
유속 레이더에서의 도플러 스펙트럼 모의구현에 관한 연구

이종길*

A Study on Simulation of Doppler Spectra in a Current Velocity Radar

Jonggil Lee*

요 약

하천 및 강등의 유속 측정을 위한 레이더에서는 수면에서 반사 또는 산란되는 전자파로부터 도플러 주파수를 추정함으로써 이에 대응하는 유속 정보를 추출하게 된다. 그러나 수면으로부터 수신되는 전자파 신호들의 도플러 스펙트럼은 측정 환경 및 기상 상태에 따라 매우 다른 형태를 나타낼 수 있다. 따라서 이러한 다양한 도플러 스펙트럼들의 존재로 인하여 레이더 센서에서의 유속정보 추출 알고리즘의 정확도 및 신뢰성에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수면으로부터 수신되는 매우 다양한 도플러 신호 스펙트럼을 적절하게 모의 구현할 수 있는 도플러 스펙트럼 모델을 제안하였다.

ABSTRACT

A current velocity measurement radar for a river or a stream estimates Doppler frequencies of return echoes to extract the corresponding surface velocity information. It is very important to maintain the reliability and accuracy of these velocity estimates for water resource management such as flooding or drought conditions. However, received Doppler spectra of water surface return echoes have very widely varying shapes according to different measurement environments and weather conditions. Therefore, serious problems may arise in maintaining the reliability and accuracy of velocity estimating algorithm in a radar sensor because of Doppler spectra which can have many different kind of shapes. Therefore, in this paper, an appropriate Doppler spectrum model is suggested to simulate many various Doppler spectra. This model can be very useful in validating the reliability and accuracy of surface velocity estimates.

키워드

도플러 스펙트럼, 유속 측정, 수면 반사파, 추정 주파수

Key word

Doppler spectrum, Current velocity measurement, Water surface return echoes, frequency estimates

* 정회원 : 인천대학교 정보통신공학과(교신저자, jnglee@incheon.ac.kr)

접수일자 : 2012. 05. 29

심사완료일자 : 2012. 07. 26

I. 서 론

레이다는 군용으로 주로 활용되는 매우 고가의 시스템으로 인식되어 왔으나 최근에 와서는 자동차 및 산업용 센서로서의 활용성이 커지고 있으며 앞으로 더 많은 민수분야에서의 응용 개발이 이루어질 것으로 기대된다[1][2]. 이러한 레이더 센서는 수자원 관리용으로도 그 중요성이 부각되고 있다. 수자원 관리를 위하여 기존의 방법으로 하천 및 강의 유속을 측정하는 것은 많은 인력과 비용 및 시간이 필요하다.

따라서 오래전부터 하천 또는 강바닥에 초음파 센서를 설치함으로써 정기적인 유속 측정을 가능하게 하는 방법을 모색하여 왔다[3]. 그러나 이러한 방법도 많은 문제점을 가지고 있는데 수중에 센서를 설치해야 한다는 어려움뿐만 아니라 강물, 하천 등에서의 토사 및 관련 유입 물들에 의한 센서의 손상 및 오동작 가능성이 크기 때문이다.

따라서 수중에 초음파 센서를 설치하는 것 보다는 강, 하천 등의 수표면 속도 측정을 할 수 있는 레이더 센서에 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 레이더는 수중에 설치할 필요가 없으므로 손상 및 장애 등이 발생할 가능성이 매우 낮으며 정기적인 점검 및 정비 등이 훨씬 용이하다. 따라서 유속 측정을 위한 레이더의 활용 가능성에 크게 주목하고 있으며 실제로 레이더로 측정된 결과들은 기존의 측정 결과 치들과 비교하여 볼 때 높은 신뢰성을 보이고 있다[4].

이러한 레이더에서의 유속 측정은 수면으로부터 산란 또는 반사되는 수신 전자파 신호의 도플러 스펙트럼으로부터 주파수 정보를 추출함으로써 이에 대응하는 속도를 나타내게 된다. 그러나 수면으로부터 수신되는 전자파 신호들은 측정 환경 및 기상 조건에 따라 매우 다양하면서도 복잡한 양상을 나타낸다. 즉 두 개의 뚜렷한 피크 값을 보이는 전형적인 브래그 공진 파에 의한 도플러 신호를 보일 때도 있고 바람의 속도 및 방향에 따라 긴 수면파가 형성되어 도플러 스펙트럼이 매우 크게 분산되어 나타나기도 한다. 또한 수면의 요동현상 및 교란 등에 의하여 비대칭적인 분산 및 크기를 갖는 형태의 도플러 스펙트럼이 얻어질 수 있다[5][6]. 그런데 이러한 도플러 스펙트럼들로부터 신뢰성 있고 정확한 유속 측정값을 얻기 위한 기존의 도플러 주파수 추정방법은 심각한 문제점을 내포하고 있다. 그러나 실제로 측정환경

