

유속 측정 레이더에서의 도플러 주파수 추정에 관한 연구

이종길*

A Study on Estimation of Doppler Frequency in a Current Velocity Measurement Radar

Jonggil Lee *

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

요 약

수자원 관리를 위하여 활용되고 있는 레이더 센서는 도플러 주파수를 추정함으로써 표면 유속을 측정한다. 따라서 도플러 주파수 추정치에서의 높은 신뢰성 및 정확도가 요구된다. 그러나 유속 관련 도플러 스펙트럼은 측정 환경 및 기상 상태에 따라 매우 다양한 형태를 나타낼 수 있다. 따라서 현재 레이더 센서에서 사용되는 기존의 유속정보 추출 알고리즘의 정확도 및 신뢰성에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 방법을 개선할 수 있는 도플러 스펙트럼 침투치 주파수 추정에 의한 유속 정보 추출 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존 방법에 비하여 더 정확한 유속의 측정이 가능함을 보여준다.

ABSTRACT

A current velocity measurement radar estimates Doppler frequencies to extract the corresponding surface velocity information. Therefore, it is required to maintain the high degree of reliability and accuracy of Doppler frequency estimates. However, Doppler spectra of water surface return echoes can have very widely varying shapes according to measurement environments and weather conditions. Therefore, serious problems may arise in maintaining the reliability and accuracy of conventional velocity estimating algorithm in a radar sensor. Therefore, in this paper, a newly suggested algorithm is proposed for improvement using estimation of peak Doppler frequencies. The proposed method shows that the more accurate velocity measurement can be possible comparing with the conventional one.

키워드 : 가우시안 도플러 스펙트럼, 유속 측정, 침투치 추정, 도플러 주파수 추정

Key word : Gaussian Doppler spectrum, Current velocity measurement, Peak estimation, Doppler frequency estimation

접수일자 : 2013. 03. 28 심사완료일자 : 2013. 04. 23 게재확정일자 : 2013. 05. 17

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

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.7.1551>

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

전자파를 이용한 레이더 시스템은 최근에 와서 자동차 및 산업용 센서로서의 활용성이 커지고 있으며 이외에도 다양한 응용분야에서의 연구가 진행되고 있다 [1-2]. 앞으로도 더 많은 민수분야에서의 연구 개발이 이루어질 것으로 기대된다. 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 수중에 센서를 설치해야 한다는 어려움뿐만 아니라 강물, 하천 등에서의 토사 및 관련 유입 물들에 의한 센서의 손상 및 오동작 가능성이 크기 때문이다.

따라서 강, 하천 등의 수표면 속도 측정을 할 수 있는 레이더 센서에 관련된 연구가 이루어지고 있다. 이러한 레이더는 손상 및 장애 등이 발생할 가능성이 매우 낮으며 정기적인 점검 및 정비 등이 훨씬 용이하다. 실제로 레이더로 측정된 결과들은 기존의 측정 결과치들과 비교하여 볼 때 높은 신뢰성을 보이고 있다[4].

이러한 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 반사파 도플러 스펙트럼의 비대칭성 또는 편향 현상 문제 때문에 기존의 도플러 스펙트럼 추정을 통한 방법으로는 신뢰성 있고 정확한 유속 측정 값을 얻기가 매우 어렵다. 따라서 이러한 측정환경의 변화에 무관하게 표면 유속 정보를 정확하고 지속적으로 측정하게 위해서는 기존 유속 추정방법의 개선이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 기존의 도플러

주파수 추정방법의 한계점을 극복하기 위하여 반사파 도플러 스펙트럼내의 정현파 분석을 통한 스펙트럼 피크치 추정에 의한 유속 측정 방법을 제안하였다.

우선 제안된 방법을 더 정확하고 효율적으로 검증하기 위하여 매우 다양한 환경에서 발생할 수 있는 여러 가지 스펙트럼 모델들을 이용하여 모의신호들을 발생시켰다. 이렇게 얻어진 다양한 모의신호들을 이용하여 제안된 방법을 적용하여 각각의 유속추정 결과 값들을 구하였으며 그 값들을 기존의 방법에 의한 추정 값들과 비교하고 분석하였다.

