
기상 레이다에서의 비대칭 도플러 신호 모의구현에 관한 연구

이종길*

A Study on Simulation of Asymmetric Doppler Signals in a Weather Radar

Jonggil Lee*

요 약

기상 레이다에서의 반사 신호는 비, 구름 및 먼지 입자 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. 그러나 기존의 대칭형 도플러 스펙트럼 모델은 다양한 기상환경을 나타내기에는 다소 부적합하다. 따라서 본 논문에서는 도플러 스펙트럼 모델에서의 비대칭성을 나타낼 수 있는 개선된 모델을 제안하였다. 제안된 기상 도플러 모델을 이용하면 기상조건, 운영환경 및 시스템 특성에 따라 다양한 클러터 및 기상신호들을 시간 및 스펙트럼 영역에서 효율적으로 모의할 수 있다. 이러한 모의방법은 기상 레이다 정보추출 알고리즘의 정확도 검증 및 추가적인 성능 향상을 위한 새로운 시스템 개발에 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 characteristics of Doppler weather signal and ground clutter should be analyzed to extract the accurate weather information. However, the conventional symmetric weather Doppler model is somewhat inappropriate in representing various weather situations. Therefore, 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 efficiently in time and spectral domain according to weather situations, operation environment and system characteristics. This simulation method may be very helpful in verifying the accuracy of the weather information extraction algorithms and developing the new system for further performance improvement.

키워드

비대칭 도플러 스펙트럼, 기상 신호, 기상 레이다, 클러터

I. 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 영

향을 받게 될 뿐만 아니라 상대적으로 건조한 기상상황에서의 열악한 신호 대 잡음비등을 고려하여야 한다. 또한 대칭적인 도플러 스펙트럼을 가정하여 펄스페어 추정방법에 관한 성능분석이 이루어졌기 때문에 일반적으로 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 레이더 신호 및 데이터 처리부의 신뢰성 및 효율성 등의 검증은 위해서는 우선적으로 클러터 및 도플러 스펙트럼의 비대칭성 등을 고려한, 즉 다양한 레이더 시스템 운용 환경 하에서의 모의 도플러 기상신호 및 클러터의 충실한 발생이 매우 중요한 과제이다. 셀내의 많은 입자들이 이동함으로써 인해 생기는 기상 레이더 수신 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 기상 스펙트럼의 경우는 여러 가지 문제점을 야기할 수 있다. 현재 기상 레이더 신호 및 데이터 처리를 위하여 가장 널리 쓰이고 있는 펄스 패어 추정방법[2][3] 은 대칭형 도플러 스펙트럼 모델을 가정하여 그 성능 및 신뢰도 정도가 분석되어졌기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 기상 레이더의 신호 및 데이터처리용 알고리즘 연구개발을 위한 비대칭 도플러 모델을 제안하였다. 이를 위해서 여러 가지 종류의 실측 기상 레이더 자료를 분석하였을 뿐 아니라 운용환경에 의해 좌우되는 산, 지표면 및 건물 등에 의한 반사파 정도 등을 고려한 적절한 모델링 기술에 관련된 내용들을 설명하였다. 아울러 수신 기상신호의 도플러 스펙트럼을 주파수 영역에서 다양하게 발생시킬 수 있는 방법을 제안하고 이를 역푸리에 변환함으로써 실질적인 레이더 수신신호와 유사한 시간영역의 모의신호를 얻고자 한다. 또한 지표면 반사, 건물등에 의한 클러터 잡음 등을 주파수영역에서 운용환경에 따라 적절히 발생시켜 주파수영역의 모의 기상신호에 인가시킬 수 있도록 하는 효율적인 기법을 제안하였다.

