

## 국지적 기상 레이더에서의 배열 안테나를 이용한 효율적인 클러터 제거 방법 분석

이종길\*

### Analysis of the Efficient Clutter Removal Method Using an Array Antenna in a Local Weather Radar

Jonggil Lee\*

\*Professor, Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012 Korea

#### 요 약

최근 국지적인 돌풍이나 호우 등의 기상이변에 의한 재난이 빈번히 발생함에 따라 국지적인 기상 레이더를 활용한 기상위험 현상의 탐지가 매우 시급한 문제이다. 이러한 목적의 기상 레이더는 저고도 탐지 및 급변하는 기상상황의 빠른 탐지가 필수적이다. 따라서 강력한 지표면 클러터를 효율적으로 제거하면서도 기상 정보의 빠른 업데이트가 매우 중요하다. 그러므로 고각별 탐지를 위한 기계적인 안테나 조정이 별도로 필요하지 않으면서도 지표면 클러터의 효율적인 제거도 가능한 적절한 방법을 적용하여야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 간단한 구조의 배열 안테나를 이용한 효율적인 공간 FFT 알고리즘을 통한 고각 필터뱅크 구현 방법에 대한 유용성을 분석하고 고찰하였다. 이러한 방법을 사용하면 탐지 과정에서 지표면 클러터에 의한 영향을 최소화하면서도 빠른 기상정보의 업데이트가 가능함을 보였다.

#### ABSTRACT

As the likelihood of occurrence of the localized microbursts or severe flooding is increased due to the unusual weather changes, it is the very urgent problem to detect these weather hazards with a local weather radar. For a local weather radar of this purpose, it is essential to detect the low altitude and the fast varying weather conditions. Therefore, the very fast update of the weather information and the efficient clutter removal is very important. To achieve this goal, the appropriate method should be applied which does not need the mechanical elevation scanning and has the capability of the efficient clutter removal. Therefore, in this paper, the usefulness of the implementation of elevational filter banks with the spatial FFT algorithm was analyzed and investigated using a simple array antenna. It is shown that the suggested method can be used for both the minimization of the ground clutter and the fast update of weather information.

**키워드** : 저고도 기상 탐지, 국지적 기상 위험, 고각 필터뱅크, 배열 안테나

**Keywords** : Detection of low elevation weather, Local weather hazard, Elevational filter bank, Array antenna

Received 29 June 2022, Revised 3 July 2022, Accepted 19 July 2022

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

Professor, Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.8.1180>

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

기상 자료를 수집하기 위한 기상 레이더 시스템은 지금까지 다양한 목적으로 발전되어 왔으며 널리 활용되고 있다. 우리나라에서 현재 운용되어지는 기상 레이더는 중장거리용으로 매우 넓은 영역에 걸친 전반적인 기상 상황을 파악하는 목적으로는 매우 유용하다. 그러나 최근에는 온난화 등에 의한 국지적 기상이변 현상들이 자주 발생하고 있기 때문에 이러한 국지적 기상위험의 탐지 및 예보, 조기 경보 등의 목적으로 활용되기에는 적합하지 않다. 따라서 기존의 중장거리 기상레이더로 파악하기 어려운 영역들을 국지적인 기상 레이더들을 이용하여 더 세밀하게 보완할 수 있는 방법들이 지속적으로 연구되고 있다[1-4].

이러한 단거리 기상 레이더 시스템이 담당하는 영역은 기존의 중장거리 레이더로 관측이 어려운 저고도 및 매우 소규모로 발생하는 돌풍 등의 급변하는 기상 현상들이다. 따라서 빠른 기상신호 획득 및 처리뿐만 아니라 높은 해상도가 요구된다. 그러므로 이러한 목적의 기상 레이더에서는 탐지 영역의 공백을 매우기 위하여 저고도 탐지가 가능하여야 할뿐만 아니라 빠른 기상 변화 현상을 실시간으로 파악하는 것이 가장 중요하다. [5-6].

앞에서 언급한 바와 같이 이러한 목적의 국지적인 기상 레이더의 경우 저고도 탐지가 필수적인데 시스템 운용환경을 고려하여 보면 우리나라의 지형 특성상 강력한 지표면 반사에 의한 클러터가 존재할 수 있다. 또한 급변하는 기상상황의 추적을 위해서는 고각별 기상정보들의 빠른 업데이트가 필수적이다.

그러므로 본 논문에서는 이러한 급변하는 풍속에 의한 기상 위험 현상의 탐지를 위하여 간단한 수직 배열 구조의 안테나를 활용한 저고도 탐지용 FFT(fast Fourier transform) 공간 필터뱅크를 통한 수신 빔 형성으로 클러터 제거 및 빠른 고각 스캔을 가능하게 함으로써 효율적인 기상 정보의 획득 및 업데이트가 이뤄질수 있는 방법에 대한 분석 및 고찰을 수행하였다.

