

---

# 위상배열 안테나를 활용한 기상 레이더 시스템에서의 클러터 제거에 관한 연구

이종길\*

## A Study on Clutter Cancellation in a Weather Radar System Using a Phased Array Antenna

Jonggil Lee\*

---

이 논문은 인천대학교 2007년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

---

### 요 약

비교적 낮은 고도에서의 기상위험 탐지를 위한 지상 및 항공기용 기상 레이더의 경우 강력한 지표면 반사파가 존재하게 되며 이러한 강력한 클러터의 제거 없이는 미약한 도플러 신호로부터 신뢰성 있는 기상 자료의 추출이 불가능하다. 그러나 이동 클러터뿐만 아니라 고정 클러터의 경우에도 안테나 회전 및 운영환경에 따른 도플러 변이가 일어나게 되며 이러한 클러터들을 도플러주파수 영역에서 제거하기는 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 논문에서는 도플러 기상 레이더 시스템에 간단한 구조를 갖는 배열 안테나를 활용하여 클러터들을 공간상에서 효율적으로 제거할 수 있음을 보였다. 적응적으로 동작하는 배열 안테나 시스템의 성능을 검증하기 위하여 다양한 이동 및 고정 클러터, 기상신호들을 모델링 하고 이러한 모의 데이터들을 이용하여 기상 레이더에서의 펄스페어 추정치의 정확성 정도를 비교, 분석하였다.

### ABSTRACT

Since there are very strong clutter returns in airborne and ground weather radars used for the detection of low altitude weather hazards, the reliable weather data cannot be extracted from the weak Doppler weather signal without cancellation of these strong clutter returns. However, the clutter cancellation in Doppler frequency domain is not an easy task since even the fixed clutter returns not to mention the moving clutter can have Doppler shifts due to the antenna rotation and operational environment. Therefore, it was shown in this paper a simple array antenna system can be used for the efficient clutter cancellation in the spatial domain. The weather signal, various moving and fixed clutters were modelled and simulated to prove the performance of this adaptive array system. Also, the degree of accuracy in pulse-pair estimates of a weather radar was compared and analyzed from the simulated weather data.

### 키워드

도플러 기상 레이더, 적응 안테나, 클러터, 펄스페어 추정치

## I. 서론

기상 조건의 변화 및 악천후에 따른 항공기 추락사고 등을 방지하기 위한 목적으로 항공기에 도플러 레이다를 장착하거나 지상의 기상 레이다를 활용하여 기상 이변 및 돌풍 등의 국지적인 위험 요소들을 미리 탐지하여 이를 회피할 수 있는 방법들에 관한 실용화 및 연구 등이 지속적으로 이루어져 왔다[1][2].

이러한 항공기 및 지상용 기상 도플러 레이다는 적절한 거리에서 위험한 기상 현상들을 미연에 탐지하여 위험 상황들을 회피할 수 있게끔 경고하여 줄 수 있어야 한다. 그런데 이러한 기상 악천후는 아주 짧은 시간 동안 급격한 기류 변화에 의하여 발생할 수 있고 또한 매우 낮은 고도에서 발생하는 경우도 있다. 이러한 상황에서는 비구름 먼지 등에 의하여 반사되어 나타나는 기상정보 신호보다 지표면에서 반사되는 클러터가 훨씬 더 강력하게 존재하게 된다. 따라서 이러한 클러터들을 거의 완전하게 제거하여야만 상대적으로 매우 미약한 기상 정보 신호들을 추출해낼 수 있을 것이다.