II. 비대칭 기상 도플러 모델

시간영역에서 수신되는 기상 레이더 신호를 실제와 매우 유사하게 얻어내기 위해서는 우선 주파수 영역에서 실제 관측되는 스펙트럼과 거의 일치하는 기상 스펙트럼 모델을 구하여야 한다. 기상 레이더에 수신되는 시간영역에서의 I 및 Q 신호는 거리 셀 내의 많은 강수 또는 먼지입자들에 의한 반사파로서 각각 서로 독립적인 랜덤변수로 볼 수 있으므로 I 와 Q 값의 확률밀도는 joint Gaussian 으로 나타낼 수 있다. 따라서 신호의 크기는 Rayleigh 분포를 가지게 되며 여기서 얻고자 하는 전력 신호 값은 지수분포(exponential distribution)를 가지게 된다는 것을 유도할 수 있다. 즉, I 및 Q 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(i) = S(i) \cos \phi(i) + N(i) \cos \psi(i)$$

$$Q(i) = S(i) \sin \phi(i) + N(i) \sin \psi(i) \quad (1)$$

식(1)에서 envelope S(i)는 Rayleigh 분포로 표시되며 $\phi(i)$ 는 균일 분포를 갖는 위상성분이 된다. 또한 N(i) 및 $\psi(i)$ 는 전 주파수대역에서 발생하는 기상 레이더 시스템의 배경잡음을 나타낸다. 따라서 (1) 식은 기상 레이더의 펄스 반복주파수 (PRF: Pulse Repitition Frequency), 대역 내에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

식(2)에서 N은 샘플링 된 데이터 숫자를 표시하며 P_k 는 신호와 배경잡음을 합한 순간전력 값으로서 지수 함수적인 분포를 가지게 된다. 즉, 순간전력에 대한 확률밀도 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$p(P_k) = \frac{1}{(S_k + np)} \exp \left[\frac{-P_k}{(S_k + np)} \right] \quad (3)$$

식(3)에서의 np 는 배경잡음 즉 균일한 잡음 전력밀도를 나타내며 따라서 샘플링 된 시스템의 전체 배경잡음 전력은 $P_n = N \times np$ 로 표시될 수 있다.

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 각 거리 셀에서의 비대칭 가우시안 도플러 기상 신호 모델들을 표현하기 위하여 다음과 같은 정규화된 skewed 가우시안 모델들을 제안하였다.

$$S_d(f) = \frac{2}{1+c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}W_1} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2W_1^2}\right]$$

for $f \leq f_d$

$$S_d(f) = \frac{2c}{1+c} \frac{1}{\sqrt{2\pi}W_2} \exp\left[-\frac{(f-f_d)^2}{2W_2^2}\right]$$

for $f > f_d$

(4)

여기서 W_1 과 W_2 는 각 영역에서의 스펙트럼 분산 정도를 표시하는, 즉 스펙트럼 폭을 나타내는 변수이며 f_d 는 도플러 스펙트럼 첨두치(peak)에서의 주파수를 표시한다. 이러한 스펙트럼 모델의 전체 분산은 $(W_1^2+cW_2^2)/(1+c)$ 로 표시될 수 있으며 식(4)에서의 c 는 각각의 스펙트럼 폭의 비로 $c=W_2/W_1$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 c 는 도플러 스펙트럼의 skewness 정도를 표시하게 되는 파라미터, g 값을 결정하게 된다. skewness 정도를 표시하는 g 의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

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

(5)

이러한 skewness 정도를 결정하는 g 의 값은 그림 1에서 나타낸 바와 같이 스펙트럼이 대칭인 경우 ($c=1$) 0이 되며 비대칭성이 심할수록 g 의 절대 값은 커지게 된다.

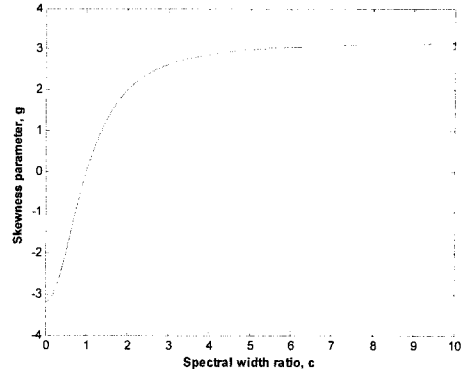


그림 1. 스펙트럼 폭 비에 따른 비대칭성 정도
Fig. 1 Degree of skewness according to the spectral width ratio

그러므로 이러한 비대칭 도플러 모델을 이용하면 두 개의 기상신호 첨두치가 나타나는 경우에도 식(6)과 같이 제안된 수식을 이용하여 표현이 가능하다. 즉, 식(6)의 각 파라미터 값들을 적절히 조정함으로써 실제 기상 신호와 거의 유사한 대부분의 기상신호 형태를 충실하게 모의 구현할 수 있을 것이다.