II. 수면 반사 신호의 스펙트럼 특성

하천 및 강 등의 수면으로부터 반사 또는 산란되어 수신되는 전자파 신호는 일반적으로 수신 단에서 기저대역으로 변환한 후 도플러 주파수 영역의 신호를 획득하게 된다. 이러한 수신 도플러 스펙트럼은 기상 변화 또는 유속 측정 환경에 따라서 매우 다양한 형태를 나타낼 수 있다. 그러나 일반적으로 자주 나타나며 대표적인 형태로 볼 수 있는 것은 브래그(Bragg) 산란 효과에 의하여 두 개의 피크치를 갖는 가우시안 형태의 대칭적인 도플러 스펙트럼이다. 수면 유속뿐만 아니라 수 표면에서의 이러한 전자파 반사 및 산란을 야기하는 브래그 공진 조건에 의한 수면파를 고려한 수신 도플러 스펙트럼의 주파수는 다음과 같이 표시 될 수 있다[5-7].

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

$$= \begin{cases} (|\vec{v}| \pm |\vec{c}|) / \lambda_b & \text{for positive current velocity} \\ (-|\vec{v}| \pm |\vec{c}|) / \lambda_b & \text{for negative current velocity} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서의 λ_b 는 Bragg 파로 불리는 공진 수면파의 파장으로 다음과 같이 나타낸다.

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

여기서 θ 와 λ 는 각각 수면의 수직방향에 대한 전자파 입사각 및 파장을 나타내며 \vec{a}_{LOS} 는 시선 방향 벡터를

표시한다. 식(1)에서 표시한 v 벡터는 수면에서의 유속을 c 벡터는 수면에서 양쪽으로 동시에 진행되는 수면파의 위상속도를 각각 나타낸다. 따라서 유속의 방향에 따라 양의 또는 음의 도플러 변이를 갖는 유속 도플러 주파수를 중심으로 대칭적인 두 개의 브래그 도플러 스펙트럼선이 나타나게 된다.

그러나 수표면의 교란이나 바람 또는 눈, 비등의 기상현상에 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 편이 된 형태의 가우시안(skewed Gaussian) 형태를 나타낼 수도 있다. 또한 각각의 도플러 스펙트럼 수신전력 수준도 매우 심각한 차이를 보일 수 있다.

따라서 이러한 다양한 형태의 도플러 스펙트럼 모의 신호들을 이용하여 유속 측정을 위하여 제안된 방법의 성능 정도를 기존의 방법과 비교, 분석하였다.

III. 유속 측정을 위한 도플러 주파수 추정

유속 측정 레이더에 수신되는 도플러 신호는 최종적으로 기저 대역에서의 I 및 Q 신호로 표시된다. 이러한 시간영역에서 나타나는 도플러 주파수를 추정하기 위해서 일반적으로 푸리에 변환을 통한 도플러 필터뱅크를 구현하여 수신 스펙트럼을 얻게 된다. 이렇게 얻어진 도플러 스펙트럼을 이용하여 수 표면유속정보의 추출 및 수면에서의 와류 현상이나 교란 정도(turbulence) 등에 대한 정보를 얻기 위하여 평균도플러 주파수 및 스펙트럼의 분산 정도 등을 추정하게 된다. 이러한 평균 도플러 주파수나 분산의 추정은 도플러 필터뱅크 구현을 위한 푸리에 변환 과정을 거치지 않고도 시간 영역에서의 I, Q 신호의 자기상관 함수(autocorrelation)를 이용하여 추정할 수도 있다. 그러나 수신 도플러 스펙트럼의 분산이 커지거나 비대칭적인 경우 추정치에서의 편이현상이나 오차가 심하게 일어날 수 있다[8]. 따라서 일반적으로 사용하는 기존의 방법은 N 개의 필터뱅크를 구현하여 도플러 스펙트럼을 추정한 후 다음과

같이 스펙트럼의 평균 도플러 주파수 및 분산을 추정하여 수면에서의 유속 및 교란정도 등에 대한 정보를 추출한다.

