

ADCP에서의 스펙트럼 모멘트 추정에 관한 연구

이종길*

A Study on Spectrum Moment Estimation in an Acoustic Doppler Current Profiler

Jonggil Lee*

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

요 약

ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 에서의 거리 별 유속이나 유체의 교란 정도 등에 관한 정보는 수신 도플러 스펙트럼의 첫 번째 및 두 번째 스펙트럼 모멘트를 추정함으로써 얻을 수 있다. 그러나 펄스페어(Pulse-pair) 방법으로 불리는 상관함수 추정에 의한 모멘트 추정 기법은 일반적으로 가장 많이 사용되고 있으나 수신 신호의 특성이 비대칭 도플러 스펙트럼이며 하나의 첨두치를 갖는 것을 전제 조건으로 한다. 유체의 교란정도가 심하게 나타나는 상황에서는 이러한 조건이 충족되지 않을 수 있기 때문에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 분석하기 위하여 여러 가지 형태를 가지는 다양한 도플러 스펙트럼 수신 신호들을 모의 구현하였으며 이러한 신호들을 이용하여 펄스페어 추정 방법에 의하여 얻어진 결과 값들을 FFT(Fast Fourier Transform) 추정 방법에 의한 결과 값들과 비교하고 그 차이점을 분석하였다. 수신 신호가 도플러 주파수 영역에서 심하게 편이 되거나 다중 첨두치를 가지는 경우에는 펄스 페어 방법에 의한 추정치들은 무의미한 값들로 나타날 수 있음을 알 수 있다.

ABSTRACT

The current velocity and turbulence information in each range cell can be obtained from the first and second Doppler spectrum moment estimates. However, the very widely used correlation method often called as the pulse-pair method has the inherent restrictions under the highly turbulent conditions since it does not satisfy the assumptions that the return Doppler spectrum should be symmetric and have a single peak value. Therefore, in this paper, the quality of pulse-pair estimates were compared with that of FFT estimates for problem analysis using various shapes of simulated Doppler spectra. It can be known that the pulse-pair method often yields meaningless results if the received signals are severely biased or multi-peak Doppler spectra in the Doppler frequency domain.

키워드 : 모멘트 추정, 펄스페어 방법, 비대칭 도플러 스펙트럼, 추정 편이

Key word : Moment estimation, Pulse-pair method, Asymmetric Doppler spectra, Estimation bias

접수일자 : 2013. 04. 19 심사완료일자 : 2013. 05. 16 게재확정일자 : 2013. 05. 31

* **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.2013.17.8.1790>

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

초음파는 고해상도로 유체의 상태를 표시하는데 이용되어진다. 속도정보는 수신 도플러 스펙트럼으로부터 추출한다. 이를 위하여 상관기법 또는 펄스페어 추정이라 불리는 수신 신호에 대한 자기상관 추정 방법이 널리 사용된다. 유체에서의 교란정도가 거의 없다면 이러한 방법은 간단하면서도 매우 효율적이다[1-3].

그러나 교란정도가 심한 유체로부터의 수신 도플러 스펙트럼은 다중 첨두치를 가지거나 심한 비대칭 왜곡을 수반하게 된다. 이러한 상황에서는 펄스페어 추정 방법의 전제조건이 만족되지 않으므로 추정치가 유속을 제대로 나타내지 못할 수도 있다[4].

그러므로 교란정도가 심한 유체에서의 측정 가능성을 분석하기 위하여 다양한 형태의 모의 수신 도플러 스펙트럼을 이용하여 스펙트럼의 평균 및 폭에 대한 펄스페어 추정치들과 FFT(Fast Fourier Transform) 추정치들을 추출하였다.

본 논문에서는 교란정도가 심한 유체측정에서의 펄스페어 방법의 내재적인 문제점과 FFT 추정치들의 신뢰성 정도를 고찰하였다. 비대칭 도플러 스펙트럼 모델을 이용하여 수신 도플러 스펙트럼의 비대칭 왜곡으로 인한 펄스페어 추정치에서의 편향 오차를 분석하였다.

다중 첨두치 도플러 스펙트럼에서의 펄스페어 추정치는 무의미한 결과를 나타낼 수 있으므로 FFT 스펙트럼 추정을 통한 교란정도 및 유속측정에서 발생할 수 있는 문제점들도 아울러 분석하고 고찰하였다.