일반적으로 기상 정보를 제공해주는 수증기, 먼지 입자 등은 풍속에 준하는 속도 성분을 갖게 되나 고정된 지표면 클러터 등은 속도 성분을 가질 수 없다. 따라서 반사되는 클러터들은 항공기 속도를 감안한 상대 도플러 주파수가 0 부근에 분포하게 될 것이다. 그러므로 도플러 영역에서 0 부근의 저주파를 차단하는 고주파 필터를 사용하면 이러한 강력한 지표면 클러터를 효율적으로 제거할 수 있다. 그러나 지표면 반사에 의한 클러터는 기상 정보에 의한 반사 신호 전력보다 대부분의 경우 훨씬 강력하게 나타난다. 이러한 클러터 스펙트럼은 이론적으로 도플러 주파수가 0 부근에 집중되어 나타나므로 기상 신호와는 잘 분리될 수 있는 특징을 갖는다. 그러나 이러한 클러터 제거방법은 큰 단점들을 가지고 있다. 즉, 기상 레이다의 운용환경 및 안테나의 회전등에 의하여 고정 클러터가 변조되어 도플러 변이를 가질 수 있기 때문에 기상신호와 분리하기가 쉽지가 않다. 또한 공항 등에 설치된 단거리 터미널 기상 레이다의 경우 차량 등 주변 이동 물체에 의한 이동 클러터들은 제거가 거의 불가능하다. 특히 한국과 같은 산악지역에서는 지표면 클러터의 반사강도가 매우 크게 나타나기 때문에 이러한 클러터들의 효율적인 제거는 정확한 기상정보 추출을 위해서는 매우 중요한 문제이다.

대부분의 기상 레이다는 관측영역을 확보하고 지표면, 산등에 의한 반사파들의 영향을 줄이기 위하여 비교적 높은 위치에 설치하여 안테나의 고도 각을 적절하게 유지한다. 따라서 이러한 지표면 및 이동클러터들은 대부분 안테나의 부엽에 의하여 발생하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 기상 레이다 운용 환경에 따라 달라지는 이러한 이동 및 고정 클러터들을 적응적으로 상쇄시킬 수 있는 간단한 위상배열 안테나를 활용한 기상 레이다 시스템의 성능을 고찰하였다.

## II. 기상 레이다 위상배열 안테나

일반적으로 쓰이는 기상 레이다용 안테나는 반사 안테나(reflector antenna) 이다. 이러한 안테나들을 설계할 경우 클러터의 영향을 가능한 줄이기 위하여 부엽의 크기를 최소화해야 하는데 현재 미국 및 유럽 등에서 사용되어지는 차세대 기상 레이다는 그 특성이 비교적 우수한 편이다[3]. 그러나 한국과 같은 산악 및 해안지형에서는 지표면으로 반사되는 클러터의 강도가 상대적으로 매우 크게 나타나기 때문에 배열 안테나를 사용하여 이러한 클러터들을 제거해주는 것이 시스템의 성능개선에 많은 도움을 줄 것이다. 그러나 센서수가 많은 복잡한 배열안테나를 사용할 경우 제작비용이 많이 들뿐만 아니라 클러터 적응처리과정에서의 계산양도 엄청나게 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 실질적인 구현 가능성을 고려한 간단한 구조의 배열안테나를 가정하였다. 즉 슬롯 안테나를 수직방향으로 일정한 간격을 두고 4개를 배열시켜 각 슬롯 안테나 수신신호의 크기 및 위상을 제어할 수 있도록 하고 또한 360도 전 방향 탐지를 위하여 1분에 5-6회 정도 회전하는 형태의 레이다 시스템을 구성하는 것으로 하였다.

이러한 기상 레이다 시스템의 성능을 분석하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 레이다 안테나의 부엽으로 인하여 반사되는 지표면 클러터 및 이동클러터가 0도를 기준으로 하는 주빔 방향과 각각 서로 다른 입사각을 가지면서 수신된다고 가정하였다. 이러한 클러터들은 입사각에 따라 서로 다른 거리영역에 영향을 주게 되며 주빔으로부터 반사되는 기상신호와 달리 각각의 센서에 수신되는 클러터 반사파들은 센서간의 간격에 따른 시간지연, 즉 위상지연이 발생하게 된다. 따라서 입사

되는 신호들의 이러한 평면파 특성을 고려하여 각각의 센서별 가중치 값을 수신 상태에 따라 적응적으로 조절함으로써 기상신호에 심각한 영향을 줄 수 있는 부엽에 의한 클러터들을 제거할 수 있다. 그러나 레이더에서 사용하는 주파수대역폭이 매우 넓을 경우 각 주파수에 따른 센서별 위상지연 차이가 커지게 되므로 본 논문에서와 같은 간단한 배열 안테나 시스템으로는 만족스러운 결과를 얻기 어려울 것이다. 그러나 일반적으로 기상 레이더는 송신주파수 대역폭이 좁을 뿐만 아니라 실제 수신되는 클러터 및 기상신호는 대부분 2-3 KHz 도플러 대역폭내의 일부분에서만 나타난다. 따라서 이러한 주파수 차이에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도이다.