$$S_{tot}(f) = A_1 S_d(f) + A_2 S_d'(f)$$

where $A_1 + A_2 = 1, A_2 / A_1 = r \leq 1$

(6)

따라서 식(6)에서의 A_1 및 A_2 는 전체적으로 정규화된 기상신호 스펙트럼 전력의 상대적인 값들을 표시하게 되며 상대적인 전력비는 r 로 나타내었다. 주 도플러 스펙트럼이 아닌 두 번째 피크를 형성하는 부 도플러 스펙트럼의 상대적인 전력비 값은 1을 넘지 않도록 표시하였다. 또한 식(6)에서의 부 도플러 스펙트럼의 형태를 나타내는 모델은 다음과 같이 표시된다.

$$S_d'(f) = S_d(f'_d, c', W'_1, W'_2)$$

(7)

식(7)에서 표시하는 f'_d 및 c', W'_1, W'_2 는 부 도플러 스펙트럼의 첨두치 도플러 주파수 및 부 도플러 스펙트럼의 비대칭성 정도를 표시하기 위한 파라미터들의 값들을 나타낸다. 또한 식(7)에서 두 번째 항에서의 skewness 파라미터도 앞에서 정의된 바와 같이 $g' = W'_2 / W'_1$ 로 표시된다.

이제 식 (4) 또는 식 (7)에서 표시되는 스펙트럼 분산 정도를 표시하는 파라미터들에 관하여 고려하여 보자. 실제로 기상 레이더에서의 전자파 반사 입자들이 공간상에 고정되어 있다고 하여도 안테나 회전에 따른 신호의 decorrelation 현상이 발생하며 이에 따른 스펙트럼의 확산이 일어나게 된다. 이러한 샘플신호간의 decorrelation 현상에 따른 스펙트럼 폭은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$W_{\alpha} = \frac{\alpha \lambda \cos \theta_e \sqrt{\ln 2}}{2\pi \theta_b} \quad (8)$$

식 (8)에서의 α 는 안테나의 각속도를 나타내며 qe 및 qb 는 전자파 빔의 센터를 기준으로 하는 고각 및 가우시안 안테나 패턴에서의 3dB 빔 폭을 각각 나타낸다. 또한 반사입자들의 크기에 따른 낙하속도의 차이로 인한 분산효과가 나타나는데 낙하속도의 차이는 고각이 0 이 아닐 경우 레이더와의 상대속도 변화로 나타나며 이러한 현상으로 인한 수신 스펙트럼 폭을 표시하여 보면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$W_p = W_{p0} \sin \theta_e \quad (9)$$

여기서 W_{p0} 는 입자들 간의 낙하속도 차이에 따른 도플러 스펙트럼 폭을 표시한다. W_{p0} 는 반사입자들이 강우입자들인 경우 입자의 크기분포와 거의 무관하게 그 값이 $W_{p0}=2/\lambda$ 로 표시됨은 잘 알려진 사실이다[5]. 이러한 기상 도플러 스펙트럼 확산에 영향을 미치는 요인들은 서로 독립적인 관계에 있으므로 전체분산은 각각의 분산의 합으로 표시될 수 있다. 그러므로 최종적인 기상 도플러 스펙트럼 폭 W_i 는 다음과 같이 나타나게 된다. 즉,

$$W_i = \sqrt{W_i^2 + W_{\alpha}^2 + W_p^2} \quad \text{where } i = 1, 2 \quad (10)$$

이제 전체 도플러 신호전력을 각각의 도플러 주파수에 따른 주파수별 신호전력 S_k 로 나타내고 이러한 스펙트럼에서의 평균 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)에 관하여 고려하여 보면 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉,

$$SNR = \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} = \frac{\sum_{k=1}^N S_k}{P_n} \quad (11)$$

그러므로 식 (11)에서 설정된 SNR 값 및 기상신호 도플러 스펙트럼 파라미터들을 이용하여 배경잡음을 포함하는 기상신호를 얻을 수 있다. 효율적인 모의구현을 위하여 X_k 를 0과 1 사이에서 균일 분포를 갖는 랜덤변수라고 하면 기본적인 확률이론에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립함을 알 수 있다.