II. 펄스페어 방법에서의 편향 효과

펄스페어 추정에서는 간격 T_s 에서의 복소 자기상관 함수를 추정하여 처음 및 두 번째 스펙트럼 모멘트를 계산하게 된다. 이러한 추정자의 신뢰성 정도는 편향오차 및 분산정도에 의하여 좌우된다. 펄스페어 추정치에서의 편향효과를 분석하기 위하여 평균 도플러 주파수 f_d 를 갖는 다음과 같이 표시되는 복소 자기상관 함수, $R(T_s)$ 를 고려하여 보자.

$$R(T_s) = e^{j2\pi f_d T_s} \int_{-\frac{1}{2T_s}}^{\frac{1}{2T_s}} S_o(f) e^{j2\pi f T_s} df. \quad (1)$$

여기서 $S_o(f)$ 는 평균 도플러 주파수가 0인 수신 도플러 스펙트럼을 나타낸다. 펄스페어 추정에서의 비편향성은 스펙트럼이 대칭이거나 또는 그 폭이 매우 좁아서 식 (1)에서의 허수부분의 적분 결과 값을 무시할 수 있다는 가정을 전제로 한다[2, 3].

그러나 실제로 수신 도플러 스펙트럼 폭이 매우 넓거나 비대칭인 경우도 자주 발생하게 되며 이로 인한 추정치의 편향이 나타난다. 이러한 편향효과를 분석하기 위하여 비대칭 가우시안(skewed Gaussian) 스펙트럼 모델을 적용하였다. 비대칭 가우시안 스펙트럼은 정규화 과정을 거친 후 다음과 같이 구간별로 표시될 수 있다.

$$S_n(f) = \frac{2}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi W_1}} e^{-\frac{f^2}{2W_1^2}} \quad \text{for } f \leq 0 \quad (2)$$

$$S_n(f) = \frac{2p}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi W_2}} e^{-\frac{f^2}{2W_2^2}} \quad \text{for } f > 0.$$

여기서 표준편차의 비, $p=W_2/W_1$ 는 비대칭 정도를 표시하는 파라미터 g 를 결정한다[5].

$$g = \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} [(p^{-2} + 1)^{-1.5} - (p^2 + 1)^{-1.5}]. \quad (3)$$

이러한 파라미터 g 는 비대칭성이 없는 경우($p=1$) 0의 값을 나타내며 $p=10$ 으로 비대칭성이 심한 경우에는 약 3.14 정도의 큰 값을 나타내게 된다. 대칭적인 가우시안 도플러 스펙트럼에서는 즉, $p=1$ 인 경우 식(1)에서의 적분 결과는 $\text{EXP}(-2\pi^2 W^2 T_s^2)$ 로 간단히 표시된다. 그러나 일반적인 비대칭 모델에서는 다음과 같은 실수부분 항 A와 허수부분 항 B가 모두 나타나게 된다.

$$A = \int_{\frac{-1}{2T_s}}^{\frac{1}{2T_s}} S_n(f) \cos(2\pi fT_s) df$$

$$\cong \frac{1}{1+p} (e^{-2\pi^2 W_1^2 T_s^2} + p e^{-2\pi^2 W_2^2 T_s^2})$$
(4)

$$B = \frac{2}{1+p} \int_0^{\frac{1}{2T_s}} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi W_1}} (e^{-\frac{f^2}{2W_1^2}} - e^{-\frac{f^2}{2W_2^2}}) \right] \sin(2\pi fT_s) df.$$

편향된 도플러 스펙트럼에서의 실제 평균값은 침두치 값과는 다르게 나타난다. 실제 도플러 주파수 평균과 스펙트럼 폭은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_m = \int_{-\infty}^{\infty} f S_n(f) df = \frac{2}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (pW_2 - W_1),$$
(5)

$$W^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (f - f_m)^2 S_n(f) df$$

$$= \frac{1}{1+p} (pW_2^2 + W_1^2) - f_m^2$$

식 (5)는 비대칭 스펙트럼에서의 도플러 평균, 좌우 스펙트럼 폭 및 파라미터 p 에 대한 관계식을 나타낸다.

