻어지는 최종적인 클러터 스펙트럼은 가우시안 형태로 근사화시킬 수 있다. 그러므로 안테나 및 풍속에 의한 분산을 입력변수로 하는 지표면 클러터 스펙트럼을 가우시안 형태로 발생시켰다. 또한 건물 및 인공구조물에 의한 클러터는 매우 폭이 좁은 가우시안 형태로 표시될 수 있으므로 분산에 관계된 입력변수의 조정으로 이러한 클러터의 발생이 가능하게끔 하였다.

또한 이러한 대칭형 클러터 모델 뿐 만 아니라 본 논문에서 제안한 것과 같이 skewness 정도를 고려한 비대칭 클러터의 발생도 가능하다. 이러한 비대칭 클러터 모델은 peak 도플러 주파수를 0 부근으로 설정하여 입력 파라미터의 변화에 따라 다양한 형태의 비대칭 클러터를 얻을 수 있도록 하였다.

그러므로 이러한 도플러 신호 모델과 클러터 모델을 이용하여 발생시킨 결과를 그림 1에서 그림 3까지 표시하였다. 그림 1에서는 클러터가 없는 경우 비대칭 정도 즉 skewness 정도 및 신호 대 잡음비에 따라 모의 구현된 기상 레이더 도플러 신호를 나타내고 있다. 그림 2에서는 강력한 지표면 클러터를 포함한 모의 기상 레이더 신호를 보여주고 있는데 기상신호는 비대칭 가우시안 형상이며 음의 첨두치 도플러 주파수를 갖는 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 클러터에 의한 반사전력이 강할수록 상대적으로 미약한 기상신호의 정보추출에 심한 어려움을 초래하게 된다. 일반적으로 지표면 등 클러터에 의한 반사전력은 매우 강하게 나타난다. 따라서 이러한 경우 클러터에 의한 반사파를 적절히 제거하여야만 정확한 기상정보를 추출할 수 있다. 그림 3에서는 그림1에서의 비대칭 기상 도플러 전력 모델로부터 얻을 수 있는 시간영역의 I, Q 데이터 중 Inphase 성분만을 표시하였다.

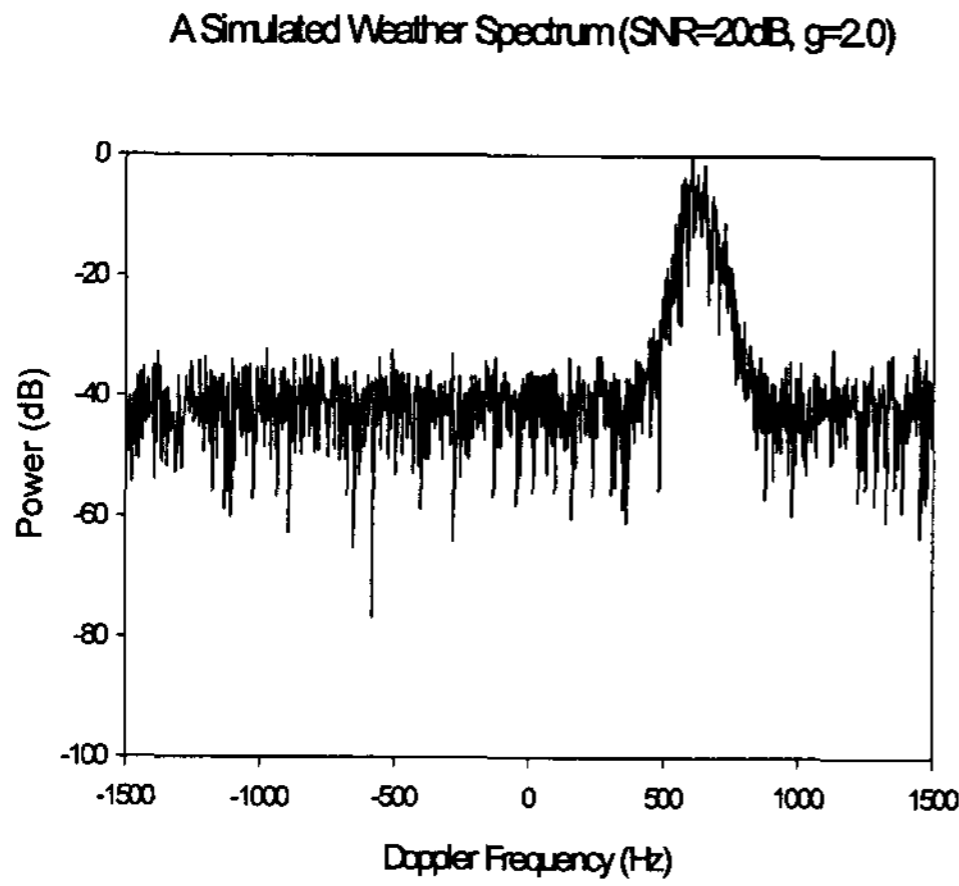


그림 1. 클러터가 없는 경우의 모의기상 신호  
(스펙트럼 폭=25Hz, 침두치 도플러  
주파수=600Hz)