$$p(P_k)dP_k = p(X_k)dX_k \quad (12)$$

식(12)의 양변을 각각 0에서 P_k , 0에서 X_k 까지 적분하면 다음과 같이 변환된 식을 구할 수 있다.

$$P_k = -\ln(1 - X_k) \times (S_k + np) \quad (13)$$

그러므로 순간전력을 나타내는 식(13)은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$P_k = -\ln(X_k) \times (S_k + np) \quad (14)$$

III. 클러터 모델

지표면 클러터의 경우 대부분의 기상 레이더가 산의 정상에 위치하고 있고 지표면은 초목들로 덮여있다고 볼 수 있다. 따라서 반사되는 도플러 클러터는 일반적으로 도플러 주파수 0 을 중심으로 하는 가우시안 모델로 나타낼 수 있겠다. 이러한 가우시안 모델을 NSSL (National Severe Storms Laboratory)에서 S-band 기상 레이더로 얻은 실제 측정 자료와 비교하여 보면 낮은 풍속에서는 가우시안 모델의 적용이 적합할 것으로 판단된다. 그러나 C-band 레이더로 얻은 실측 자료를 살펴보면 낮은 풍속에서는 거의 dc 성분으로 표시되며 풍속에 의한 약간의 변화량만이 관측되고 있다는 것을 알 수 있다[6]. 그러나 MIT Lincoln Lab. 의 또 다른 관련 자료를 분석하여 보면 높은 풍속에서는 이러한 dc 성분이 없으며 두 개의 주파수 대역 레이더 실측 자료 모두 가우시안 형태를

보이고 있으나 중심으로부터 멀어질수록 가우시안 모델에 비해 그 값이 더 천천히 감소하는 즉 스펙트럼의 퍼짐 정도가 가우시안에 비해 더 큰 형태를 가지게 된다[7]. 그러나 이러한 스펙트럼은 모두 정지한 안테나로부터 얻어진 관측 자료로서 실제로 대부분의 기상관측 레이더는 360도 전 방향을 관측하기 위하여 안테나가 회전하고 있다. 이러한 안테나 스캔닝에 의해서 생기는 도플러 스펙트럼은 중심 쪽은 가우시안으로 모델링이 가능하고 중심으로 멀어질수록 가우시안 형태보다 더 가파르게 값이 떨어지게 된다. 따라서 얻어지는 클러터 스펙트럼은 이러한 안테나 회전에 의한 도플러 스펙트럼과 풍속에 의해 분산이 결정되는 지표면 스펙트럼의 convolution으로 볼 수 있다. 그러므로 convolution으로 얻어지는 최종적인 클러터 스펙트럼은 대칭형 가우시안 형태로 근사화시킬 수 있다. 즉, 클러터로 인한 도플러 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CL_d(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}W_{CL}} \exp\left[-\frac{(f-f_{CL})^2}{2W_{CL}^2}\right] \quad (15)$$

식(15)에서의 f_{CL} 및 W_{CL} 은 대칭형 가우시안 클러터 모델에서의 클러터 중심주파수 및 분산을 각각 표시한다. 또한 이러한 대칭형 클러터 모델 뿐만 아니라 본 논문에서 제안한 것과 같이 skewness 정도를 고려한 비대칭 클러터의 발생도 가능하다. 이러한 비대칭 클러터 모델은 중심 도플러 주파수를 0 부근으로 설정하여 입력 파라미터의 변화에 따라 다양한 형태의 비대칭 클러터를 얻을 수 있다. 그러나 기상신호와 달리 클러터 모델은 지표면 클러터나 이동 클러터들도 거의 대부분 대칭형 가우시안 스펙트럼으로 표현되어 질수 있기 때문에 비대칭 클러터 모델을 사용하는 경우는 매우 드물다고 할 수 있다.

IV. 모의구현 결과분석

앞장에서 기술한 바와 같은 모의구현 방법을 적용하면 각 파라미터 값들을 상황에 따라 적절하게 변화시킴으로서 실제 측정치와 유사한 다양한 기상 레이더 신호 및 클러터를 구현할 수 있다. 우선 본 논문에서의 모의구

현을 위하여 일반적인 기상 레이더 시스템의 사양을 고려하여 사용 주파수는 6 GHz로 하였으며 초속 60m/sec의 풍속까지 ambiguity 없이 탐지하는 것을 가정하여 펄스반복 주파수(PRF: pulse repetition frequency)는 4.8 KHz로 설정하였다.