그림 1에서와 같이 센서 간 간격을  $a\lambda$  라고 하면 기준 센서로부터  $n$  번째 위치한 센서는 다음과 같은 위상지연 차이를 나타나게 된다.

$$\phi_n = na\lambda \frac{\omega_c}{c} \sin \theta = 2\pi na \frac{\lambda}{\lambda_c} \sin \theta \approx 2\pi na \sin \theta \quad (1)$$

식(1)에서  $\lambda$  는 송신 중심주파수를 기준으로 한 파장을 의미하며  $\lambda_c$  는 수신되는 전자파의 파장을 나타낸다. 여기서  $a$ 는 양의 실수를 나타내며 센서 간 간격을 파장의 단위로 나타내기 위한 변수이다. 센서간의 독립적인 특성을 유지하기 위하여 일반적으로  $a$  값은 1/2 이상이 되도록 하고 있다.

이제 이러한 배열 안테나의 센서 간 간격을 반 파장으로 하고 수신되는 전자파의 입사각  $\theta$ 에 따라 각 센서에 수신되는 반사파 클러터들을 표시하여 보면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_m(k) = C(k) \exp(-j m \pi \sin \theta) \quad k = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2)$$

여기서  $k$  는 시간영역에서의 클러터 샘플을 나타내며  $m$  은 배열 안테나에서의 각 안테나 센서를 표시한다.

이제 획득하고자하는 기상신호를 표시하여 보면 그림 1에서 나타낸 것처럼 기상신호는 안테나 주 빔의 지향방향으로부터 반사되는 신호를 의미하며 입사각은 0도로 표시된다. 따라서 기상신호 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_m(k) = S(k) \quad k = 0, 1, \dots, N-1; m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

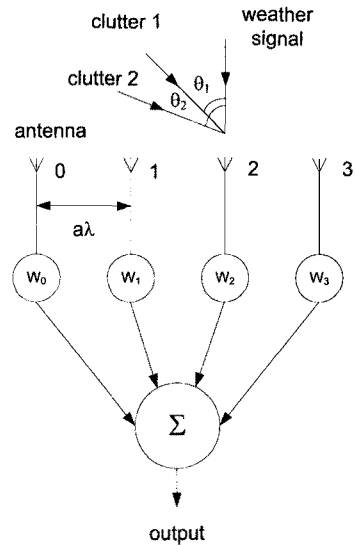


그림 1. 클러터 제거를 위한 적응 배열 안테나  
Fig. 1 Adaptive array antenna for clutter cancellation

이러한 클러터 및 기상신호, 배경 잡음 등을 포함하여 각 안테나 센서에 수신되는 전체신호를 벡터로 표시하여 보면 다음과 같다. 여기서  $T$  는 벡터의 전위(transposition)를 나타낸다.

$$X = S + C + N = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T \quad (4)$$

식 (4)에서의 수신신호벡터는 기상신호 및 클러터, 잡음이 존재하는 경우와 클러터 및 잡음만 존재하는 경우로 나눌 수 있다. 기상신호를 정확히 검출하기 위해서는 클러터와 잡음의 영향을 최소화해야 한다. 따라서 배열 안테나 시스템 출력에서의 신호 대 클러터 및 잡음을 더한 비, 즉 SCNR(signal-to-clutter plus noise ratio) 값을 최대로 할 수 있는 방법을 적용하여야 한다. 이러한 기법은 결국 배열 안테나에서의 각 센서별 계수벡터를 결정하는 문제로 귀착될 것이다.

