

# 기상레이다에서의 편향오차 감소를 위한 다중 펄스페어 추정기법에 관한 연구

정회원 이종길\*

## A Study on Poly-pulse Pair Estimation Method for Reduction of Bias Errors in a Weather Radar

Jonggil Lee\* *Regular Member*

### 요 약

기상레이다에 수신되는 도플러 스펙트럼의 약 25%는 비대칭 스펙트럼, 즉 skewed spectrum 인 것으로 알려져 있다. 그러나 기상정보의 추출을 위하여 가장 널리 쓰이고 있으며 효율적인 것으로 알려진 기존의 펄스페어 추정방법은 도플러 스펙트럼이 대칭형 또는 매우 좁은 주파수 대역을 갖는다는 가정을 전제로 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 가정이 만족되지 않을 경우 기상레이다에서의 스펙트럼 모멘트들의 추정치에 상당한 편향오차가 발생할 수 있음을 정량적으로 분석하였다. 또한 이러한 편향오차가 상대적으로 심각한 평균 도플러 주파수 추정치의 정확도를 향상시키기 위하여 다중 펄스페어 추정기법을 제안하였다. 제안한 방법을 적용할 경우 편향오차가 현저히 줄어들음을 확인할 수 있었다.

### ABSTRACT

Some observed weather spectra show that nearly 25% of weather spectra are seriously skewed and can not be considered to be symmetric. However, the conventional pulse pair method was derived and has been evaluated under the assumption that the weather spectrum is symmetric and narrow. This means that the conventional pulse pair method may need reevaluation. Therefore, this paper analyzed the bias errors of pulse pair estimates in the skewed spectra. The bias errors of pulse pair mean estimates are more serious comparing with the pulse pair width estimates. In this paper, the poly-pulse pair method is suggested to reduce these bias errors of mean estimates. It was shown that the mean bias errors can be reduced remarkably using the newly suggested poly-pulse pair method.

### I. 서론

기상레이다의 경우 기상현상과 직접적인 연관성을 갖고 수신되는 도플러 스펙트럼 모멘트들을 추정함으로써 풍속, 대기교란, 강우량등의 정보를 추출한다<sup>[1][2]</sup>. 그러므로 신뢰성 있는 정보의 획득을

위해서는 도플러 스펙트럼 모멘트 추정치의 정확성 정도가 매우 중요한 문제가 될 수 있다. 이러한 스펙트럼 모멘트들을 추정하기 위하여 FFT (Fast Fourier Transform) 또는 펄스페어 (pulse pair) 기법을 적용하고 있다. FFT 기법의 경우 이상신호 (anomalies)의 제거가 가능하고 결과의 신뢰성 정도가 우수하나 기상레이다의 특성상 매우 방대한

\* 인천대학교 정보통신공학과(jnglee@lion.inchon.ac.kr)

논문번호 : 99254-0628, 접수일자 : 1999년 6월 28일

※ 본 연구는 정보통신연구관리단에서 주관하는 98년도 대학기초연구지원사업에 의해 수행되었습니다.

양의 반사신호(echoes)와 관련된 데이터를 실시간으로 처리하여야 하므로 실질적인 구현에는 많은 어려움이 있다. 따라서 대부분의 기상레이다에서는 연산속도가 빠르고 구현이 간단하면서도 비교적 정확한 펄스페어 방법을 적용하고 있다<sup>[3]</sup>. 이러한 펄스페어 추정 방법은 복소 자기 상관 함수(complex autocorrelation function)의 추정치를 이용하여 스펙트럼 모멘트들을 구하는 방식이다.

그러나 이러한 펄스페어 방법은 수신되는 도플러 스펙트럼의 폭이 좁고 대칭인 경우를 가정하여 제안된 방법이므로 이와 같은 조건들을 만족시키지 못할 경우 상당한 편향오차(bias error)가 발생할 수 있다. 수신 도플러 스펙트럼 실측 결과에 의하면 전체의 약 25% 정도의 기상신호가 비대칭형으로 분류되며 대칭형의 경우에도 스펙트럼 폭이 상당히 넓은 경우가 자주 나타난다<sup>[4]</sup>. 따라서 본 논문에서는 우선 이와 같은 문제점들로 인하여 발생할 수 있는 펄스페어 방법에서의 편향오차를 분석하였다. 아울러 이와 같은 편향오차를 줄이기 위한 방법으로 다중 펄스페어 기법을 제안하였다. 원래 다중 펄스페어 방법은 스펙트럼 추정치의 정확도를 높이기 위하여 제안된 방식이었으나 본 논문에서는 편향오차를 줄이기 위한 다중 펄스페어 기법으로 변환하여 제안하였다. 또한 제안된 방식에 대한 이론적인 분석 및 평가를 수행하였다.