## II. FFT 공간 필터뱅크 구현

앞장에서 설명한 바와 같은 목적을 달성하기 위하여 기상 레이더 시스템에서 수직으로 간단한 구조의 수신

배열 안테나를 적용할 수 있다. 초 단거리용 시스템이기 때문에 송신 빔은 전체 관측 범위에 해당하는 고각 방향으로 넓게 분산되더라도 큰 문제가 발생하지 않는다. 따라서 안테나 구조는 고각방향으로 넓게 빔이 형성되며 수평(azimuth) 방향으로는 좁은 빔이 형성되는 한 개의 송신용 도파관 슬롯(slotted waveguide array) 안테나와 수직 배열된 N개의 수신용 도파관 슬롯 안테나들로 구성할 수 있다. 그림 1에서 보는 것처럼 수직으로 배열된 N 개의 안테나에서의 수신 고도 각,  $\theta$  에 따른 안테나의 위상 차이는 다음과 같이 표시될 수 있다[7].

$$\psi(n) = \beta \sin \theta n d_s \text{ for } n = 0 \cdots N-1 \quad (1)$$

where  $\beta = 2\pi/\lambda$

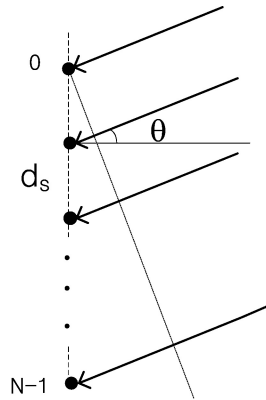


Fig. 1 Phase shifts of N array elements according to the elevation angle,  $\theta$

식(1)에서의  $d_s$ 는 안테나들 간의 간격,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다. 따라서 수신고도 각도에 따른 N 개의 배열 안테나에서의 위상 변화는 공간 주파수(spatial frequency)로 표시될 수 있다. 전자파 반사에 의하여 기상 레이더에 수신되는 고각의 최대 범위는  $-90^\circ$ 에서  $90^\circ$ 가 된다. 따라서 식 (1)에서의 안테나들 간의 배열간격 즉 공간 샘플링 간격 주파수는 최대 공간 주파수의 최소 2배가 되어야 한다. 그러므로 다음과 같은 부등식을 만족하여야 한다.

$$\frac{1}{d_s} \geq 2 \frac{\sin \theta_{\max}}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 것처럼 안테나들 간의 간격은  $\lambda/2$  보다 작거나 같아야 한다. 그러나 공간 샘플링 전체 구간거리를 늘려야 공간 주파수 즉 고도 각 해상도를 높일 수

있기 때문에 간격을 최대값,  $\lambda/2$ 로 설정하여야한다. 안테나들 간격을  $\lambda/2$  보다 크게 설정할 경우 공간 주파수 해상도는 높아지지만 모호성(ambiguity)이 발생함으로 공간필터뱅크 구현에 문제가 된다. 따라서 본 논문에서는 배열 안테나에서의 안테나 간격은  $\lambda/2$  로 가정하였다. 따라서 식 (1) 은 다음과 같이 표시된다.

$$\psi(n) = 2\pi(\sin\theta/2)n \text{ for } n = 0 \cdots N-1 \quad (3)$$

따라서 90도~90도 사이의 고도 각,  $\theta$  의 변화에 따른 정규화 된 공간주파수의 범위는 -0.5에서 0.5 사이의 값을 갖게 된다. 그러므로 FFT 공간 주파수 필터뱅크 구현 시 정규화 된 3dB 고각 필터 대역폭은 모두 균일하며 근사적으로  $1/N$  의 값으로 나타난다. 그러나 이러한 공간 주파수 필터뱅크 구성에서 주의할 점은 대응되는 고도 각,  $\theta$  와 정규화 된 공간 주파수,  $\sin(\theta)/2$  와는 선형적인 관계가 아니다. 따라서 그림 2에서 표시한 것처럼  $N=16$  인 경우의 FFT 고각 필터뱅크 구현 시 대응되는 고각 대역폭은 공간 주파수에 따라 서로 다르게 나타난다. 그림 2와 같이 상대적으로 낮은 공간 주파수를 가지는 즉, 낮은 고각 영역에서는 필터뱅크가 더 촘촘하게 높은 고각 영역에서는 다소 듬성하게 형성되는 결과를 초래한다.