$$\hat{f}_d = \frac{\sum_{i=1}^N f_i S(f_i)}{\sum_{i=1}^N S(f_i)}, \quad \hat{w}_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \hat{f}_d)^2 S(f_i)}{\sum_{i=1}^N S(f_i)} \quad (3)$$

식(3)에서 N 은 DFT(Discrete Fourier Transform) 또는 FFT(Fast Fourier Transform)를 통하여 도플러 스펙트럼 영역에서 불연속적으로 나타나는 값들의 전체 숫자를 표시한다. 수표면 유속 추정치의 해상도는 이에 대응하는 도플러 스펙트럼의 해상도(resolution)와 같으며 이는 시간영역에서의 도플러 신호의 관찰 시간(observation period)에 의하여 결정된다. 추정치에서의 모호성(ambiguity) 문제가 발생하지 않는 최대 유속은 도플러 신호의 시간 영역 샘플링 간격에 의하여 결정된다. 유속정보만을 추출하는 경우 거리의 모호성(ambiguity)이 문제가 되지 않기 때문에 펄스 레이더의 경우 펄스 반복주파수를 높이거나(pulse repetition frequency) CW 레이더의 경우에는 기저대역에서의 샘플링 주파수를 증가시킴으로서 최대 유속에 대한 측정 범위를 높일 수 있다. 또한 유속 측정을 위한 레이더 센서의 일반적인 응용에서는 추정 또는 측정된 유속 값의 갱신 주기가 비교적 긴 편이기 때문에 신호의 관찰 시간을 충분히 증가시킬 수 있으며 따라서 식(3)에서의 도플러 전력스펙트럼 $S(f_i)$ 의 해상도를 적절히 유지하는 데에는 큰 어려움이 없다. 그러나 도플러 스펙트럼이 앞에서 기술한 바와 같이 여러 개의 비대칭 스펙트럼 첨두치를 갖거나 또는 편향되어 나타나거나 분산이 심하게 일어나는 경우 등 레이더 센서의 운용환경, 즉 바람, 강우 등의 기상환경에 따라 실제로 수신되는 도플러 스펙트럼은 매우 다양한 형태로 나타날 수 있다. 이러한 경우 식(3)에서의 유속 추정 값은 실제 유속 값과는 상당한 오차를 보일 수 있다. 따라서 이러한 기존의 방법을 개선하기 위하여 수신 도플러 스펙트럼의 첨두치들을 추정함으로써 유속을 측정하는 방법을 제안하였다.

IV. 유속 도플러 스펙트럼 침두치 추정 방법

수신 신호의 주파수 영역 스펙트럼 추정을 위해서는 앞에서 기술한 바와 같이 푸리에 변환을 하기 위하여 DFT 방법을 적용한다. 일반적으로 계산 량 측면에서 훨씬 효율적인 FFT(Fast Fourier Transform) 기법이 주로 사용되고 있다. 그러나 제한된 데이터 획득시간으로 인한 스펙트럼의 해상도 문제나 데이터 윈도우 등에 의한 누설 현상 등으로 동적영역이 매우 크게 나타나는 신호들에 대한 정확한 스펙트럼 추정은 매우 어렵다. 이러한 경우 주파수 영역 신호 모델에서의 파라미터 추정 방법을 통하여 더 정확한 스펙트럼 추정을 수행할 수 있으나 상대적으로 많은 연산 시간이 필요하다. 그러나 응용 목적에 따라서는 전체 스펙트럼을 추정하지 않고도 주가 되는 몇 개의 정현파 신호 주파수만을 추정함으로써 시스템의 성능 향상을 기대할 수 있다.

유속 레이더에서의 수신 신호는 동작 환경이나 수표면 유속의 급격한 변화 등에 의하여 유속 도플러 스펙트럼이 비대칭이면서 두 개 이상의 침두치를 가질 수 있다. 그런데 이와 같이 분산도가 각각 다를 뿐만 아니라 두 개 이상의 서로 다른 전력 침두치를 갖는 스펙트럼에서의 평균치 추정은 실제 표면 유속에 대응하는 도플러 주파수 추정치와는 상당한 오차를 보이며 때로는 무의미한 결과를 나타내기도 한다.