이나 기상조건에 따라 달라지는 다양한 도플러 스펙트럼 형태로 인하여 기존의 도플러 주파수 추정 방법이나 새로운 알고리즘들에 대한 성능 및 효율성 검증은 실험적으로 수행한다는 것은 장기간에 걸쳐서 많은 인력 및 시간을 필요로 하기 때문에 효율적인 검증이 이루어지기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 이러한 수면으로부터 수신되는 다양한 형태로 관찰되는 레이더 에코신호를 모델링할 수 있는 효율적인 방법을 제안하고자 한다. 이러한 모의구현 모델을 이용한다면 모델링 파라미터들만을 변경함으로써 실제와 거의 유사한 매우 다양한 도플러 스펙트럼들의 생성이 가능할 것이다.

또한 이러한 방법은 실험적인 방법에서의 비교대상이 되는 기존의 기계적인 유속 측정 장치 역시 일정한 오차를 포함하고 있다는 점을 고려한다면 모의구현을 통한 시험에서에서는 비교대상 값인 정확한 참값을 알 수 있으므로 시스템 성능 평가 및 검증을 보다 더 정밀하고 효과적으로 수행할 수 있다는 장점을 가지게 된다.

II. 수면 반사파의 도플러 스펙트럼 모델

하천 및 강 등의 수면으로부터 반사 또는 산란되어 수신되는 신호는 동작환경에 따라서 매우 다양한 도플러 스펙트럼 형태를 보이게 된다. 그러나 그 형태를 크게 분류하여 본다면 Bragg 산란 효과에 의하여 일반적으로 두 개의 피크를 갖는 가우시안 형태의 스펙트럼으로 표시될 수 있다. 이러한 전자파 산란을 야기하는 Bragg 공진 조건은 다음과 같이 표시할 수 있다[7].

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

식 (1)에서의 λ_b 는 Bragg 파로 불리는 공진 수면파의 파장을 나타내며 θ 와 λ 는 각각 전자파의 수면 입사각 및 파장을 표시한다. 따라서 이러한 수면파를 고려하면 수면에서의 유속에 의한 도플러는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_d = \frac{2V_{LOS}}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} (\vec{v} \pm \vec{c}) \cdot \vec{a}_{LOS}$$

$$= \begin{cases} (|\vec{v}| \pm |\vec{c}|) / \lambda_b & \text{for positive current velocity} \\ (-|\vec{v}| \pm |\vec{c}|) / \lambda_b & \text{for negative current velocity} \end{cases} \quad (2)$$

식(2)에서 \vec{v} 벡터는 수면에서의 유속을 \vec{c} 벡터는 수면에서 양쪽으로 동시에 진행되는 수면파의 위상속도를 각각 나타낸다. 따라서 유속의 방향에 따라 양의 또는 음의 도플러 변이를 갖는 유속 도플러 주파수를 중심으로 두 개의 Bragg 도플러 스펙트럼선이 나타나게 된다.

하지만 수표면의 교란이나 바람 또는 눈, 비등의 기상 현상에 의하여 다른 수면파가 존재하는 경우 실제로 얻어지는 도플러 스펙트럼은 크게 분산되어 나타날 수 있기 때문에 두 개의 피크가 명확히 형성되지 않는 경우도 있을 수 있다. 또한 생성되는 수면파의 특성에 따라 각각의 도플러 스펙트럼들이 비대칭적인 형태 즉, 다른 한쪽의 도플러 주파수 분산이 크게 다르게 나타나는 심하게 편이된 형태의 가우시안(skewed Gaussian) 형태를 나타낼 수도 있다. 따라서 이러한 다양한 형태의 도플러 스펙트럼들을 나타내기 위하여 우선 다음과 같은 비대칭 가우시안 모델을 제안하였다.

$$D(f) = \begin{cases} \frac{2}{1+r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}w_1} \exp\left(-\frac{f^2}{2w_1^2}\right) & \text{for } f \leq 0 \\ \frac{2r}{1+r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}w_2} \exp\left(-\frac{f^2}{2w_2^2}\right) & \text{for } f > 0 \end{cases} \quad (3)$$