그림 2는 비대칭 도플러 가우시안 기상 신호와 클러터를 모의발생시킨 결과를 보여주고 있다. 그림 2에서 신호전력 대 잡음전력비인 SNR 값은 15 dB로 하였으며 신호전력 대 클러터전력 비인 SCR(signal-to-clutter ratio) 값은 -25dB로 설정하였다. 또한 클러터는 지표면 클러터를 가정한 경우로 스펙트럼 분산이 크지 않기 때문에 중심 도플러 속도는 0 m/sec, 분산 정도는 0.4 m/sec로 하였으며 비대칭 가우시안 기상신호의 분산 값 W_1 및 W_2 는 각각 1.2 m/sec, 4.8 m/sec로 설정하였다. 그림 2에서 나타낸 비대칭 가우시안 기상 도플러 신호의 skewness 정도를 나타내는 g 값은 약 2.87 정도이며 따라서 첨두치 속도 15 m/sec, 즉 도플러 주파수 600 Hz의 오른쪽으로 더 넓게 분산되어 나타남을 알 수 있다.

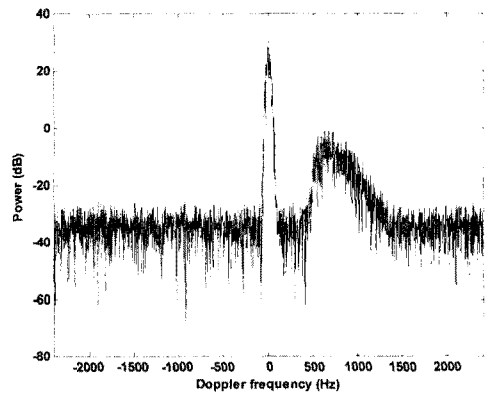


그림 2. 지표면 클러터를 포함하는 비대칭 가우시안 도플러 기상신호 (g=2.87)

Fig. 2 A skewed Gaussian Doppler weather signal with a ground clutter (g=2.87)

그림 3은 기상신호가 두 개의 첨두치 도플러 주파수, 600 Hz 및 1200 Hz를 나타내는 경우이다. 식 (6)을 사용하여 모의 구현한 경우로 여기서 r 값은 0.25로 하였으며 모델의 g 및 g' 값은 1.99 및 -2.87로 하였다. 따라서 그림 3에서 보는 것처럼 두 개의 첨두치를 갖는 기상신호 모델도 잘 나타낼 수 있음을 보여준다. 그림 4는 지표

면 클러터의 분산이 0.8 m/sec 로 다소 크게 나타나고 기상신호는 레이다로 부터 직진 방향으로 멀어지는 풍속을 가지는, 즉 두 개의 음의 첨두치 도플러 주파수를 가지는 경우로 각 모델의 g 및 g' 값은 -2.62 및 -2.87 로 설정하였다. 또한 여기에서의 SCR 값은 -20 dB 로 설정하였다.

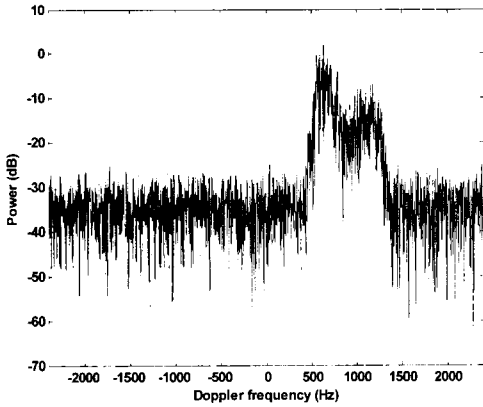


그림 3. 두개의 양의 첨두치 도플러 주파수를 갖는 비대칭 가우시안 기상신호
Fig. 3 A skewed Gaussian weather signal with two peaks of positive Doppler frequencies