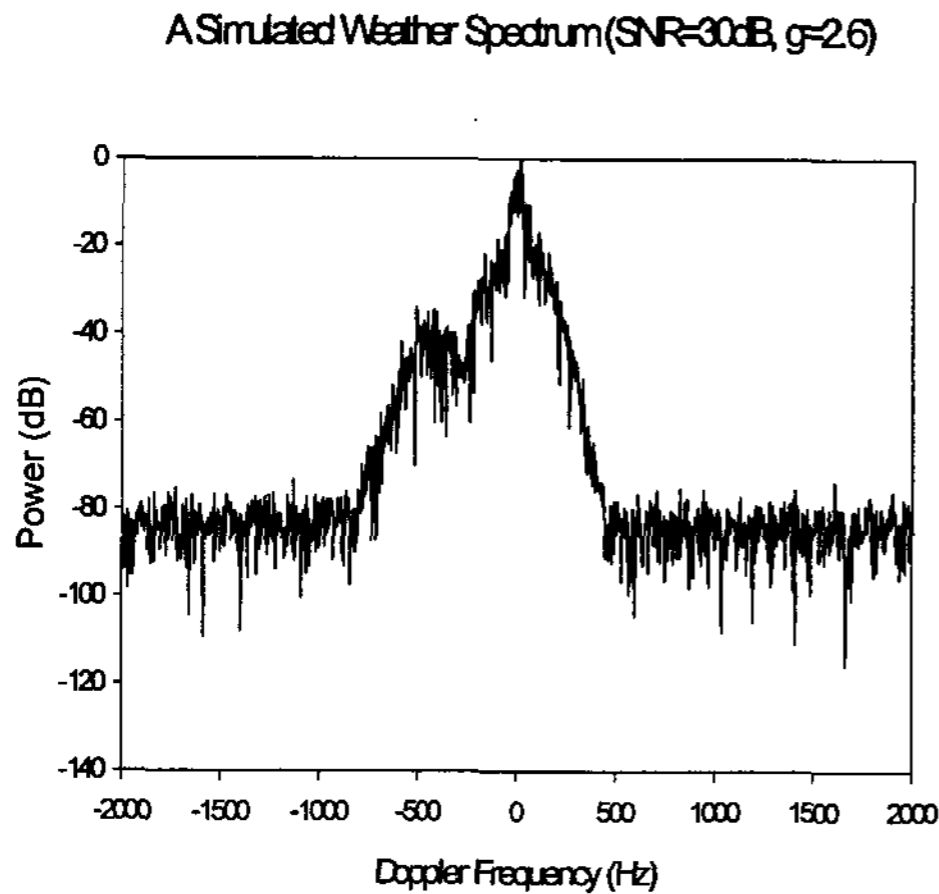


그림 2. 클러터가 존재하는 기상레이다 모의  
수신신호  
(SCR=-30dB, 클러터 스펙트럼 폭=10 Hz,  
도플러 신호 스펙트럼 폭=30 Hz,  
클러터 도플러 평균주파수=0.0Hz, 기상신호의  
침두치 도플러 주파수=500Hz, 신호의  
skewness=2.6)

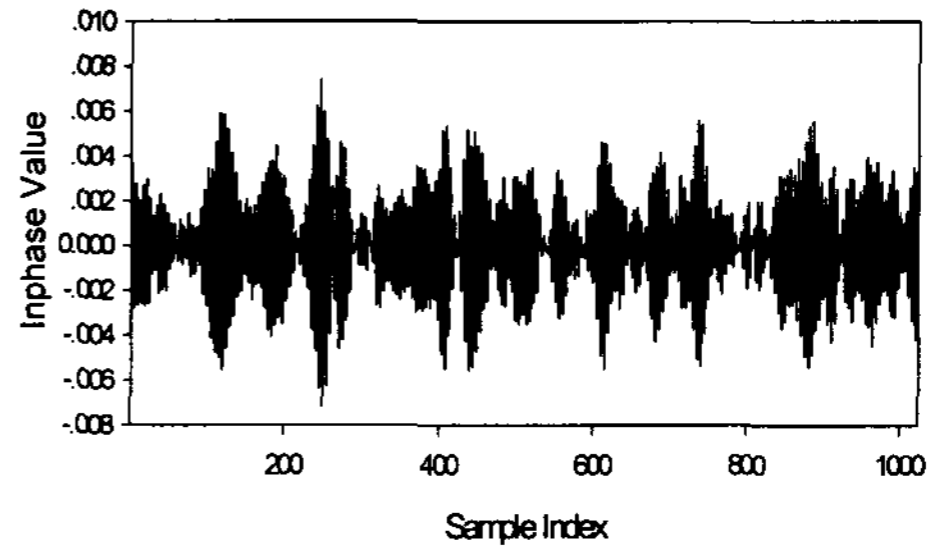


그림 3. 그림 1에서의 비대칭 도플러 스펙트럼  
모델을 이용한 Inphase 모의신호

#### IV. 결 론

모의 실험결과들의 그림에서 보는 것처럼 대칭형 가우시안 모델뿐만 아니라 비대칭형 가우시안 모델의 경우도 본 논문에서 제안된 기법을 이용하면 효율적인 모의발생이 가능하다. 즉 비대칭성을 나타내는 skewness 등 각각의 파라미터들만을 바꾸어 줌으로써 다양한 형태의 클러터 및 기상 도플러 신호들을 매우 신속하게 발생시킬 수 있다. 따라서 매우 다양하면서도 실제와 유사한 모의 기상신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 이러한 방법을 이용하면 기상레이다 시스템에서의 신호 및 데이터 처리부의 효율적인 설계 및 알고리즘 검증에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] L. H. Janssen and G. A. Van der Spek, "The shape of Doppler spectra from precipitation," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-21, pp. 208-219, 1985.
- [2] G. W. Snedecor, "Statistical methods", The Iowa State University Press, 1956.
- [3] NEXRAD- 1992 MIT Lincoln Lab. Report.
- [4] W. H. Heiss, D. L. McGrew and D. Sirmans, "NEXRAD: Next generation weather radar (WSR-88D)," Microwave Journal, Jan. 1990.
- [5] D. W. Burgess, "Single Doppler radar vortex recognition: part I - Mesocyclone signatures," 17th Conf. Radar Meteorol., Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA. 02108, pp. 97-103, Oct. 1976.
- [6] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 2001.