## II. 펄스페어 추정 방법

펄스페어 추정(pulse pair estimation) 방법이란 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 펄스페어를 이루는 coherent 펄스간의 간격을  $T_s$  로 하고 반복주기가  $T$  라고 하면 복소 자기상관 함수(complex autocorrelation function),  $R(T_s)$  는 전송된 펄스페어의 수신신호,  $Z(iT)$  들에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$R(T_s) = E\{Z^*(iT)Z(iT + T_s)\} \quad (1)$$

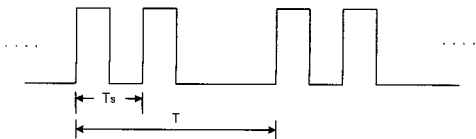


그림 1. 복소 자기상관 함수 추정을 위한 펄스페어들의 열

그러므로 수신된 펄스페어들로부터 복소 자기상관 함수를 추정하여 스펙트럼 모멘트들을 구할 수 있다. 즉, 수신된 도플러 스펙트럼의 평균(mean) 추정치,  $\hat{f}_d$  및 폭(width) 추정치인  $\hat{W}$  값들은 다음과 같이 표시할 수 있다<sup>[5]</sup>.

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

$$\hat{W} = \frac{1}{\sqrt{2\pi T_s}} \left| 1 - \frac{R(T_s)}{S} \right| \quad (3)$$

여기서  $R(T_s)$  및  $S$  은 다음과 같이 정의되어진다.

$$R(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} Z^*(iT)Z(iT + T_s) \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} |Z_i|^2 - N \quad (5)$$

식 (2)에서의  $\arg\{\}$ 는 복소 자기상관 함수의 위상 함수 추정 값을 나타낸다. 또한 식 (4) 및 식 (5)에서의  $N$ 은 전체 잡음전력을 의미하며  $M$ 은 펄스페어의 개수를  $L$ 은 전체 펄스숫자를 표시한다. 이러한 펄스페어 추정방식은 도플러 스펙트럼이 대칭형이고 주파수상에서 좁은 대역을 갖는다고 가정할 경우 편향오차가 없는 추정(unbiased estimation) 방법이며 분산(variance)은 다음과 같이 표현되어진다<sup>[6]</sup>.

$$\begin{aligned} \text{VAR}(\hat{f}_d) &= [8\pi^2 T_s^2 \beta^2(T_s)]^{-1} [M^{-2} [1 - \beta^2(T_s)] \\ &\quad \cdot \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \beta^2(mT)(M - |m|) + \frac{N^2}{MS^2} \\ &\quad + \frac{2N}{MS} [1 - \beta(2T_s)\delta_{T-T_s,0} + \frac{\beta(2T_s)}{M} \delta_{T-T_s,0}]] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VAR}(\hat{W}) &= [32M\pi^4 (WT_s)^2 \beta^2(T_s) T_s^2]^{-1} [2 \cdot [1 + \\ &\quad (1 + \delta_{T-T_s,0})\beta^2(T_s) + \delta_{T-T_s,0}\beta^4(T_s)] \frac{N}{S} \\ &\quad + [1 + (1 + \delta_{T-T_s,0})\beta^2(T_s)] \frac{N^2}{S^2} + \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \beta^2(T_s)] \end{aligned}$$

$$[2\beta^2(mT) + \beta^2(mT)\beta^2(T_s) + \beta(mT + T_s(1 - \delta_{T-T_s,0})) - 4\beta(mT + T_s) \cdot \beta(mT)\beta^{-1}(T_s)] \cdot (1 - \frac{1}{M})] \quad (7)$$

여기서 S 및 N 은 각각 신호전력(signal power) 및 잡음전력(noise power)을 표시하며  $\delta_{T-T_s,0}$  는  $T = T_s$  일 때에만 1 이 되며 다른 경우에는 0의 값을 갖는다. 또한  $\beta(T_s)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta(T_s) = \exp(-2\pi^2 W^2 T_s^2)$$

그러나 종래의 이러한 방법은 앞에서 언급한 것과 같은 조건을 만족한다는 전제하에서만 편향오차가 일어나지 않는다. 따라서 다음 장에서는 이와 같은 조건을 만족하지 못할 경우에 발생하는 펄스페어 방식에서의 편향오차들을 skewed Gaussian model을 적용하여 분석하고자 한다.