식(3)에서 w_1 과 w_2 는 각 영역에서의 스펙트럼 분산 정도를 표시하는, 즉 스펙트럼 폭을 나타내는 변수이다. 이러한 스펙트럼 모델의 전체 분산은 $(w_1^2 + rw_2^2)/(1+r)$ 로 표시될 수 있으며 식(4)에서의 r 은 각각의 스펙트럼 폭의 비로 $r=w_1/w_2$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 r 은 도플러 스펙트럼의 편이(skewness) 정도를 표시하게 되는 파라미터, 즉 g 값을 결정하게 된다. skewness 정도를 표시하는 g 의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

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

도플러 첨두치는 2개 이상 나타날 수 있으며 이러한 첨두치를 갖는 각각의 도플러 스펙트럼의 수신 전력 값도 크게 다르게 나타날 수 있다. 따라서 매우 다양한 수신 도플러 스펙트럼 형태를 표시하기 위해서는 식(3)을 이용하여 보다 더 일반적인 도플러 전력 스펙트럼 모델을 다음과 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$S(f) = \sum_{i=0}^{M-1} A_i D(f - f_i; w_{2i}, w_{2i+1}) \quad (5)$$

식(5)에서 A_i 는 다수의 첨두치를 형성하는 각각의 도플러 스펙트럼 전력들의 크기를 표시하기 위한 파라미터이며 전체적으로 정규화 된 수신 신호 스펙트럼 전력의 상대적인 크기를 각각 나타내고 있으므로 전체적인 합은, $\sum_{i=0}^{M-1} A_i = 1$ 로 표시할 수 있다. 따라서 상대적인 전력비를 나타내는 파라미터 r 값은 다음과 같이 표시될 수 있을 것이다.

$$r_{ij} = \frac{A_j}{A_i} \quad \text{where } i, j = 0, \dots, M-1 \quad (6)$$

또한 식(5)에서 f_i 는 중심 도플러 주파수를 나타내며 w_{2i} 및 w_{2i+1} 는 i 번째 도플러 스펙트럼의 좌우 비대칭성을 표시하는 스펙트럼 폭을 의미하며 대칭형 가우시안 스펙트럼 모델인 경우 같은 값을 가지게 된다. 따라서 이러한 일반적인 모델을 이용하면 실제적으로 얻어질 수 있는 매우 다양한 환경 하에서의 도플러 수신 스펙트럼을 모의구현 할 수 있다.

본 논문에서는 레이더 유속 측정 시 대부분의 경우에서 볼 수 있는 즉, $M=2$ 인 두 개의 피크 치를 갖는 가우시안 도플러 모델의 모의구현 결과를 중점적으로 고찰하였다.

III. 도플러 스펙트럼 모의구현 방법

유속 측정 레이더에 수신되는 시간영역에서의 I 및 Q 신호는 수표면 도플러 반사파로서 각각 서로 독립적인 랜덤변수로 볼 수 있으므로 I와 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 된다. 즉, I 및 Q 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(i) + jQ(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{P_k} \exp(j\theta_k) \exp(j \frac{2\pi ki}{N}) \quad (7)$$

식(7)에서 N 은 샘플링 된 데이터 숫자를 표시하며 P_k 는 신호와 배경잡음을 합한 순간전력 값으로서 지수 함수적인 분포를 θ_k 는 0 에서 2π 사이의 균일한 분포를 가지게 된다. 즉, 순간전력에 대한 확률밀도 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$p(P_k) = \frac{1}{(S_k + np)} \exp\left[-\frac{P_k}{(S_k + np)}\right] \quad (8)$$

식(8)에서의 np 는 배경잡음 즉 균일한 잡음 전력밀도를 나타내며 따라서 샘플링 된 시스템의 전체 배경잡음 전력은 $NP = N \times np$ 로 표시될 수 있다.