이제 배열 안테나에서의 계수벡터를 다음과 같이 표시하여 보자.

$$\underline{W} = [W_0, W_1, \dots, W_{M-1}]^T \quad (5)$$

기상신호와 클러터 및 배경잡음과는 상관성이 없다는 가정 하에서 출력 SCNR 을 최대화하는 최적계수벡터는 다음과 같이 표시되는 선형제한조건을 갖는 최소분산 알고리즘을 통하여 구현할 수 있다[4].

$$\underset{W}{\text{Minimize}} \quad \underline{W}^H M_x W ; \quad \underline{S}^H \underline{W} = 1 \quad (6)$$

식(6)은 기상신호에 대한 단위이득을 유지하면서 출력 분산을 최소화 하는 계수벡터를 구하는 것을 의미한다. 여기서  $H$  는 Hermitian conjugate,  $M_x$  는 입력벡터,  $X$  의 공분산 행렬을 표시한다. 제한조건을 가지는 경우로 라그랑제 곱(Lagrange multipliers)을 이용하여 최적계수 벡터를 구하면 다음과 같이 나타난다.

$$\underline{W} = \frac{M_x^{-1} \underline{S}}{\underline{S}^H M_x^{-1} \underline{S}} \quad (7)$$

식(7)에서 보는 것처럼 계수벡터를 얻기 위해서는 공분산 행렬  $M_x$  를 필요로 한다. 그러나 실제로 정확한 공분산 행렬을 구하기는 어렵다. 따라서 다음과 같이 입력 샘플로부터 얻어질 수 있는 추정 값을 이용한다.

$$\hat{M}_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \underline{X}(k) \underline{X}(k)^H \quad (8)$$

식(8)에서의 공분산 행렬 추정치는 입력 샘플수가 클수록 더 정확한 추정치를 얻을 수 있다. 따라서 이러한 공분산 행렬의 추정치가 정확할수록 계수벡터는 최적치에 접근하게 된다. 그러나 공분산 행렬의 추정치는 레이다의 운용환경이나 이동 클러터 등을 고려하여 주기적으로 갱신하여 적응적으로 동작할 수 있어야 한다. 따라서 샘플수를 너무 크게 할 경우 시스템의 연산량이 급증하는 문제가 발생할 수 있다.

### III. 기상신호 및 클러터 모델

기상 레이다의 성능분석을 위해서는 적절한 기상신호 및 클러터의 모의구현이 필요하다. 즉 기상신호 및 전형적인 클러터의 특성을 잘 나타내줄 수 있는 모델을 이용하여야 할 것이다. 기상 레이다에서 획득한 실제 기상신호들은 대부분 중심 도플러주파수를 기준으로 대칭을 이루는 가우시안 도플러 전력 스펙트럼으로 표시할 수 있다[5]. 또한 지표면이나 이동하는 차량 등에 의한 클러터들은 기상신호에 비해 도플러 전력분산이 훨씬 적게 나타나는 경우가 많으나 안테나 회전 등에 의한 변조, 바람에 의한 도플러 변이 등을 고려하면 가우시안 모델의 파라미터들을 적절히 조정함으로써 모델링이 가능하다. 따라서 기상신호 및 클러터는 다음과 같은 가우시안 도플러 전력 스펙트럼 모델을 이용할 수 있다.

$$D(f) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}w_s} \exp\left[-\frac{(f-f_s)^2}{2w_s^2}\right] + \sum_{i=1}^L \frac{C_i}{\sqrt{2\pi}w_{Ci}} \exp\left[-\frac{(f-f_{Ci})^2}{2w_{Ci}^2}\right] + N \quad (9)$$

식(9)에서의  $S$ ,  $C_i$  및  $N$ 은 각각 기상신호 전력 및  $L$  개의 클러터, 배경잡음 전력 들을 의미한다. 또한  $f_s$  및  $f_{Ci}$ 는 기상신호 및 클러터들의 평균 도플러 주파수들을 나타낸다. 식 (9)에서와 같은 기상신호 및 클러터 도플러 전력스펙트럼 모델로부터 실제 상황과 유사한 시간영역에서의  $I$ (inphase) 및  $Q$ (quadrature) 모의 데이터를 얻기 위해서는 우선 순간 도플러 전력에 대한 확률분포 즉, 확률밀도함수가 필요하다.