III. 다중 침두 스펙트럼 및 모멘트 추정

교란이 심한 유체에서의 반사 도플러 신호는 2개 또는 2개 이상의 침두치를 가질 수 있다. 이러한 현상을 고려하여 일반적인 도플러 스펙트럼 모델을 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_n(f) = \sum_{i=0}^{M-1} A_i D(f - f_i; w_{2i} w_{2i+1}).$$
(6)

여기서 D 는 평균 도플러 주파수 f_i , 좌우 폭이 각각 W_{2i}, W_{2i+1} 인 가우시안 도플러 스펙트럼을 표시한다. 식 (2)에서와 같은 스펙트럼 모델이다. 식 (6)에서의 A_i 는 각 스펙트럼의 크기를 나타내는데 전체 도플러 스펙트럼을 다양한 크기의 스펙트럼들의 합으로 표시할 수 있다. 따라서 A_i 의 전체 합 및 상대적인 크기 계수, r_{ij} 는

다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=0}^{M-1} A_i = 1,$$
(7)

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

전제조건을 만족하지 못하므로 다중 침두치 스펙트럼의 경우 펄스페어 방법은 무의미한 결과를 보일 수 있다. 따라서 스펙트럼 영역에서의 모멘트를 구하기 위한 일반적인 방법인 FFT 추정방법을 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}_d = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} f_k S_n(f_k)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_n(f_k)}, \quad \hat{W}^2 = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (f_k - \hat{f}_d)^2 S_n(f_k)}{\sum_{k=0}^{N-1} S_n(f_k)}.$$
(8)

펄스페어 추정치는 시간영역에서의 자기 상관함수 추정치, $\hat{R}(T_s)$ 를 이용하여 얻는다. 즉,

$$\hat{f}_d = \frac{1}{2\pi T_s} \arg[\hat{R}(T_s)],$$

$$\hat{W} = \frac{1}{\sqrt{2\pi T_s}} \left| 1 - \frac{|\hat{R}(T_s)|}{\hat{S}} \right|^{1/2}$$
(9)

여기서 \hat{S} 은 배경잡음 전력을 제외한 신호전력 추정치, $\hat{R}(T_s)|_{T_s=0}$ 를 표시한다[2, 3, 6].

FFT 평균 주파수 추정방법은 특정한 영역에서의 평균속도 정보를 추출할 수 있지만 다중 침두치 스펙트럼이 발생하는 교란이 심한 유체상태를 분석하기에는 부적합하다. 이러한 경우에는 교란정도를 표시하는 FFT 폭 추정치가 매우 크게 나타난다. 따라서 이러한 유체의 흐름은 전체 도플러 스펙트럼을 분석하거나 침두치 값들만을 추정하여 사용하는 것이 더 유용할 수 있다.

IV. 모의 모델을 이용한 추정결과 분석

추정 성능을 평가하기 위하여 세 가지 형태의 도플러 스펙트럼을 모의 구현하였다. 각 I, Q 채널에서의 수신 신호는 가우시안으로 표시될 수 있으며 따라서 모델에서는 부가성 백색 가우시안 잡음 및 수신 신호의 크기에 대한 Rayleigh 분포 효과를 고려하였다[7].

대칭적인 도플러 스펙트럼의 경우 21개의 거리 셀로부터 수신되는 도플러 주파수를 변화시키면서 스펙트럼 폭은 0.7 m/sec 이며 신호대 잡음비(SNR)는 20dB 인 상황을 가정하였다. 이러한 모의 신호들을 이용하여 얻어진 펄스페어 및 FFT 추정치들을 그림 1과 그림 2에 표시하였다.

그림 1에서 보는 것처럼 FFT 나 펄스페어 추정치 모두 실제 평균속도를 매우 정확하게 나타내고 있다. 그림 2에서는 속도의 표준편차를 나타내는데 모두 실제 값보다는 큰 값을 보이며 펄스페어 추정치가 상대적으로 잡음이나 확률적인 신호크기 변화에 민감하지 않다는 것을 알 수 있다.

두 번째 형태의 모의신호는 식 (2)에서 나타낸 것과 같은 편향된 도플러 스펙트럼이다. 이러한 경우의 평균 속도 추정에 대한 결과를 그림 3에 나타내었다. 두 방법 모두 식 (5)로 나타는 실제 평균값을 정확하게 표시하는데 이는 상대적으로 신호의 편향정도가 적기 때문이다. 그러나 여기서 말하는 실제 평균값은 도플러 스펙트럼의 첨두치와는 다른 값이며 이러한 첨두치 값이 특정 영역에서의 유속정보를 더 잘 나타낼 수도 있다. 그림 4에서는 스펙트럼 폭, 즉 속도 표준편차에 대한 추정 결과를 표시하였으며 상대적으로 펄스페어 추정치의 변화정도가 작음을 알 수 있다. 그러나 비대칭 왜곡으로 인하여 증가한 실제 값보다 두 개의 추정치 모두 더 크게 나타남을 볼 수 있다.