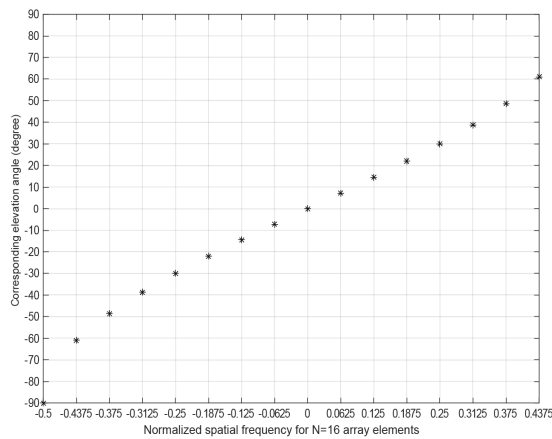


Fig. 2 Elevation angle corresponding to the normalized spatial frequency for N=16 array elements

그러나 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 16개의 배열 안테나를 사용한다고 하면 -60도 사이에서 60도 사이의 고각에서는 10도 정도의 간격으로 거의 균일한 고각 필터뱅크의 형성이 가능하다. 물론 고각의 절대 값이 60도를 넘는 범위에서는 필터뱅크의 간격이 너무 크게 늘어

나지만 실제적인 기상정보 탐지 환경을 고려한다면 고각 스캔 범위는 -60도에서 60도 범위면 충분하다고 할 수 있다. 따라서 이러한 고각 필터뱅크를 이용하면 안테나의 기계적인 틸팅(tilting)에 의한 추가적인 공간 스캔이 불필요하다. 따라서 기상 정보갱신을 위한 공간 스캔을 매우 짧은 시간 내에 효율적으로 수행할 수 있다. 또한 고각에 따른 지표면이나 인공 구조물들에 의한 강력한 클러터들을 용이하게 제거할 수 있다. III 장에서는 기상 정보 분석을 위하여 기상 레이더에서 추출해야할 기상 변수들의 추정 방법을 간략하게 설명하였다. IV 장에서는 앞에서 언급한 고각 필터뱅크 형성을 통한 기상 정보 추출에 대한 신뢰성 및 정확성 정도를 열악한 운용 환경을 가정하여 다방면으로 분석하고 검증 하였다.

### III. 스펙트럼 모멘트 추정

기상 레이더에서는 단위 셀 공간의 입자들에 의하여 반사되는 기상 신호로부터 강우 및 풍속, 풍속의 교란 정도와 직접적으로 연관되는 기상 변수들을 추출해야 한다. 따라서 이러한 변수들을 추출하기 위하여 수신되는 기상 신호의 도플러 스펙트럼 영역에서의 0 번째, 첫 번째 및 두 번째 스펙트럼 모멘트들을 각각 추정한다. 0 번째 모멘트는 강우 입자 등에 의한 반사 강도를 나타내는 것으로 강우량 예측과 직접적인 연관성을 나타낸다. 이러한 모멘트 추정 방법에는 수신 기상신호의 자기상관 함수(autocorrelation)를 이용하는 간접적인 방법과 FFT 알고리즘을 통하여 기상 도플러 스펙트럼을 얻은 후 추정치를 계산하는 두 가지 방법이 있다[8]. 전자의 경우는 연산 양이 적다는 장점이 있어 널리 사용되고 있으나 도플러 스펙트럼의 왜곡이 클 경우 추정치의 오차가 매우 크게 발생할 수 있다.

송수신 펄스페어(pulse-pair)에 의한 0번째 스펙트럼 모멘트는 다음처럼 자기상관 함수 추정치,  $\hat{R}(0)$ 로 표시된다.

$$\hat{R}(0) = \frac{1}{2M} \sum_{m=0}^{M-1} Z(mT)Z^*(mT) + Z(mT+T_s)Z^*(mT+T_s) \quad (4)$$

식 (4)에서의 T 및  $T_s$  각각 펄스페어들 간의 시간 간격 및 펄스페어내의 시간 간격을 나타내며 Z 는 수신 단

에서의 I(in-phase) 및 Q(quadrature) 데이터를 나타내며 \* 는 켈레 복소수 값을 의미한다. 기상 도플러 전력 스펙트럼 추정치  $\hat{P}(k)$ 를 직접 이용하는 경우에는 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{P}_{0th} = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \hat{P}(k) \quad (5)$$

식 (4) 및 식 (5)는 반사 신호의 강도를 추정하는 방법이며 풍속 정보를 추출하기 위한 첫 번째 스펙트럼 모멘트 추정치, 즉 도플러 주파수 추정 값은 자기상관 함수 추정치 또는 도플러 스펙트럼으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{P}_{1st} = \hat{f}_d = \frac{1}{2\pi T_s} \arg \hat{R}(T_s) \quad (6)$$

$$\text{where } \hat{R}(T_s) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} Z(mT)Z^*(mT + T_s)$$

$$\hat{P}_{1st} = \hat{f}_d = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} f_k \hat{P}(k)}{\sum_{k=0}^{L-1} \hat{P}(k)} \quad (7)$$

식 (6) 및 (7)은 평균 도플러 주파수, 즉 평균풍속을 추정하는 방법으로서 펄스페어를 이용한 자기상관 함수나 기상 도플러 전력스펙트럼 추정을 이용한다.