따라서 본 논문에서는 두 개의 침두치를 갖는 수표면 반사 도플러 스펙트럼에서의 도플러 주파수, 즉 유속을 추정하기 위하여 하모닉 신호에서의 고유 벡터를 이용한 스펙트럼 추정방식의 하나인 EV(eigenvector) 방법을 적용하였다[9]. 따라서 M 개의 복소 정현파 신호가 존재하는 경우라면 p 개의 고유벡터(eigenvectors) 및 M 개의 주 고유벡터(principal eigenvectors)를 갖는 자기 상관 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,

$$\sum_{k=M+1}^p \alpha_k \left| \mathbf{e}^H(f) \mathbf{v}_k \right|^2 = 0 \quad (4)$$

여기에서 \mathbf{v} 는 잡음 부 공간 고유벡터를 \mathbf{e} 는 복소 정현파 신호벡터를 각각 표시하며 H 는 Hermitian 을 나

타낸다. 신호의 샘플링 시간을 T_s 라고 하면 식 (4)에서의 복소 정현파 신호벡터는 식(5)와 같이 표시된다.

$$\mathbf{e} = [1 \exp(j2\pi fT_s) \cdots \exp(j2\pi fMT_s)]^T \quad (5)$$

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

$$P(f) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^p \alpha_k \left| \mathbf{e}^H(f) \mathbf{v}_k \right|^2} \quad (6)$$

그러나 실제로는 추정오차로 인하여 각 정현파 주파수에서 가파른 침두치를 형성하게 된다. 본 논문에서 적용한 EV 방법은 식 (6)에서의 가중치, α_k 를 각 잡음 부공간 고유벡터에 대응하는 고유 값(eigenvalue), λ_k 의 역수로 하는 방식이다. 이러한 방식을 쓰게 되면 스펙트럼에서 잘못된 침두치 주파수 추정이 일어나는 경우를 억제할 수 있다[10-11].

수면으로부터 수신되는 도플러 스펙트럼은 기상환경, 또는 레이더 센서의 운용 환경에 따라 다양한 형태를 보일 수는 있으나 표면 유속 추정을 위해서는 침두치가 나타나는 주파수, 즉 복소 정현파의 수 M을 2 개로 하는 것이 가장 적절하다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 EV 방법을 적용하여 두 개의 정현파에 대응하는 침두치 도플러 주파수를 추정하고 침두치 값의 크기 여부에 상관없이 두 개의 도플러 주파수들의 평균값으로 유속 정보를 추출하는 것이다.

V. 결과 분석 및 고찰

먼저 유속이 -1.62 m/sec 이며 수면에서의 브래그 공진에 의하여 일어나는 표면파의 위상속도를 0.23 m/sec 정도로 가정하여 브래그 스펙트럼의 분산이 비교적 크게 형성되는 경우를 고찰하여 보았다. 이러한 경우 그림 1에서 보는 바와 같이 (-1.62±0.23) m/sec 에 해당하는 도플러 주파수에서 다소 분산된 형태의 두 개의 스펙트럼 라인이 나타나게 될 것이다. 레이더 동작 주파

수는 24GHz ISM 대역의 중심주파수인 24.125 GHz 를 사용하는 것으로 가정하였다. 그림 1에서의 모의 신호는 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 0.1 m/sec 로 표면파 분산에 의한 표준편차를 나타낸다.

그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 두 개의 대칭형 도플러 모델의 일부구간은 서로 겹치지면서 나타나게 된다. 이러한 경우 유속정보에 대응하는 도플러 주파수 추정값은 식(3)에 의한 기존 방법을 사용하면 -212.85 Hz 로 표시된다. 제안된 방법을 적용하면 그림 1에 다이아몬드로 표시된 2개의 첨두치 추정 도플러 주파수의 평균값인 -223.49 Hz 를 얻게 된다. 표면 유속에 대응하는 도플러 주파수의 참값이 -224.47 Hz 이므로 제안된 방법을 이용하면 거의 정확한 도플러 추정치를 얻을 수 있다. 그러나 기존의 방법에 의해서는 무시할 수 없을 정도의 상당한 오차가 발생할 수 있음을 보여준다. 즉, 브래그 표면파의 분산이 다소 크게 일어나는 경우에는 정확한 표면 유속 측정에 문제점이 나타날 수 있다.