세 번째 유형은 식 (6)에서 표시된 것처럼 유체의 교란이 심한 경우 발생할 수 있는 다중 첨두치를 갖는 스펙트럼이다. 평균유속의 추정치에 대한 결과를 그림 5에 표시하였다. 예상한 바와 같이 펄스페어 추정치들은 매우 넓은 범위의 불규칙적인 값을 보이며 이러한 경우 추정치들은 일반적으로 무의미하다고 할 수 있다. 여기서 모의 구현된 스펙트럼은 0의 도플러 주파수를 기준으로 대칭적인 두 개의 첨두치 주파수를 발생시켰다. 따라서 실제 평균유속은 0 으로 계산된다.

그림 5에서 보는 것처럼 FFT 추정치는 실제 평균유속 값 0 에 근접하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 이러한 추정치는 특정 영역에서의 유속 장을 제대로 표현하고 있지 못하기 때문에 별다른 의미를 부여하기 어렵다.

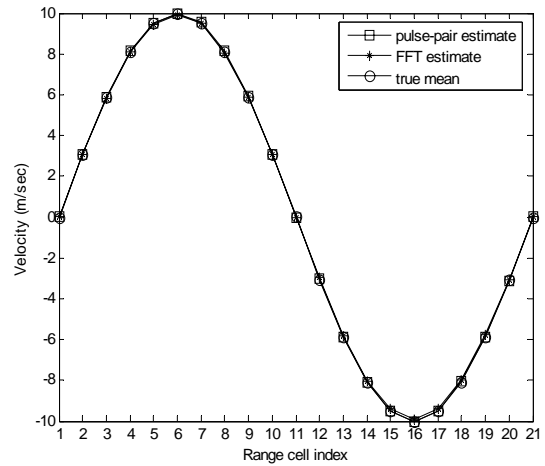


그림 1. 20dB SNR 대칭 스펙트럼 거리 셀에서의 평균 추정
Fig. 1 Mean estimates in range cells for the symmetric spectra with SNR of 20dB

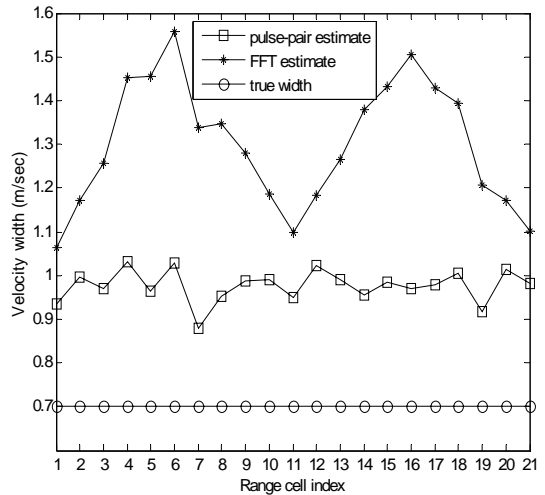


그림 2. 20dB SNR 대칭 스펙트럼 거리 셀에서의 폭 추정
Fig. 2 Width estimates in range cells for the symmetric spectra with SNR of 20dB

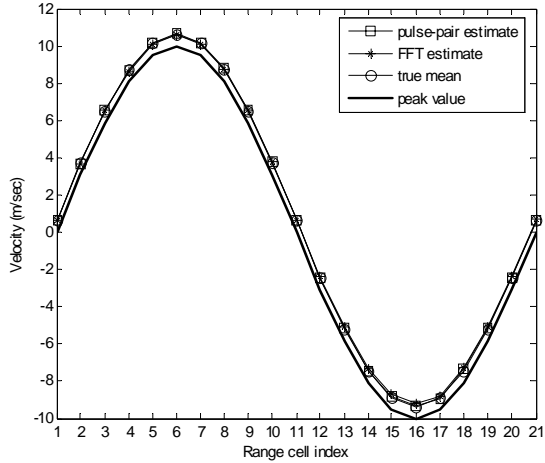


그림 3. 폭이 각각 $w_1=0.4$ m/sec, $w_2=1.2$ m/sec 인 20dB SNR 편향 스펙트럼에서의 평균 추정
Fig. 3 Mean estimates for the biased spectra of widths ($w_1=0.4$ m/sec, $w_2=1.2$ m/sec) with SNR of 20dB