두 번째 스펙트럼 모멘트는 도플러 스펙트럼 폭 또는 풍속 교란(turbulence) 정도를 표시하는 파라미터이며 다음과 같은 방법으로 추정할 수 있다[8].

$$\hat{P}_{2nd} = \sigma_f = \frac{1}{2\pi^2 T_s^2} \left| \ln \left( \frac{\hat{P}_{0th}}{\hat{R}(T_s)} \right) \right| \quad (8)$$

$$\hat{P}_{2nd} = \sigma_f^2 = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} (f_k - \hat{f}_d)^2 \hat{P}(k)}{\sum_{k=0}^{L-1} \hat{P}(k)} \quad (9)$$

식 (8)에서 주의할 점은 추정치에 의한 연산이기 때문에 도플러 스펙트럼 폭이 매우 좁고 SNR 값이 낮은 경우 자연로그 값이 음수로 나타날 수 있다. 이러한 경우에는 그 값을 제외하거나 0 으로 표시할 수 있다.

이제 이러한 기상 정보 추출에 필요한 스펙트럼 모멘트

추정치들이 앞에서 설명한 클러터 환경 및 공간 필터 적용 유무에 따라 어떻게 나타나는지를 다음 장에서 검증 및 분석하고자 한다. 이러한 시험을 위하여 국지적 기상 레이더의 전형적인 운용 환경을 고려할 수 있도록 기상 신호 및 지표면 클러터를 상황에 따라 적절하게 모의 발생시켰다[9]. 또한 발생된 클러터 및 도플러 스펙트럼들은 전형적인 가우시안 형태로 나타나도록 하였으며 신호 및 클러터, 잡음 전력 등의 크기가 원하는 시험 조건에 따라 적절히 조정될 수 있도록 유연하게 구성하였다.

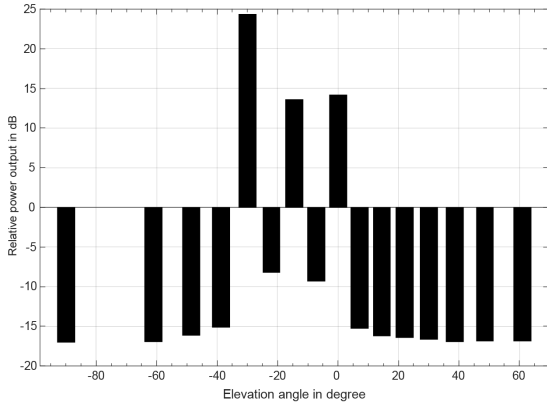
#### IV. 결과 분석 및 고찰

앞장에서 설명한 바와 같이 공간 필터뱅크 구현을 통한 클러터 제거 및 고도별 기상정보 추출의 신뢰성 정도를 분석하기 위하여 국지적 기상 레이더에서의 전형적인 환경을 고려하여 모의 신호를 발생시켰으며 이를 이용하여 결과 값들을 추정하고 분석하였다. 구체적으로 제안한 방법의 효율성 및 정확성을 분석하고 검증하기 위하여 표 1에서 제시한 clutter to noise ratio(CNR), signal to noise ratio(SNR), 입사방향에 따른 파라미터 값들을 클러터 및 기상신호 모의 구현에 적용하였으며 배열 안테나에서의 수신용 수직배열 안테나 숫자는 16 개로 가정하였다.

**Table. 1** Parameters for simulation of the clutter and the weather signal

Clutter 1	Clutter 2	Weather signal
Incident angle of -30 degree	Incident angle of -15 degree	Incident angle of 0 degree
CNR of 30dB	CNR of 20dB	SNR of 20dB
The mean Doppler velocity of 0 m/sec	The mean Doppler velocity of 0 m/sec	The mean Doppler velocity of 10 m/sec
The width Doppler velocity of 0.5 m/sec	The width Doppler velocity of 0.3 m/sec	The width Doppler velocity of 1.5 m/sec