일반적으로 기상 레이다에 수신되는 반사파들은 비슷한 반사 유효면적을 갖는 많은 물체들에 의한 반사파들의 합으로 생각할 수 있다. 따라서  $I$  및  $Q$  데이터들은 central limit theorem 에 의해 가우시안 분포를 갖게 되며 그 크기(envelope)는 Rayleigh 분포를 가지게 됨을 알 수 있다. 따라서 순간전력  $P$  의 확률밀도는 식 (9)의 도플러 전력모델 값인  $D$  를 이용하여 지수함수 분포(exponential distribution) 로 표시될 수 있다.

$$p(P) = \frac{1}{D} \exp\left[-\frac{P}{D}\right] \quad (10)$$

모델링된 전력 스펙트럼으로부터 순간전력  $P$  를 얻기 위하여 0 과 1 사이에서 균일분포(uniform distribution) 를 갖는 랜덤변수  $U$  를 이용한다고 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$p(P)dP = p(U)dU \quad (11)$$

식 (11)의 양변을 적분하면 순간 도플러전력  $P$ 의 값을 균일분포를 갖는 랜덤변수  $U$  를 이용하여 얻을 수 있다.

$$P = -D \ln(U) \quad (12)$$

따라서 이러한  $N$  개의 순간 도플러전력  $P_i$ 로부터 시간 영역의  $I, Q$  데이터를 구하면 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$I(k) + jQ(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{P_i} \exp(j\theta_i) \exp(j \frac{2\pi}{N} ik) \quad (13)$$

식 (13)에서의  $P_i$ 는 기상신호, 클러터 및 배경잡음을 포함하는 순간전력을 나타내며  $\theta_i$ 는 0 에서  $2\pi$  사이의 값으로 균일분포를 나타내는 위상성분을 표시한다.

#### IV. 클러터 제거 성능분석

일반적인 기상 레이더 시스템의 사양을 고려하여 사용 주파수는 6 GHz 로 하였으며 펄스반복주파수는 2KHz 로 설정하였다. 배열 안테나를 이용하는 경우의 클러터 제거 정도를 분석하기 위하여 모의 반사파의 SCR(signal-to-clutter ratio) 은 지표면 클러터의 경우 -15 ~ -30 dB 사이의 값을 갖는 것을 가정하였으며 이동 클러터의 경우 -5 dB ~ -15 dB 범위의 값으로 하였다. 또한 SNR 값은 15 ~ 25 dB 사이로 설정하였으며 도플러 전력 스펙트럼 모델에서의 고정 및 이동 클러터, 기상신호의 스펙트럼 폭은 각각 4 ~ 12 Hz, 40 ~ 60 Hz 범위를 갖는 것으로 가정하였다. 기상신호는 그림 1에서 보는 것처럼 0

도 방향으로 수신되고 부엽에 의한 지표면 클러터 및 이동 클러터는 각각 22.5도 및 10도 방향으로 수신된다고 설정하였다. 그림 2에서는 SCR 이 각각 -15 dB 및 -5 dB 를 갖는 지표면 및 이동 클러터(평균초속 10m)가 존재하는 경우 이러한 클러터들을 제거하기 위한 배열 안테나가 중치 벡터들의 수렴 과정을 표시하고 있다. 그림 2에서의  $W_0, W_1, W_2, W_3$  는 각 안테나에서의 가중치들을 표시한다. 즉, 네 개의 배열 안테나 센서 가중치들의 실수부 및 허수부 값들의 변화를 보여주고 있다. 수신샘플 숫자에 따른 가중치들의 수렴특성으로 샘플수가 증가함에 따라 비교적 빠르게 최적 값에 접근하고 있음을 보여준다.