### III. 펄스페어 방식에서의 편향오차 분석

펄스페어 추정자에서의 편향오차(bias error)를 분석하기 위하여 평균 도플러 주파수  $f_a$  를 포함하는 복소 자기상관 함수를 고려하여 보자.

$$R(T_s) = e^{j2\pi f_a T_s} \int_{-\frac{1}{2T_s}}^{\frac{1}{2T_s}} S'(f) e^{j2\pi f T_s} df \quad (8)$$

여기서  $S'(f)$  는 평균 도플러 주파수가 0인 기상 스펙트럼을 나타낸다. 그러므로 스펙트럼이 대칭이거나 그 폭이 매우 좁을 경우만을 가정한다면 식 (8)에서의 허수부는 0이 된다고 간주하여도 무방하다. 따라서 펄스페어 추정치의 편향오차는 무시할 수 있을 것이다.

그러나 기상레이다에서의 도플러 스펙트럼은 넓은 대역에 걸쳐 분포하거나 비대칭적인 모양을 갖는 경우가 자주 발생할 수 있기 때문에 추정 값에서의 편향오차를 유발시키게 된다. 그러므로 이러한 편향오차를 분석하기 위하여 다양한 스펙트럼 폭을 가지는 Skewed Gaussian 모델을 제안하였다. Skewed Gaussian 모델은 정규화 하여 나타내면 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

$$S_n(f) = \frac{2p}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi} W_2} e^{-\frac{f^2}{2W_2^2}} \quad \text{for } f < 0 \quad (9)$$

여기서 표준편차의 비로 나타내어지는  $p = \frac{W_2}{W_1}$  에 따라 skewness 정도를 표시하는 g 값이 결정되어진다<sup>[7]</sup>. 즉, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \frac{4\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} [ (p^{-2} + 1)^{-1.5} - (p^2 + 1)^{-1.5} ] \quad (10)$$

이러한 skew 파라미터 g는 p의 값이 1일 때 즉, skewness 가 없는 경우에는 0 이되며 p 값이 10 보다 커서 skewness 정도가 심한 경우 약 3.14의 값을 가짐을 알 수 있다. 대칭적인 협대역 스펙트럼의 경우, 즉  $W_1 = W_2 = W$  라고 가정하고 식 (8)의 자기상관 함수를 구하면  $\exp(-2\pi^2 W^2 T_s^2)$  으로 간단하게 표시할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 skewed 도플러 스펙트럼인 경우를 고려하여 보면 실수 부와 허수 부로 나누어서 그 값들을 각각 구하여야 한다. 즉, 실수 부를 a 허수 부를 b라고 표시하면 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

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

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

$$b = \frac{2}{1+p} \int_0^{\frac{1}{2T_s}} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi} W_1} ( e^{-\frac{f^2}{2W_1^2}} - e^{-\frac{f^2}{2W_2^2}} ) \right] \cdot \sin(2\pi f T_s) df. \quad (11)$$

이러한 결과를 이용하여 펄스페어 방법에서의 도플러 스펙트럼 평균 및 폭을 추정할 시의 편향오차를 분석하여 보자. 먼저 각각의 편향오차를 구하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$mean \ bias = \left| \frac{1}{2\pi T_s} \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right) - f_m \right|$$

$$width \ bias = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi} T_s} \left| \ln \left( \frac{1}{a^2 + b^2} \right) \right|^{1/2} - W \right| \quad (12)$$

여기서 평균 도플러 주파수 및 스펙트럼 폭의 참 값들은 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_m = \int_{-\infty}^{\infty} f S_n(f) df = \frac{2}{1+p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot (p W_2 - W_1)$$

$$W^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (f - f_m)^2 S_n(f) df = \frac{1}{1+p} \cdot (p W_2^2 + W_1^2) - f_m^2 \quad (13)$$

식 (12)로 표시되는 평균 도플러 주파수 와 스펙트럼 폭의 편향오차들을 스펙트럼 폭 W 와 skewness 파라미터 g를 변화시키면서 그림 2 와 그림 3으로 표시하였다. 그림 2의 경우에서 보는바 와 같이 skewness가 없는 경우(g=0)에는 편향오차가 존재하지 않으며 skewness 정도를 나타내는 g 값이 커짐에 따라 편향오차도 급격히 증가한다. 또한 편향오차의 백분율은 g의 값이 0보다 크다면 g 의 값에 거의 무관한 특성을 보이지만 스펙트럼 폭 W에 따라서는 매우 큰 차이를 보인다. 그림 3에서 표시한 것처럼 스펙트럼 폭 추정 오차는 평균 주파수 추정 오차에 비하여 비교적 적으므로 그리 심각하지 않다는 것을 알 수 있다.