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.

$$SNR = \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} = \frac{\sum_{k=1}^N S_k}{NP} \quad (9)$$

그러므로 식(9)에서 설정된 SNR 값 및 수표면 반사 신호의 도플러 스펙트럼 파라미터들을 이용하여 배경잡음을 포함하는 수표면 도플러 신호를 얻을 수 있다. 보다 효율적인 모의구현을 위하여 식(8)과 같이 표시되는 지수분포를 일반적으로 많이 쓰이는 균일 분포를 갖는 0에서 1사이의 랜덤변수로 얻기 위한 방법을 표시하여 보자. X_k 를 0과 1 사이의 균일 분포를 갖는 랜덤변수라고 하면 기본적인 확률이론에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립함을 알 수 있다.

$$p(P_k)dP_k = p(X_k)dX_k \quad (10)$$

식(10)의 양변을 각각 0에서 P_k , 0에서 X_k 까지 적분하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$P_k = -\ln(X_k) \times (S_k + np) \quad (11)$$

IV. 클러터 모델

유속 측정 레이더의 빔 특성 및 동작환경 등을 고려하여 볼 때 클러터로 분류되는 레이더 수신신호는 주로 안테나의 부엽에 의하여 발생하게 된다. 이러한 부엽들이 적절한 수준까지 충분히 억제되지 않는 경우에는 수표면 주변의 지면이나 근거리 인공 구조물 등 상대적으로 높은 RCS(radar cross section)를 가질 수 있는 물체들에 의한 강력한 반사 클러터들이 나타날 가능성이 높아진다. 반사되는 도플러 클러터는 일반적으로 도플러 주파수 0 을 중심으로 하는 가우시안 모델로 나타낼 수 있겠다. 그러나 높은 풍속에서는 상대적으로 클러터 분산이 많이 일어나게 되므로 분산 파라미터 값이 큰 가우시안 도플러 모델을 적용하여야 할 것이다. 또한 건물 및 인공구조물에 의한 클러터는 분산이 매우 작은 즉, 매우 폭이 좁은 대칭형 가우시안 형태로 표시될 수 있으므로 분산에 관계된 입력변수의 조정으로 이러한 클러터의 발생이 가능하게끔 하였다. 즉, 클러터에 의한 일반적인 도플러 스펙트럼 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CL(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}W_{CL}} \exp\left[-\frac{(f - f_{CL})^2}{2W_{CL}^2}\right] \quad (12)$$

식(12)에서의 f_{CL} 및 W_{CL} 은 대칭형 가우시안 클러터 모델에서의 클러터 중심주파수 및 분산을 각각 표시한다. 또한 이러한 대칭형 클러터 모델 뿐 만 아니라 본 논문에서 제안 한 것과 같이 skewness 정도를 고려한 비대칭 클러터의 발생도 가능하다.

V. 결과 분석 및 고찰

모의구현 결과에서 전형적인 브래그 스펙트럼 라인이 형성되는 것을 확인하기 위하여 유속이 +1.73 m/sec 이며 수면에서의 브래그 공진에 의하여 일어나는 표면파의 위상속도를 0.23 m/sec 정도로 가정하여 보았다. 이러한 경우 (1.73 ± 0.23) m/sec 에 해당하는 도플러 주파수에서 두 개의 스펙트럼 라인이 나타나게 될 것이다. 레이더 동작 주파수는 24GHz ISM 대역의 중심주파수인 24.125 GHz 를 사용하는 것으로 가정하였다. 그림 1 에 모의 구현한 결과를 표시하였다. 그림 1에서는 레이더 조향 각도에 의한 수면 입사각을 60도로 SNR 값을 15dB 로 설정하였으며 스펙트럼의 전력의 크기가 같은 두 개의 대칭적인 스펙트럼 모델을 이용하였다. 각각의 스펙트럼 폭은 0.03 m/sec 로 표면파 분산에 의한 표준편차를 나타낸다. 그림 1의 결과에서 볼 수 있는 것처럼 비교적 명확하게 구분되는 두 개의 스펙트럼 첨두치를 관찰할 수 있으며 실제 표면 유속에 대응되는 도플러 주파수는 이러한 두 첨두치 또는 전체 스펙트럼에 대한 평균값으로 구해질 수 있을 것이다.

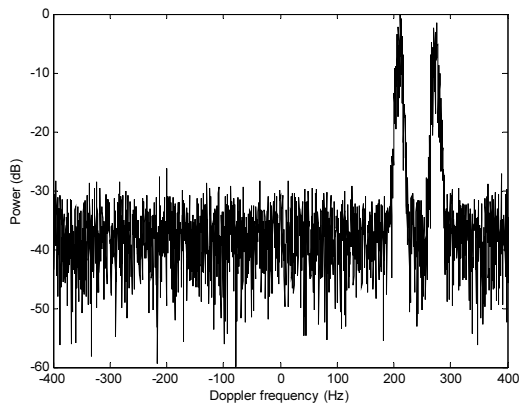


그림 1. 입사각 60도, 유속 +1.73 m/sec 인 경우의 수신 도플러 스펙트럼

Fig. 1 A received Doppler spectrum for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of +1.73 m/sec