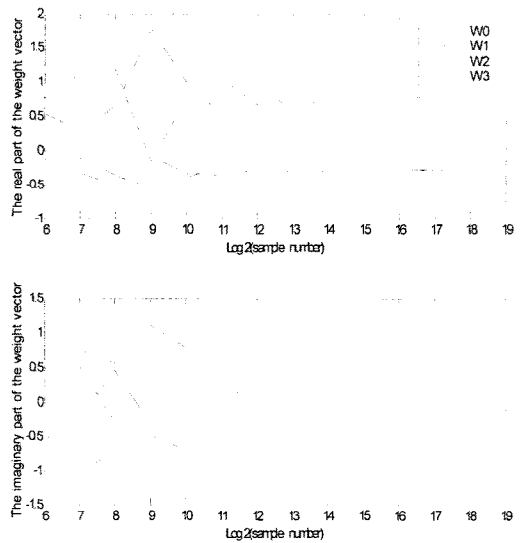


그림 2. 샘플 수에 따른 배열 안테나 센서 가중치 값의 변화

Fig. 2 Values of the weight vector in an array antenna according to the sample number

그림 3에서는 이러한 최적계수 벡터를 이용하여 형성된 배열 안테나에서의 수신 빔 패턴을 보여준다. 클러터 수신방향으로 두 개의 널(null)을 형성하여 공간상에서의 필터 기능으로 클러터들을 제거하고 있음을 볼 수 있다.

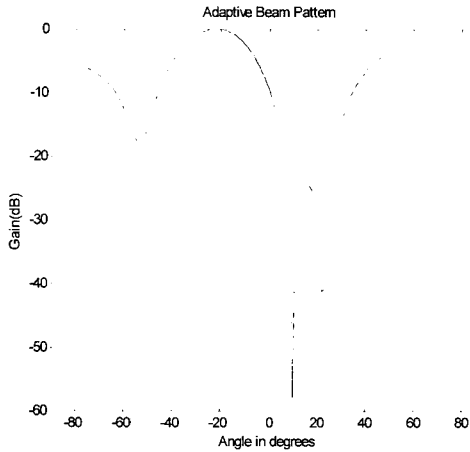


그림 3. 배열 안테나의 수신 빔 패턴  
Fig. 3 The receiving beam pattern of the array

이제 이러한 배열 안테나를 이용한 기상 레이더 시스템에서의 고정 및 이동 클러터 제거를 통한 기상 정보 추출에 관한 성능 향상정도를 살펴보고자 한다. 기상 현상을 탐지하고 악천후 예보 등을 적절히 수행하기 위해서는 풍속 및 대기의 교란정도(turbulence)에 관한 신뢰성 있는 정보를 추출할 수 있어야 한다. 따라서 대부분의 최신 기상 레이더에서는 도플러 주파수 및 도플러 폭 또는 분산 값을 추정하여 이러한 정보들을 제공하게 된다. 현재 기상 레이더에서 가장 많이 쓰이며 효율적인 것으로 알려진 기법으로 펄스페어 추정(pulse-pair estimation) 방법[6][7]이 있으며 본 논문에서의 성능비교에서도 자기 상관 함수 추정을 이용한 펄스페어 추정치 결과들을 비교하였다. 이러한 성능 비교를 위하여 우선 26개의 거리 방(range cell)에서 앞에서 기술한 바와 같은 범위 내의 파라미터 값들을 임의로 설정하여 기상 신호, 지표면 및 이동 클러터들을 포함하는 다양한 모의 반사파들을 발생시켰다. 그림 4에서는 26개의 거리 방에서 발생한 배경잡음을 포함한 기상신호 및 클러터들이 적응적으로 처리되는 경우의 추정 값과 참 값을 비교하고 있다. 또한 적응 배열 안테나를 활용하여 클러터를 제거하는 경우와 적응 처리과정을 거치지 않은 결과 값들(raw estimates)을 비교하여 보여주고 있다.

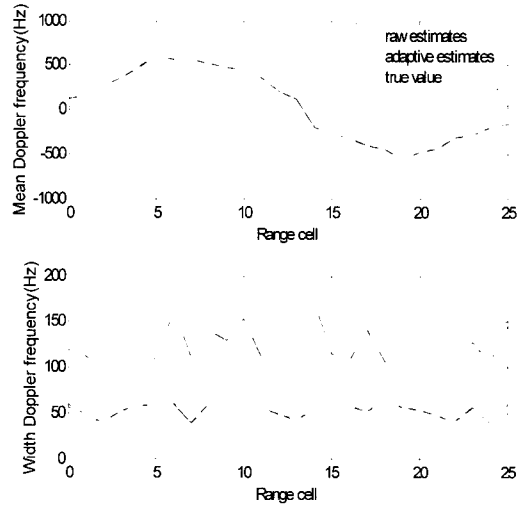


그림 4. 기상 레이더에서의 평균 도플러 주파수 및 도플러 폭 추정치 비교

Fig. 4 Comparison of mean and width Doppler frequency estimates in a weather radar