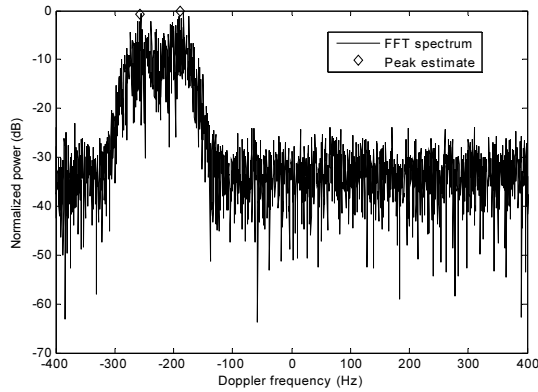


그림 1. 입사각 60도, 유속 -1.62m/sec이며 분산이 큰 경우의 수신 도플러 스펙트럼
Fig. 1 A received Doppler spectrum with a large variance for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of -1.62 m/sec

표면파의 분산 정도가 매우 커서 넓은 구간에 걸쳐서 스펙트럼이 중첩되거나 또한 두 개의 브래그파의 스펙트럼이 비대칭적이거나 각 스펙트럼의 전력크기가 매우 상이하게 나타날 경우에는 기존의 방법에 의한 도플러

주파수 추정 오차가 더욱 심하게 발생할 수 있다.

그림 2는 표면파의 분산정도가 매우 커서 상당부분이 서로 중첩되면서 두 개의 도플러 스펙트럼 첨두치를 볼 수 없는 경우를 나타낸다. SNR은 15dB 로 표면유속은 0.75m/sec 로 가정하였으며 표면파의 분산에 의한 표준편차를 나타내는 각각의 대칭형 모델에서의 대응되는 스펙트럼 폭은 0.3 m/sec 로 하였다. 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 유속에 의하여 도플러 천이된 표면파에 의한 첨두치가 각각 0.52 m/sec 및 0.98 m/sec 에 대응되는 도플러 주파수에서 나타나야 하지만 표면파의 매우 큰 분산으로 인하여 FFT 스펙트럼에서 두 개의 첨두치를 구별하는 것이 매우 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

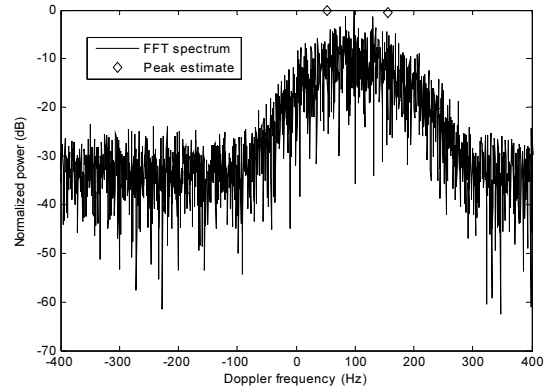


그림 2. 입사각 60도, 유속 0.75m/sec이며 분산이 매우 큰 경우의 수신 도플러 스펙트럼
Fig. 2 A received Doppler spectrum with a very large variance for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of 0.75 m/sec

그러나 그림 2에서 보는 바와 같이 첨두치 추정을 이용하는 제안된 방법을 적용할 경우 거의 정확하게 두 개의 피크 도플러 주파수를 추정할 수 있다. 따라서 이러한 경우 실제 유속 값에 대응하는 도플러 주파수, 103.92 Hz 와 거의 유사한 추정 값, 103.49 Hz 를 얻을 수 있다. 기존의 방법을 적용할 경우 97.70 Hz 의 추정치를 얻을 수 있는데 정확도가 다소 떨어지지만 심각한 오차라고 하기는 어렵다. 기존의 방법이 스펙트럼의 큰 분산에도 오차가 비교적 적은 이유는 분산 정도의 편향성 및 전력 차이가 없다고 가정하였기 때문이다.