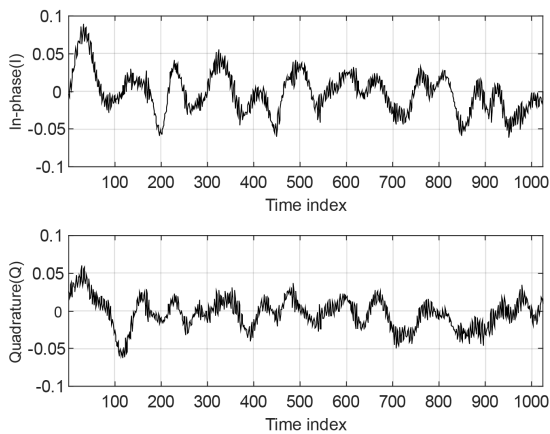
그림 3에서는 공간 필터뱅크 구성을 이용하여 각 고도각 별 상대적인 출력 값들을 막대그래프로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 각 공간 필터뱅크에 대응되는 고도 각별로 기상신호 및 두 종류의 지표면 클러터가 각각 분리되어 출력되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 3에서 보는 것처럼 클러터와 기상신호가 입사되는



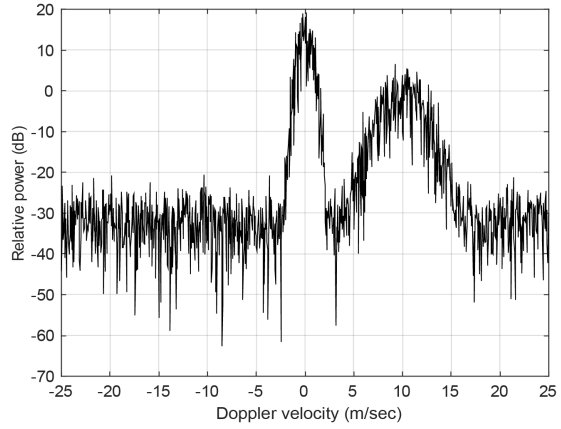
**Fig. 3** The relative power output corresponding to each elevation angle based on the scenario of table 1 for N=16 array elements

고도 각, -30도 및 -15도 그리고 0도 이외의 탐지 영역에서는 잡음전력이 나타나고 있음을 알 수 있다. 추가적으로 확인이 필요한 중요한 요소는 이와 같이 공간필터를 이용하여 고도각 별로 수신된 클러터 및 기상신호의 도플러 스펙트럼들이 예상한 바와 같이 정확하게 표시되고 있는지 여부이다. 따라서 본 논문에서는 표 1에 따라 모의 구현한 클러터와 기상신호를 모두 포함한 전체 I, Q 데이터 및 도플러 스펙트럼과 각 고도각 별로 출력되어 나타나는 도플러 스펙트럼들을 비교할 수 있도록 그림 4에서 그림 8까지 나타내었다.

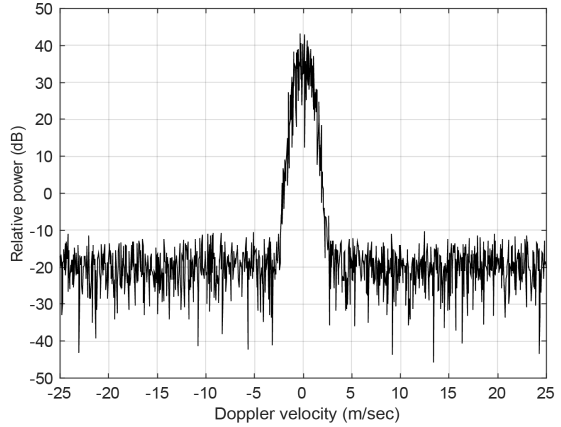
그림 4 및 그림 5의 경우는 공간 필터뱅크를 적용하지 않았을 경우의 안테나 수신 단에 나타나는 클러터 및 기상신호의 I, Q 데이터와 도플러 스펙트럼을 표시하고 있다. 표 1에서의 파라미터 값들에서 알 수 있는 것처럼



**Fig. 4** The simulated In-phase and quadrature data of clutters and the weather signal as shown in Table 1



**Fig. 5** The simulated Doppler spectrum of clutters and the weather signal as shown in Table 1



**Fig. 6** The output Doppler spectrum of clutters and the weather signal at the elevation angle of -30 degree

저주파 도플러 영역에서의 비교적 도플러 폭이 좁은 두 개의 강력한 클러터 성분과 상대적으로 고주파 도플러 영역에서의 도플러 폭이 넓은 기상신호 성분들이 동시에 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6에서는 공간 필터뱅크, 즉 -30도에 해당하는 고각에서의 출력을 나타내었다. 그림 6의 도플러 스펙트럼 추정으로부터 알 수 있는 것처럼 -30도 고각으로 입사되는 30dB CNR의 클러터만 분리되어 표시되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7의 경우는 -15도에 해당하는 고각에서의 도플러 스펙트럼 추정을 표시한 것으로 그림 6에 비하여 CNR이 20dB로 다소 낮으며 도플러 폭도 다소 좁게 형성되는 클러터 스펙트럼이 나타나고 있다.