그림 2 에서 보는 바와 같이 수신 도플러 스펙트럼의 폭이 넓은 경우 평균 도플러 주파수 추정 치에 관련된 편향오차를 무시할 수 없다. 그러므로 상대적으로 편향오차가 큰 평균 도플러 주파수 추정 방법의 문제점을 개선하기 위하여 다음 장에서는 다중 펄스페어 추정 기법을 제안하고 그 성능을 분석하고자 한다.

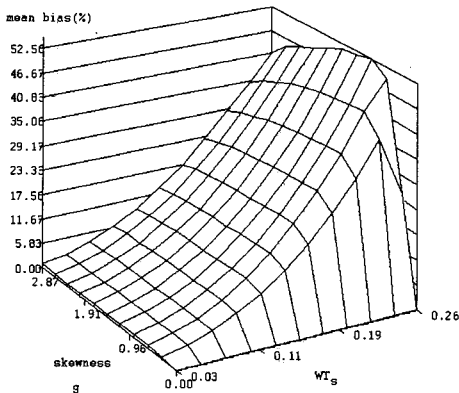


그림 2. 펄스페어 방식을 이용한 평균 도플러 주파수 추정치에서의 편향오차

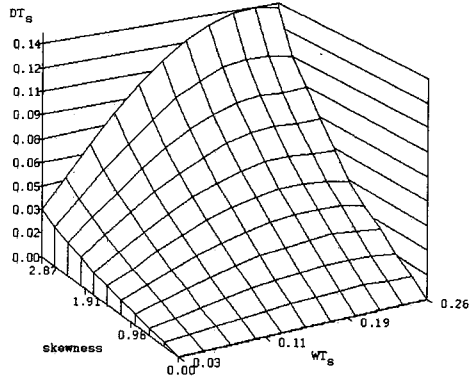


그림 3. 펄스페어 방식을 이용한 스펙트럼 폭 추정치에서의 편향오차

#### IV. 다중 펄스페어 추정방법

앞장에서 분석한 것처럼 기상 레이다에서의 수신 도플러 스펙트럼의 폭이 넓고 대칭이 아닌 경우 상당한 편향오차를 유발시키므로 이러한 오차를 최소화하기 위한 기법으로 다중 펄스페어 방법을 제안 하고자 한다. 기상레이다에서의 일반적인 펄스 페어 추정방법은 복소 자기상관함수의 첫 번째 lag 를 추정하여 이용하는 방식이다. 이러한 방식은 복소 자기상관함수 추정 치의 위상함수 미분을 선형 적으로 근사화 한 것(linear approximation) 이라 고 할 수 있다. 즉,

$$\hat{f}_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\hat{\theta}(T_s)}{dT_s} \cong \frac{1}{2\pi} \frac{\hat{\theta}'(T_s)}{T_s} \quad (14)$$

여기서  $\hat{\theta}'(T_s)$  는 추정된 위상함수를 나타낸다, 그러므로 대칭 스펙트럼의 경우에는 선형 근사화 과정에서의 오차가 없다. 그러나 skewed spectrum 일 경우 큰 오차가 발생할 수 있는데 이는  $\hat{\theta}'(T_s)$  가  $T_s$  의 선형 함수가 아니기 때문이다. 그러므로 이러한 오차를 줄이기 위한 방법으로  $\hat{\theta}'(T_s)$  를 최소 1차원 이상의 저차원 다항식 (polynomial) 으로 근사화 시킬 수 있다. 즉, 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\hat{\theta}'(T_s) \cong \sum_{i=1, \text{ odd}}^N a_i T_s^i \quad (15)$$

여기서  $\hat{\theta}(T_s)$  는  $T_s$  의 기 함수로 표시되어야 한다. 이러한 이유는 복소 자기 상관함수는 실 수 값을 갖는 전력 스펙트럼의 역 푸리 경우 skewed spectrum 의 평균 주파수 추어 변환으로 표시되기 때문이다. 식 (15)와 같이 근사화 시킬정 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{f}_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\hat{\theta}(T_s)}{dT_s} \Big|_{T_s=0} \cong \frac{1}{2\pi} \hat{a}_1 \quad (16)$$