이제 브래그 파에 의하여 형성되는 두 개의 스펙트럼에 대한 전력 값이 서로 다르게 나타나거나 편이 되는

경우를 살펴보았다. 먼저 표면에 의하여 형성되는 두 개의 도플러 스펙트럼 전력 값이 서로 상이하게 나타나는 경우를 그림 3에 표시하였다. 이 경우는 각각의 스펙트럼 폭에 대응하는 표준편차 값은 0.08m/sec 로 설정한 경우이다. SNR은 15dB 로 설정하였으나 다른 한쪽의 도플러 스펙트럼 전력 값이 상대적으로 10dB 정도 약하게 나타날 뿐 아니라 분산도 비교적 커서 두 개의 침두치가 정확하게 구별되지 않는 경우이다. 앞에서와 마찬가지로 실제 유속 도플러 주파수는 103.92 Hz 이나 기존의 방법으로는 76.89 Hz 를 제안한 방법으로는 98.25 Hz 의 추정치를 각각 얻을 수 있다. 제안된 방법에도 약간의 오차가 존재하는데 이는 상대적으로 약한 전력을 갖는 두 번째 도플러 성분에서의 침두치 추정이 실제 보다 다소 작게 나타나기 때문이다. 그 이유는 분산으로 인하여 상대적으로 큰 도플러 전력을 갖는 첫 번째 도플러 스펙트럼 성분이 두 번째 침두치 추정 값에 상당한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 그러나 기존 방법에 비해서는 정확도가 상대적으로 크게 향상되었다고 할 수 있을 것이다.

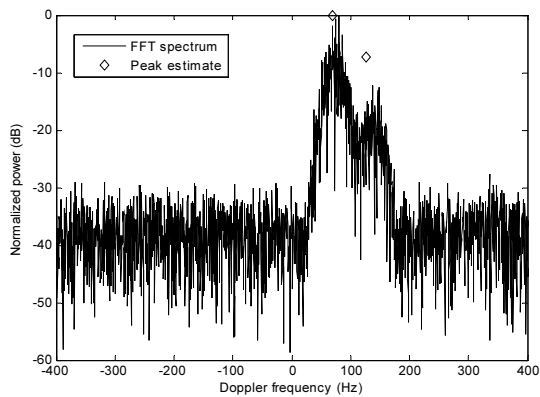


그림 3. 입사각 60도, 유속 0.75 m/sec 이며 스펙트럼 폭 0.08m/sec, 전력비 10dB 인 경우의 수신 도플러 스펙트럼
Fig. 3 A received Doppler spectrum having an unequal power ratio of 10dB with a spectrum width of 0.08m/sec for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of 0.75 m/sec

그림 4의 경우는 왼쪽에 0.1m/sec 의 스펙트럼 폭을 갖는 대칭형 도플러 스펙트럼이 나타나고 오른쪽에는 비대칭적인 가우시안 스펙트럼, 스펙트럼 편이가 일어난 경우이다. 즉, 오른쪽의 두 번째 스펙트럼에서는 중

심 도플러 주파수를 중심으로 스펙트럼 폭이 각각 0.2 m/sec 및 0.1 m/sec 로 다르게 나타나며 좌측으로 훨씬 크게 분산되어 나타나는 비대칭 상태를 보여준다. 여기서 SNR 은 15dB 로 각 도플러 스펙트럼의 전력비는 같다. 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 좌측으로 더 크게 분산되어 나타나는 오른쪽 도플러 스펙트럼으로 인하여 전체적인 도플러 스펙트럼의 모양이 상당히 왜곡되어 나타나게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 기존 방법에 의한 유속 도플러 주파수 추정치는 158.71 Hz 로 나타나며 제안된 방법에 의한 도플러 주파수 추정치는 170.50 Hz 를 얻을 수 있다. 유속에 대응하는 도플러 주파수의 참값이 173.21 Hz 이므로 기존 방법을 사용하는 경우 스펙트럼 왜곡에 의하여 상당한 오차가 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러나 제안된 방법의 경우는 상대적으로 오차가 작게 나타나 신뢰만한 추정치를 보여준다고 할 수 있다. 즉, 수신 도플러 스펙트럼에서 상대적인 침두치 전력 값의 차이나 분산 또는 편이 현상에 의하여 다양한 형태의 스펙트럼이 나타날 수 있지만 제안된 방법을 활용하면 전력이 강하게 나타나는 순으로 두 개의 침두치 도플러 주파수만을 추정함으로써 유속정보 추출에서의 정확도를 개선할 수 있음을 확인하였다.