그림 4에서 보는 것처럼 적응 클러터 제거가 이루어진 경우 평균 도플러 주파수 추정치는 거의 참 값과 같게 나타나게 되며 그림에서 구별이 어려울 정도로 일치하는 값을 보인다. 또한 그림 4에서의 도플러 폭(Doppler width) 추정치의 경우도 참 값과 매우 유사한 정확한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 반면 이러한 적응적 클러터 제거가 이루어지지 않는 시스템에서의 평균 도플러 주파수 및 도플러 폭에 대한 펄스페어 추정치들은 실제 값과는 전혀 다른 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 강력한 이동 클러터 또는 지표면 클러터에 의한 반사파들을 적절히 제거할 수 없다면 펄스페어 방법을 이용한 기상정보 추출의 신뢰도가 심각하게 훼손될 수 있다는 것이다. 그림 4의 경우는 13번째 부근의 거리 방을 중심으로 바람의 방향 및 속도가 급변하고 있음을 보여주고 있으나 강력한 이동 및 고정 클러터들을 효과적으로 제거할 수 없는 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 기상정보 추출을 위한 펄스페어 추정치들은 전혀 의미 없는 값들을 나타내게 된다.

## V. 결론

본 연구에서는 간단한 위상배열 안테나를 활용한 기상 레이더 시스템에서의 적응 클러터 제거를 통한 성능 향상 정도에 관하여 고찰하였다. 결과들에서 보는 것처럼 간단한 위상배열 안테나의 적용으로 환경에 따라 적응적으로 클러터를 제거함으로써 시스템의 성능이 획기적으로 개선 될 수 있음을 보였다. 물론 이러한 적응 제거방식은 클러터 환경에 따라 적응적으로 최적 계수 벡터를 구해야만 하기 때문에 간단한 배열 안테나 구조라 할지라도 다소 계산양이 많아지는 부담을 안게 된다. 그러나 지상 및 항공기 등에서 운용되는 기상 레이더는 대부분 강력한 지표면 및 이동 클러터들에 의한 영향을 받을 가능성이 매우 크기 때문에 이러한 클러터들의 완벽 제거는 미약한 기상신호를 분석하는데 매우 중요하다. 특히 비구름을 동반하지 않는 맑은 날씨에서의 매우 미약한 기상신호 분석에는 해수면 또는 지표면 반사파, 이동 클러터 등의 일부라도 영향을 줄 경우 시스템의 성능은 급격히 저하될 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제안한 바와 같은 간단한 위상배열 안테나를 활용한다면 기상 레이더 시스템의 성능 및 신뢰도 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] J. W. Wilson, et al., "Microburst structure and evaluation of Doppler radar for airport windshear detection", J. Climate and Appl. Meteorol., vol. 23, pp. 898-915, 1984.
- [2] S. D. Campbell, et al., "Microburst recognition performance of TDWR operational testbed", 3rd Internat. Conf. Aviation Weather System, 1989.
- [3] W. H. Heiss, et al., "Nexrad: Next Generation Weather Radar (WSR-88D)", Microwave Journal, pp. 79-98, 1990.
- [4] O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing", Proc. of the IEEE, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, 1972.
- [5] L. H. Janssen and Van der Spek, "The shape of Doppler spectra from precipitation", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 21, pp. 208-219, 1985.
- [6] D. S. Zrnica, "Estimation of spectral moments for weather echoes", IEEE Trans. Geosci. Electron. vol. 17, pp. 113-128, 1979
- [7] T. Berger and H. L. Groginsky, "Estimation of the spectral moments of pulse trains", Int. Conf. on Information Theory, 1973
- [8] R. J. Doviak and D. S. Zrnica, *Doppler radar and weather observations*, 2nd edition, Academic Press Inc., 1993.

## 저자소개

이 종 길 (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

※ 관심 분야: 무선통신, 레이더신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석