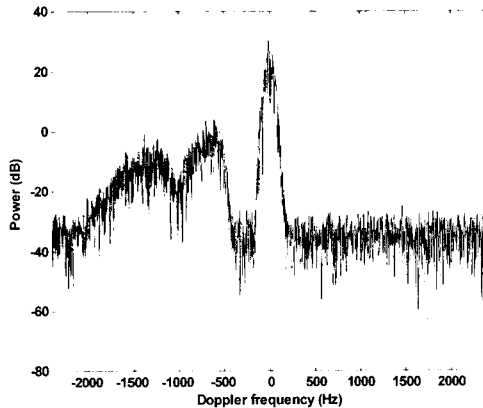


그림 4. 지표면 클러터를 포함하는 두 개의 음의 첨두치 도플러 주파수를 갖는 비대칭 가우시안 기상신호 ($r=1/3$, $g=-2.62$, $g'=-2.87$)
Fig. 4 A skewed Gaussian weather signal with two peaks of negative Doppler frequencies including the ground clutter ($r=1/3$, $g=-2.62$, $g'=-2.87$)

그림 5는 그림 4에서 모의 구현한 기상 레이다 수신 신호의 시간 축 상에서의 I 및 Q 성분을 표시하고 있다. 상대적으로 높은 주파수를 갖는 기상 도플러 신호에 매우 낮은 도플러 주파수를 가지는 강한 지표면 클러터 성분이 포함되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

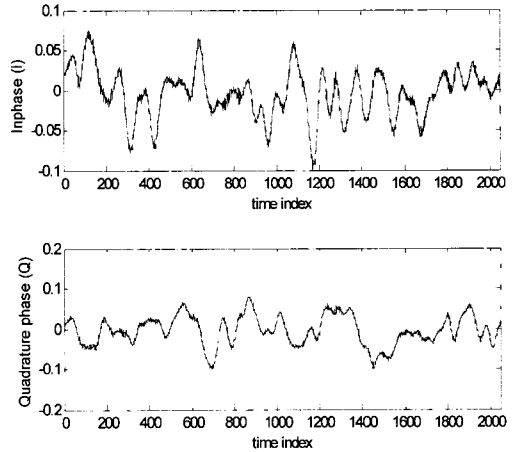


그림 5. 클러터를 포함하는 다중 피크를 갖는 기상신호(그림 4)에 대한 I 및 Q 데이터
Fig. 5 I and Q data for the multi-peak weather signal including a ground clutter(Fig.4)

V. 결론

본 논문에서는 비대칭 기상 레이다 수신 신호를 효율적으로 모의 구현 할 수 있는 방법에 관하여 고찰하였다. 제안된 모델에서 확인 할 수 있는 것처럼 각 파라미터 값들을 상황에 맞게 적절히 변경하여 줌으로서 실제 상황과 거의 유사한 기상 레이다 수신신호를 용이하게 획득 할 수 있을 것이다. 이러한 모의신호들을 이용한다면 현재 기상정보 추출을 위해 가장 널리 사용되고 있는 펄스 페어 추정방법의 정확도 및 문제점 등을 보다 체계적으로 다양한 기상 환경 하에서 분석할 수 있을 것이다.

따라서 다양한 기상 환경을 충실하게 표시하여 줄 수 있는 이러한 기상 레이다 신호의 모의구현 방법을 이용한다면 보다 효과적으로 기존의 기상 레이다 시스템의 성능 및 신뢰도 정도를 점검할 수 있을 뿐만 아니라 향후 개발하는 시스템의 성능 향상 및 검증을 위해서도 폭 넓게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] D. S. Zrníc, "Estimation of spectral moments for weather echoes", IEEE Trans. Geosci. Electron. vol. 17, pp. 113-128, 1979.
- [3] T. Berger and H. L. Groginsky, "Estimation of the spectral moments of pulse trains", Int. Conf. on Information Theory, 1973.
- [4] G. W. Snedecor, "Statistical methods", The Iowa State University Press, 1956.
- [5] R. M. Lhermitte and D. Atlas, "Precipitation motion by pulse Doppler radar", Proc. 9th Weather Radar Conference, pp. 218-223, 1961.
- [6] V. T. Wood and R. A. Brown, "Single Doppler velocity signatures: an atlas of patterns in clear/widespread precipitation and convective storms", NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-95, NOAA, Norman, Oklahoma, 1983.
- [7] D. Bernella, "Terminal Doppler weather radar operational test and evaluation", Lincoln Laboratory Report, DOT/FAA/NR-91/2, 1990.

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