이제 유속의 방향이 반대이며 바람 등 기상조건이나 다른 측정환경의 변화에 따라 수면의 표면파가 상당한 정도로 분산되어 나타나는 경우를 표시하여 보았다. 그

림 2에서의 경우도 수면 입사각은 60도로 하였으며 SNR 은 15dB 로 가정하여 모의 구현한 결과이다. 수표면 유속의 방향이 레이더에서 멀어지는 반대 방향이기 때문에 음의 도플러 주파수로 표시되었으며 브래그 표면파의 분산에 의한 표준편차인 도플러 스펙트럼 폭이 0.1 m/sec 로 다소 크게 나타나는 경우이기 때문에 명확하게 구분되는 두 개의 스펙트럼 모양이 형성되지 않는다. 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 두 개의 대칭형 도플러 모델의 일부구간은 서로 겹쳐지면서 나타나게 된다. 여러 가지 요인에 의하여 이렇게 브래그 표면파의 분산이 다소 크게 일어나는 경우에는 정확한 표면 유속 측정에 문제점이 나타날 수 있다. 즉, 표면파의 분산 정도가 매우 커서 넓은 구간에 걸쳐서 스펙트럼이 중첩되면 두 개의 첨두치가 나타나지 않는 경우도 발생할 수 있다. 또한 두 개의 브래그파의 스펙트럼이 비대칭성이거나 각 스펙트럼의 전력크기가 매우 상이하게 나타나날 경우에도 브래그 파에 의한 두 개의 도플러를 구별하는 것이 매우 어려울 수 있다.

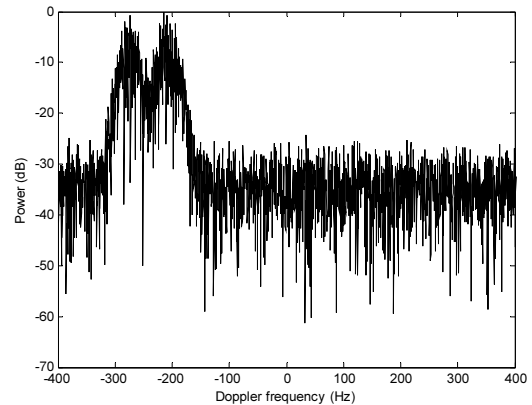


그림 2. 입사각 60도, 유속 -1.73 m/sec 인 경우의 수신 도플러 스펙트럼

Fig. 2 A received Doppler spectrum for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of -1.73 m/sec

그림 3 은 표면파의 분산 정도가 매우 커서 상당부분이 서로 중첩되면서 두 개의 도플러 스펙트럼 첨두치를 볼 수 없는 경우를 나타낸 모의구현 결과이다. SNR은 15dB 로 표면유속은 0.77m/sec 로 가정하였으며 표면파의 분산에 의한 표준편차를 나타내는 각각의 대칭형 모

텔에서의 대응되는 스펙트럼 폭은 0.3 m/sec 로 하였다. 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 유속에 의하여 도플러 천이된 표면파에 의한 침두치가 각각 0.54 m/sec 및 1.0 m/sec 에 대응되는 도플러 주파수에서 나타나야 하지만 표면파의 매우 큰 분산으로 인하여 두 개의 침두치를 구별하는 것이 매우 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

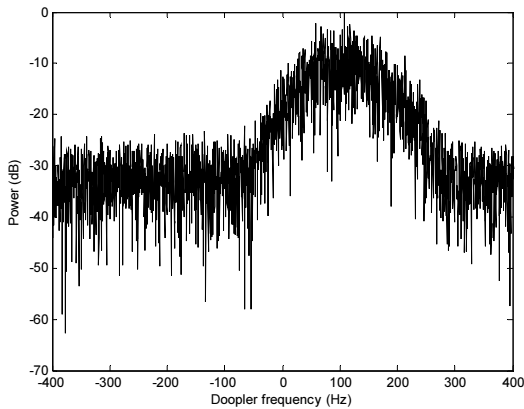


그림 3. 입사각 60도, 유속 0.77 m/sec 이며 분산이 매우 큰 경우의 수신 도플러 스펙트럼
Fig. 3 A received Doppler spectrum with a very large variance for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of 0.77 m/sec