그림 8에서는 0도에 해당하는 고각에서의 도플러 출력 스펙트럼을 표시하였다. 표 1에서 보는 것처럼 기상

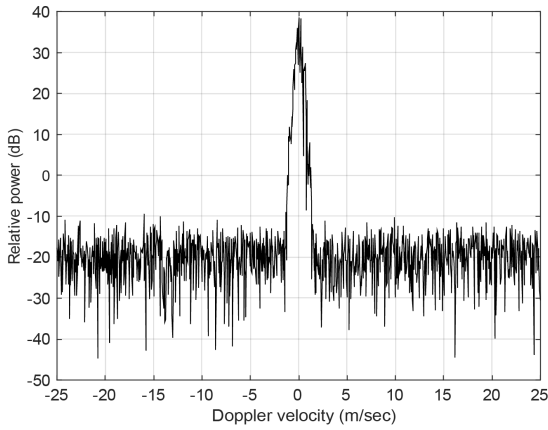


Fig. 7 The output Doppler spectrum of clutters and the weather signal at the elevation angle of -15 degree

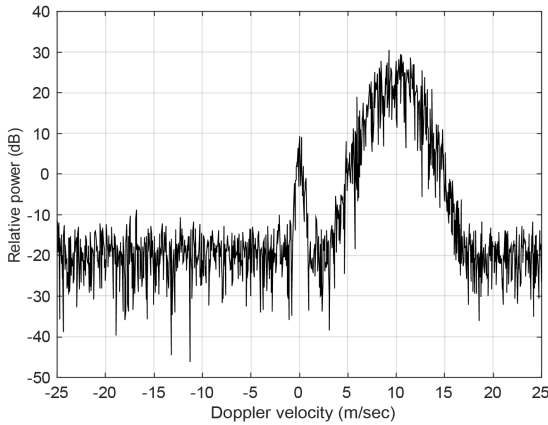


Fig. 8 The output Doppler spectrum of clutters and the weather signal at the elevation angle of 0 degree

신호의 입사각이 0도이므로 고각 0도에서의 도플러 기상신호만 표시되어야 한다. 그러나 표 1에서 제시된 매우 강력한 두 개의 클러터들이 완벽하게 제거되지 않고 일부 잔존하여 나타남을 그림 8에서 확인할 수 있다. 이러한 상황은 모의구현을 통한 검증 및 분석을 위해 클러터의 강도를 지나치게 크게 설정한 경우로 실질적으로는 거의 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 즉 그림 3에서도 볼 수 있는 것처럼 고각 0도에서의 기상신호 출력이 일부 잔존 클러터에 의하여 약간 높게 나타나고 있으나 큰 차이를 보이지는 않는다.

이제 이러한 방법을 적용하여 25개의 거리 방(range cell) 별 관련 기상정보 파라미터들을 추출함으로써 그 결과 값들이 정확하게 나타나고 있는지를 검증하고 분석하였다. 앞에서 언급한 0번째 스펙트럼 모멘트의 경우는

기상신호의 반사전력을 추정하는 것으로 그림 3에 표시된 바와 같이 공간 필터뱅크를 적용할 경우 클러터와 기상신호 전력이 고도 각 별로 잘 분리되어 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 여기에서는 첫 번째 및 두 번째 스펙트럼 모멘트, 즉 평균 풍속 및 풍속의 폭 즉 표준편차 추정에서의 정확도를 분석하는 것이 중요하다.

이러한 기상 정보 추정치들의 정확성 개선정도에 대한 평가를 위하여 표 1에서와 같은 동일한 환경에서 고각 0도에서의 기상정보의 도플러 평균 속도를 각 거리 방별로  $\pm 15\text{m/sec}$  사이에서 변화시키면서 식 (6)에서 식 (9)까지를 이용하여 펄스페어 추정치 및 도플러 스펙트럼 추정치에 의한 모멘트들을 계산하여 공간필터 적용 여부에 따른 그 결과 값들을 각각 나타내었다.