식 (15)에서의 n 값이 1보다 큰 경우  $a_1$  을 추정하기 위해서는 복소 자기상관함수의 첫 번째 lag 값  $T_s$  뿐만 아니라 다른 lag 값들을 필요로 한다. 따라서 수신되는 펄스 열들로부터 다중 펄스페어를 이용한 추정방법을 적용하여야 한다. 즉,

$$\hat{R}(kT_s) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} Z^*(iT)Z(iT + kT_s) \quad (17)$$

여기서 k는 0 이상의 정수중 홀수를 표시하며 M은 펄스페어의 개수를 의미한다. 일반적으로 기상 레이 다에서는 송수신 펄스들간의 간격이 균일하므로 그림 4에서 보는 것과 같이  $T = kT_s$  인 연속적인 펄스 열 들로부터  $\hat{R}(kT_s)$  를 추정할 수 있다.

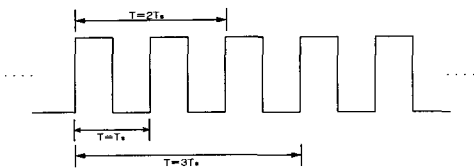


그림 4. 다중 펄스페어 열을 이용한 추정방법

편향오차를 줄이기 위하여 본 논문에서 제안된 추정 방식을 적용하여 보았다. 그림 5 에서 알 수 있는 것처럼 평균주파수 편향오차는 스펙트럼 폭에 따라 전반적으로 상당히 감소함을 알 수 있다. 그림 5 에서는  $g=1.99$ 이며  $p=2$ 인 경우의 skewed spectrum model 을 사용하였다. 추정방법의 우수 성은 편향오차의 정도와 추정 치의 분산정도에 따 라 결정된다. 따라서 이와 같은 다중 펄스페어 기 법의 성능을 제대로 해석하기 위해서는 제안된 기 법에 의한 추정 치의 분산(variance) 과 기존 펄스 페어 방법( $n=1$ 인 경우)에 의한 분산을 유도하고 비교하여야만 한다.

식 (15)에서 3차 다항식으로 근사화 하는 경우

를 생각하여 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다 즉,

$$\hat{\theta}(T_s) = \hat{a}_3 T_s^3 + \hat{a}_1 T_s \quad (18)$$

식 (18)과 같이 표기하는 경우 다중 펄스페어 추정 치의 분산은 다음과 같이 표시되어짐을 유도 할 수 있다.

$$\begin{aligned} var_p(\hat{f}_d) = var(\hat{f}_d) - \frac{T_s^2}{2\pi^2} E[\hat{a}_3 \hat{a}_1 - a_3 a_1] \\ - \frac{T_s^4}{4\pi^2} E[(a_3 - \hat{a}_3)^2] \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $var_p(\hat{f})$ 는 다중 펄스페어 추정 치의 분산을 나타내며  $var(\hat{f})$  는 n값이 1인 기존 펄스페어 방식의 분산을 의미한다. 추가되는 첫 번째 항은 음수 또는 양수가 될 수 있으나 두 번째 항 은 실질적으로 다중 펄스페어 추정치의 분산을 감 소시키게 된다. 그러나 어떤 경우에도 펄스간격  $T_s$  의 값이 일반적으로 매우 작기 때문에 2차이상의 교차 항들을 고려하지 않아도 무방하므로 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$var_p(\hat{f}) \cong var(\hat{f}) \quad (20)$$

그러므로 그림 5의 결과에서 보는 것처럼 다중 펄스페어 방법을 쓸 경우 비대칭형 스펙트럼 모멘트 추정에서의 편향오차를 줄임으로서 평균 도플러 주 파수 추정 값의 정확도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

% mean bias error by skewed spectrum( $g=1.99$ )