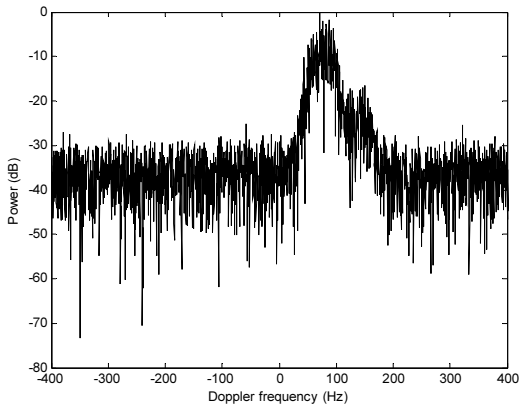


그림 4. 입사각 60도, 유속 0.77 m/sec 이며 스펙트럼 폭 0.1m/sec , r12=15dB 인 경우의 수신 도플러 스펙트럼
Fig. 4 A received Doppler spectrum having an unequal power ratio of r12=15dB with a spectrum width of 0.1m/sec for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of 0.77m/sec

이제 브래그 파에 의하여 형성되는 두 개의 스펙트럼이 비대칭형으로 나타나거나 각 스펙트럼의 전력 값이 서로 다르게 나타나는 경우의 모의 구현 결과를 살펴 보았다. 그림 4의 경우는 각각의 스펙트럼 폭에 대응하는 표준편차 값은 0.1m/sec 로 설정한 경우이다. 전체적인 SNR 은 15dB 로 설정하였으나 다른 한쪽의 도플러 스펙트럼 전력 값이 상대적으로 약하기 때문에 두 개의 침두치를 정확하게 구별하기가 쉽지 않은 경우임을 알 수 있다. 그림 4에서는 약 15dB의 전력 차이가 나는 경우를 가정하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 유속 측정 레이더에 수신되는 다양한 도플러 스펙트럼들을 모의 구현 할 수 있는 방법을 제안하였다. 결과 그림들에서 볼 수 있는 것처럼 클러스터 및 브래그파 도플러 천이에 의하여 발생하는 도플러 신호들을 실제와 거의 유사하게 모의 구현 할 수 있었다. 또한 동작 환경이나 기상여건 등을 고려하여 스펙트럼 모델에서의 파라미터 값들을 임의로 적절하게 조절함으로써 어떤 형태의 수신 신호도 스펙트럼 영역이나 시간 영역에서 모의 구현이 가능할 수 있음을 보였다.

다양한 동작 환경 및 기상조건에서의 성능평가를 위한 현장 실험은 실제적으로는 매우 어려운 일이며 또한 비교대상이 되는 유속의 정확한 참값을 구한다는 것도 매우 힘든 일중의 하나이다. 그러므로 본 논문에서 제안한 방법을 활용한다면 매우 다양한 측정 환경에서의 수신 신호들을 모의 구현할 수 있게 됨으로서 유속 측정 알고리즘의 검증이나 유속 측정 레이더 성능 평가에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] G. L. Charvat and L. C. Kempel, "Synthetic aperture radar imaging using a unique approach to frequency-modulated continuous-wave radar design", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, pp. 171-177, vol. 48, no. 1, 2006.

- [2] A. Tessmann et al., "Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, pp. 2995-3001, vol. 50, no.12, 2002.
- [3] Y. Doisy, "Theoretical accuracy of Doppler navigation sonars and acoustic Doppler current profilers", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 430-441, vol. 29, no. 2, 2004.
- [4] N. B. Melcher et al., "River discharge measurements by using helicopter-mounted radars", *Geophys. Res. Lett.*, no. 22, vol. 29, pp. 2084-2084, 2002.
- [5] W. J. Plant and W. C. Keller, "Evidence of bragg scattering in microwave Doppler spectra of sea return", *J. Geophys. Res.*, pp. 16299-16310, vol. 95, no. C9-16, 1990.
- [6] R. F. Contreras and W. J. Plant, "Ku-band backscatter from the Cowlitz River: Bragg scattering with and without rain", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, pp. 1444-1449, vol. 42, no. 7, 2004.
- [7] F. G. Bass et al., "Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface, part II: Scattering from an actual sea surface", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, pp. 560-568, vol. 16, no. 5, 1968.
- [8] G. W. Snedecor, *Statistical Methods*, The Iowa State University Press, 1956.

저자소개



이종길(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
※ 관심분야: 무선통신, 레이더신호처리, 레이더시스템