그림 9는 펄스페어 추정 방법에 의한 평균 도플러 속도 추정치 값들을 25개의 거리 방에 대하여 각각 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있는 것처럼 실제 평균 도플러 속도 값들과 본 논문에 제안한 방법을 이용한 경우의 펄스페어 추정치 값들이 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 반면 공간필터뱅크를 적용하지 않은 기존 방법의 경우에는 강력한 지표면 클러터들로 인하여 도플러 평균속도 추정치가 거의 0으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

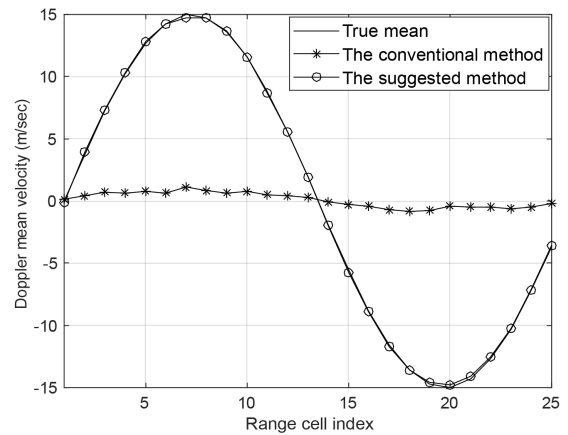
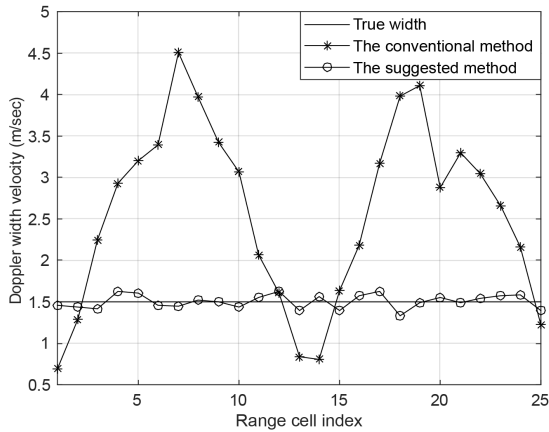


Fig. 9 Comparison of the pulse-pair mean estimates between the conventional method and the suggested method using the spatial filter bank

그림 10의 경우는 도플러 스펙트럼 폭 추정, 즉 도플러 속도의 표준편차를 나타내는 것으로 대기교란 정도나 셀 내의 풍속변화 정도 등을 나타내는 파라미터이다. 본 논문에서 제안한 공간 필터뱅크를 적용할 경우 약간

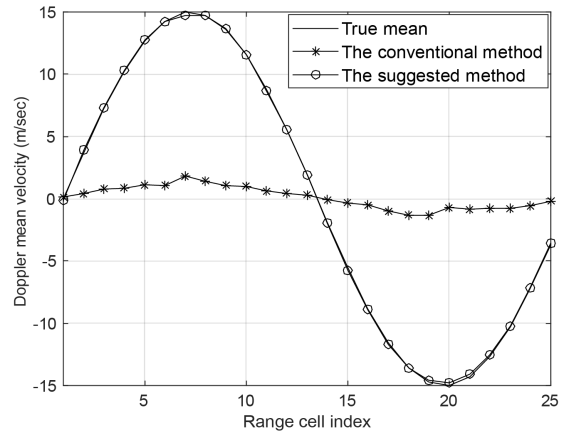


**Fig. 10** Comparison of the pulse-pair width estimates between the conventional method and the suggested method using the spatial filter bank

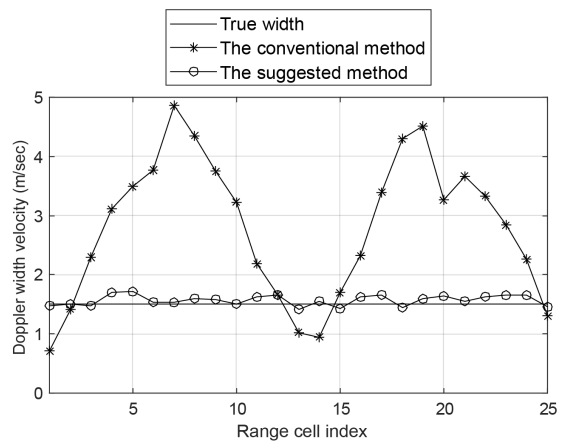
의 변동성이 있지만 펄스페어 추정치들이 참값과 거의 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 약간의 변동성은 모의 구현한 클러터 및 기상 신호에 배경잡음 전력 및 전자파 전파에 따른 랜덤 전력 변동성도 추가적으로 고려되었기 때문이다. 반면 기존의 방법을 그대로 적용하는 경우 그림 10에서 보는 것처럼 강력한 클러터들로 인하여 펄스페어 추정치들이 무의미하게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 11 과 그림 12는 수신되는 시간영역의 I, Q 기상 신호로부터 FFT(fast Fourier transform) 스펙트럼을 추정 후 식 (7) 및 식 (9)에 의한 추정치 값들을 각각 나타낸 결과 그림들이다. 그림 11에서 보는 것처럼 제안한 방법을 사용할 경우 도플러 평균속도의 추정치들은 스펙트럼 추정 방식에서도 참값들과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 기존의 방법을 적용할 경우 강력한 클러터들로 인하여 스펙트럼 추정 방식에서도 도플러 평균속도가 거의 0으로 무의미하게 나타남을 그림 11에서 확인할 수 있다. 그림 12는 도플러 폭 추정치들을 표시한 것이다. 제안한 방법을 적용할 경우 모의 구현상의 랜덤 잡음이나 전자파 전파에서의 수신 전력의 랜덤 변동성 때문에 스펙트럼 추정에 의한 경우에도 펄스페어 추정치들과 유사하게 참값 근처에서 약간의 변동성을 보인다. 그러나 전체적으로는 비교적 정확한 추정치들이 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면 기존의 방법을 적용할 경우 그림 12에서 볼 수 있는 것처럼 강력한 잔존 클러터 때문에 스펙트럼 추정에 의한 도플러 폭 추