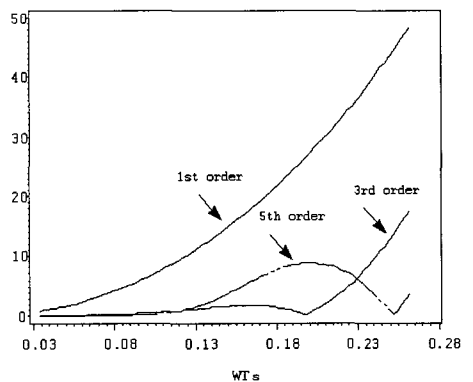


그림 5. 다중 펄스페어 방법과 기존 펄스페어 방법에서의 추정치 편향오차 비교

## V. 결론

본 논문에서는 skewed spectrum 의 경우 기존의 펄스페어 추정방식을 적용할 경우에 발생하는 편향오차를 정량적으로 분석하였다. 이러한 편향오차는 기상레이다에서 대기의 교란정도에 관한 정보를 제공하는 도플러 스펙트럼 폭의 추정에는 큰 오차를 발생시키지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 평균 도플러 주파수 추정의 경우에는 상당한 편향오차가 발생할 수 있음을 보였다. 따라서 평균 주파수 추정 시 편향오차를 줄이기 위한 방법으로 다중 펄스페어 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 적용할 경우 기존의 방법에 비하여 편향오차를 월등히 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

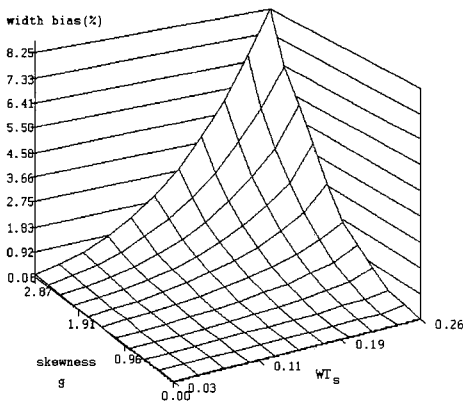


그림 6. 정규화한 다중 펄스페어 평균 추정치와 skewed spectrum 모드 값의 차이

그런데 본 논문에서 언급한바와 같이 기상레이다에서의 레이더 신호처리 부에서 어떤 특정영역 또는 어떤 거리 방(range cell)의 평균 도플러 주파수를 추정함으로써 평균 풍속을 구한다는 것은 통계적인 평균값을 의미하게 된다. 즉 여기서 제안한 다중 펄스페어 추정 방법은 편향오차를 줄임으로서 통계적인 평균값의 정확도를 향상시키기 위한 제안 방법이라고 할 수 있다. 그러나 기상레이다의 응용목적 및 운용환경에 따라 도플러 스펙트럼 모드(mode) 또는 피크(peak) 주파수, 즉 확률적으로 가장 가능성이 높은 도플러 주파수 값이 더 큰 물리적인 의미를 가질 수도 있다<sup>[8]</sup>. 그림 6에서 보면 D로 표시되는 다중펄스페어 방법을 이용한 평균 추정 값과 모드 값과의 차이를 본 논문에서 제

안한 skewed spectrum 모델을 적용하여 분석하였다. 그림 6으로부터 알 수 있는 것처럼 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 그러므로 이러한 방법은 스펙트럼 모드를 추정하는 방식으로는 적합하지 않음을 알 수 있다. 따라서 앞으로 skewed spectrum 또는 여러 개의 피크 점을 갖는 도플러 스펙트럼(multipeak spectrum)의 경우 모드 추정을 위한 효율적인 모드 추정자(mode estimator)에 관한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] L. J. Battan, Radar Observation of the Atmosphere, Univ. of Chicago Press, Chicago Illinois, 1973.
- [2] K. S. Gage, J. L. Green, T. E. VanZandt, "Use of Doppler radar for the measurement of atmospheric turbulence parameters from the intensity of clear-air echoes", Radio Science 15, pp. 407-416 1980.
- [3] W. H. Heiss, D. L. McGrew, D. Sirmans "NEXRAD : Next generation weather radar (WARR-88D)", Microwave Journal, pp. 79-98, 1990.
- [4] L. H. Janssen, G. A. Van der Spek, "The shape of Doppler spectra from precipitation", IEEE Trans. Aerospace and Electronic System, AES-21, pp. 208-219, 1985.
- [5] K. S. Miller, M. M. Rochwarger, "A covariance approach to spectral moment estimation", IEEE Trans. Information Theory, vol. IT-18, pp. 588-596, 1972.
- [6] D. S. Zrnic, "Spectral moment estimates from correlated pulse pairs", IEEE Trans. Aerospace and Electronic System, AES-13, pp. 344-354 1977.
- [7] G. W. Snedecor, "Statistical methods", The Iowa state University Press, 1956
- [8] 이상모, 이종길, "Estimation of the Spatial Wind Velocity Gradient Using Low PRF Radar", 제7회 신호처리합동학술대회 논문집, 1994.

이종길(Jonggil Lee)

정희원

한국통신학회논문지 제24권 1A호 참조