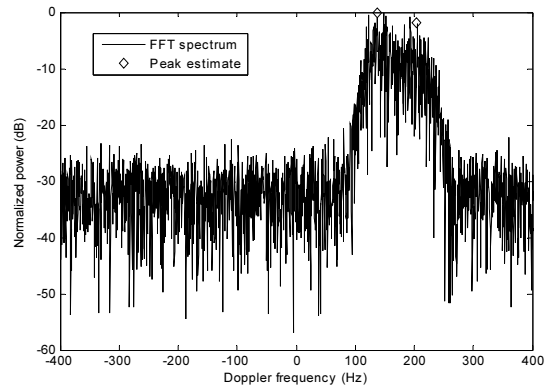


그림 4. 입사각 60도, 유속 1.25 m/sec 이며 스펙트럼 폭 0.1m/sec 의 왼쪽 대칭형 스펙트럼과 0.2 m/sec 및 0.1 m/sec 스펙트럼 폭을 갖는 오른쪽 비대칭형 도플러 스펙트럼에 의하여 형성된 수신 신호
Fig. 4 A received signal which consists of one left-side symmetric spectrum with a spectrum width of 0.1m/sec and the other right-side skewed spectrum with a spectrum width of 0.2m/sec and 0.1m/sec for the incidence angle of 60 degrees and the surface current velocity of 1.25 m/sec

VI. 결 론

본 논문에서는 유속 측정을 위한 개선된 도플러 주파수 추정 방법을 제안하였다. 유속 레이더에 실제로 수신되는 신호들과 거의 유사한 다양한 모의 도플러 스펙트럼 신호들을 이용하여 그 성능을 비교, 검증하였다. 결과분석에서 언급한 바와 같이 기존의 추정 방법보다는 거의 모든 경우에서 훨씬 향상된 결과를 보여준다. 특히 스펙트럼 분산이 크게 발생하거나 편향성, 또는 전력비가 다른 도플러 스펙트럼들이 발생하는 경우 기존의 방법에서는 심각한 추정오차가 발생할 수 있으나 제안된 방법을 적용할 경우 비교적 신뢰성 있는 유속 도플러 주파수 추정이 가능하였다. 따라서 향후 본 논문에서 제안한 방법을 적용한다면 더 신뢰성 있고 안정적인 유속 도플러 주파수 추정치를 획득할 수 있을 것이며 이에 따라 표면 유속 측정 레이더에서의 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [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*, vol. 48, no. 1, pp. 171-177, 2006.
- [2] A. Tessmann et al., "Compact single-chip W-band FMCW radar modules for commercial applications," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 12, pp. 2995-3001, 2002.
- [3] Y. Doisy, "Theoretical accuracy of Doppler navigation sonars and acoustic Doppler current profilers," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 430-441, 2004.
- [4] N. B. Melcher et al., "River discharge measurements by using helicopter-mounted radars," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 22, 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.*, vol. 95, no. C9-16, pp. 16299-16310, 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.*, vol. 42, no. 7, pp. 1444-1449, 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*, vol. 16, no. 5, pp. 560-568, 1968.
- [8] D. S. Zrnich, "Estimation of spectral moments for weather echoes," *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, vol. 17, pp. 113-128, 1979.
- [9] D. H. Johnson, "The application of spectral estimation methods to bearing estimation problems," *Proc. IEEE*, vol. 70, pp. 1018-1028, 1982.
- [10] 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.
- [11] 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.



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, 레이더신호처리, 레이더시스템