정치들도 펄스페어 추정치들처럼 참값과는 전혀 다른 의미 없는 결과 값들이 나타난다. 그러므로 제안한 방법은 클러터의 효율적인 제거와 기상정보의 빠른 업데이트에 유용함을 알 수 있다.



**Fig. 11** Comparison of the spectrum mean estimates between the conventional method and the suggested method using the spatial filter bank



**Fig. 12** Comparison of the spectrum width estimates between the conventional method and the suggested method using the spatial filter bank

## V. 결론

국지적 기상레이다에서는 저고도 탐지 특성으로 인한 강력한 지표면 클러터 문제뿐만 아니라 지역적으로 급변하는 돌발적인 기상상황의 탐지를 위한 빠른 기

상정보의 업데이트가 필수적으로 요구된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 클러터 문제들을 해결하면서도 고도별 기상정보의 빠른 업데이트가 가능하게끔 배열 안테나를 이용한 수신 빔 형성을 통한 공간필터를 적용함으로써 요구되는 성능을 효율적으로 구현할 수 있는 방법을 제안하였다.

이러한 방법을 적용하면 고각에 따른 강력한 지표면 클러터를 배제하면서도 기상정보의 빠른 업데이트가 가능하기 때문에 국지적인 기상재해나 위험 현상을 신속하면서도 정확하게 탐지할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후 구성될 국지적인 기상 레이더 망에서의 실질적인 활용 가능성을 크게 높일 수 있을 것이다.

### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Incheon National University Research Grant in 2021.

### REFERENCES

- [ 1 ] J. A. Ortiz, J. L. Salazar-Cerreno, J. D. Díaz, R. M. Lebrón, N. A. Aboserwal, and L. Jeon, "Low-Cost CMOS Active Array Solution for Highly Dense X-Band Weather Radar Network," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 7, pp. 5421-5430, Jul. 2020.
- [ 2 ] A. D. Byrd, R. D. Palmer, and C. J. Fulton, "Development of a Low-Cost Multistatic Passive Weather Radar Network," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 4, pp. 2796-2808, Apr. 2020.
- [ 3 ] P. Kollias, D. J. McLaughlin, S. Frasier, M. Oue, E. Luke, and A. Sneddon, "Advances and applications in low-power phased array X-band weather radars," in *Proceedings of 2018 IEEE Radar Conference*, Oklahoma City: OK, pp. 1359-1364, 2018.
- [ 4 ] J. Cai, Y. Zhang, R. J. Doviak, Y. Shrestha, and P. W. Chan, "Diagnosis and Classification of Typhoon-Associated Low-Altitude Turbulence Using HKO-TDWR Radar Observations and Machine Learning," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 6, pp. 3633-3648, Jun. 2019.
- [ 5 ] M. Golbon-Haghighi, G. Zhang, and R. J. Doviak, "Ground Clutter Detection for Weather Radar Using Phase Fluctuation Index," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 5, pp. 2889-2895, May. 2019.
- [ 6 ] D. Schwartzman, S. M. Torres, and T. -Y. Yu, "Distributed Beams: Concept of Operations for Polarimetric Rotating Phased Array Radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 11, pp. 9173-9191, Nov. 2021.
- [ 7 ] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: the parametric approach," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 67-94, Jul. 1996.
- [ 8 ] D. S. Zrnic, "Estimation of spectral moments for weather echoes," *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 17, no. 4, pp. 113-128, Oct. 1979.
- [ 9 ] J. Lee, "The efficient clutter simulation method for airborne radars," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1123-1130, Sep. 2019.



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, 레이더 신호처리, 레이더 시스템