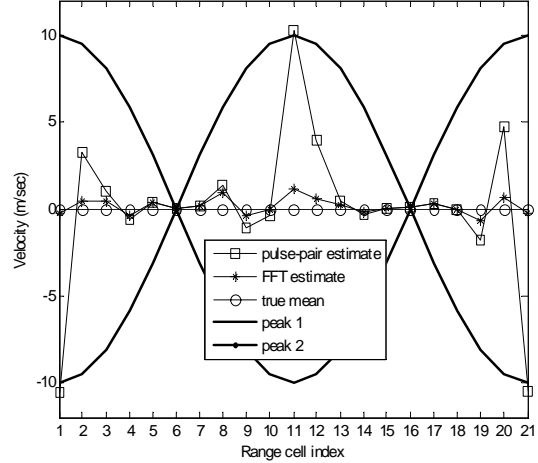


그림 5. $r_{12}=1$ 인 20dB SNR 이중 첨두치 스펙트럼 거리 셀에서의 평균 추정
Fig. 5 Mean estimates in range cells for the two-peak spectra ($r_{12}=1$) with SNR of 20dB

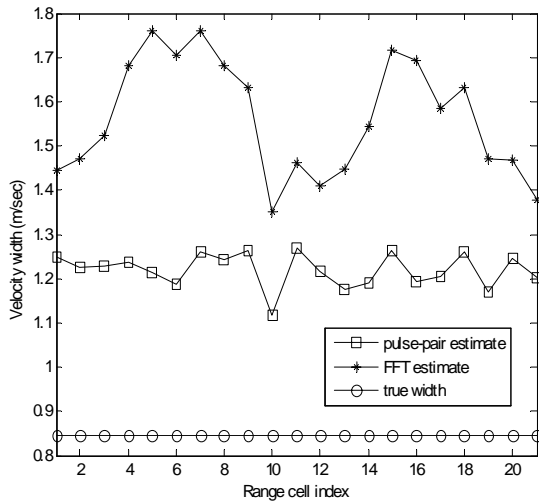


그림 4. 폭이 각각 $w_1=0.4$ m/sec, $w_2=1.2$ m/sec 인 20dB SNR 편향 스펙트럼에서의 폭 추정
Fig. 4 Width estimates for the biased spectra of widths ($w_1=0.4$ m/sec, $w_2=1.2$ m/sec) with SNR of 20dB

V. 결론

펄스페어 방법은 간단하기 때문에 유체에서의 속도 및 교란정도의 정보를 추출하기 위하여 도플러 스펙트럼 모멘트 추정에 널리 쓰이고 있다. 그러나 편향되거나 다중 첨두치를 갖는 스펙트럼의 경우에는 문제점을 내포하고 있다. 편향된 스펙트럼에서 폭이 아주 크지 않다면 편향오차는 대부분 작게 나타나지만 이때의 평균 유속 추정치들은 특정영역에서의 유속장을 충실히 보여 준다고 할 수 없다. 즉 편향된 스펙트럼에서의 평균 추정치는 첨두치 유속과는 다르게 나타나기 때문이다. 결과 그림에서 보는 것처럼 펄스페어 폭 추정치는 FFT 폭 추정치에 비하여 잡음 및 불규칙성에 의한 변화가 상대적으로 작다. 그러나 이러한 추정치들도 실제 값에 비하면 다소 과장되어 나타난다는 것을 알 수 있다.

다중 첨두치 스펙트럼에서의 평균 추정치는 대부분 무의미한 값이므로 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이러한 경우에도 FFT 추정치는 실제 평균유속 값에 가까운 값을 나타내고 있지만 펄스페어 추정치는 심하게 변동한다. 그러나 FFT 추정치도 다중 첨두치의 단순 평균 값을 나타내므로 의미 있는 정보를 추출하기 어렵다.

그러므로 유속 장 정보를 제대로 나타내기 위해서는
첨두치 추정 방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으
로 생각된다.

REFERENCES

- [1] L. Zedel and A. Hay, "Performance of single-beam pulse-to-pulse coherent Doppler profiler," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 21, pp. 290-297, 1996.
- [2] D. S. Zrnic, "Spectral moment estimates from correlated pulse pairs," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 13, pp. 344-354, 1977.
- [3] R. F. Woodman, "Spectral Moment Estimation in MST radars," *Radio Science*, vol. 20, pp. 1185-1195, 1985.
- [4] Y. Doisy, "Theoretical accuracy of Doppler navigation sonars and acoustic Doppler current profilers," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, pp. 430-441, 2004.
- [5] G. W. Snedecor, *Statistical methods*, The Iowa State University Press, 1956.
- [6] K. S. Miller and M. M. Rochwarger, "A covariance approach to spectral moment estimation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 18, pp. 588-596, 1972.
- [7] I. Kanter, "Exact detection probability for partially correlated Rayleigh targets," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 22, pp. 184-196, 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