DBpia

論文 98-23-8-13

적응배열 안테나를 이용한 기상레이다 성능분석에 관한 연구

正會員 李 鍾 吉*

A Study on the Performance Analysis of a Weather Radar Using an Adaptive Array Antenna

Jong Gil Lee* *Regular Member*

※본 논문은 한국과학재단(과제번호 : 961-0921-109-2)의 핵심전문 연구비 지원에 의한 결과임.

요 약

기상레이다로부터 정확한 정보를 추출하기 위해서는 강력한 지표면 및 이동 클러터의 제거가 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 기상레이다의 단점을 극복하기 위하여 적응배열 안테나의 적용을 제안하였다. 우선 모의 클러터 및 기상신호를 효율적으로 발생시키는 방법을 제시하였으며 이러한 데이터를 이용하여 제안된 기상레이다의 성능정도를 분석하였다. 이러한 모의실험을 통해 기상정보 추출을 위한 펄스페어 추정치의 정확도가 비약적으로 향상될수 있음을 보였다.

ABSTRACT

It is very essential to remove a strong ground clutter and moving clutter for an extraction of accurate information from a Doppler weather radar. Therefore, this paper proposed the use of an adaptive array antenna to overcome the shortages of a conventional weather radar. In the first, a simulation method was suggested for the generation of clutter and weather signals. Using these data, the performance of a weather radar was analyzed under various conditions. It is shown that the quality of pulse-pair estimates was greatly improved from the simulation results.

I. 서 론

기상레이다에서는 대기중의 먼지 또는 비구름등의 물방울이나 얼음입자로부터 반사되는 전파신호를 수신하여 수신강도 및 평균 도플러 주파수, 도플러 분산 등을 추정한다. 이렇게 추정된 자료로부터 기상과 관련된 직접적인 변수인 예상강우량, 풍속, 교란정도(turbulence)등의 정보를 추출하게 된다. 이러한 기상정보는 집중호우 또는 악천후 감시를 위한 중요한 변수들로서 신뢰도가 매우 우수하여야만 정확한 기상예보가 가능하다[1, 2].

그러나 대부분의 기상레이다에서는 동작환경에 따른 강력한 클러터가 존재하게 되며 이러한 클러터의 효

* 인천대학교 정보통신공학과
論文番號 : 98083-0226
接受日字 : 1998年 2月 26日

www.dbpia.co.kr

율적인 제거여부에 따라 기상레이다의 성능이 심각한 영향을 받게 된다. 실제로 이러한 클러터는 대부분 지표면 반사에 의해 발생하며 따라서 대부분의 기상레이다에서는 저주파영역 차단필터를 사용하여 제거하여 왔다. 그러나 이러한 제거방식은 몇가지 문제점을 가지고 있다. 즉, 안테나의 회전속도가 빠를 경우 클러터가 변조되어 고주파 영역에 일부 나타날 수 있다. 또한 공항등에 설치된 단거리 터미널 레이다의 경우에는 주변의 고속도로등을 지나는 차량으로부터 반사되는 이동 클러터가 발생하게 되며 이의 제거가 거의 불가능하다. 그리고 우리나라와 같은 산악지형인 경우 레이다 운용시 지표면 반사에 의한 클러터가 매우 강력하여 저주파 차단필터로 제거한 후에도 상당부분의 클러터가 잔류하게 된다.

이러한 잔류 클러터 때문에 레이다로부터 가까운 영역에서 추출된 기상정보는 상대적으로 지표면 클러터 정도가 심한 상태이므로 매우 부정확한 것으로 판단하여 활용하지 못하고 있는 실정이다. 더구나 비구름을 동반하지 않는 건조한 상황에서의 기상정보 추출은 기상신호 자체가 매우 미약하므로 상대적으로 강력한 잔류 클러터가 기상신호를 일부라도 오염시킬 경우 기상레이다의 성능은 현저히 떨어지게 된다.

대부분의 기상레이다는 가시영역 확보및 지표면, 산등에 의한 반사파를 줄이기 위해 비교적 높은 위치에 설치하여 안테나의 고도각을 적절히 유지한다. 따라서 이러한 지표면 및 이동 클러터들은 대부분 안테나 부엽에 의해 발생하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 안테나 부엽 반사파 상쇄를 위한 비교적 간단한 적응배열 안테나를 제안하고 이를 이용하여 클러터들을 제거하였을 경우의 성능개선 정도를 분석하고자 한다. 이를 위해 먼저 적절한 모의 기상신호를 발생시켰다. 그리고 이러한 신호를 제안된 안테나 구조에 적용, 처리하기 위하여 수렴성이 좋으며 어레이 센서수가 작을 경우 계산속도도 상대적으로 우수한 SMI (Sample Matrix Inversion) 방법을 이용하였다[3].

II. 기상레이다용 적응배열 안테나

기상레이다에서는 일반적으로 반사 안테나(reflector)를 사용하고 있다. 이러한 안테나의 설계시에는 부엽의 크기를 최소화 하는 것이 매우 중요하며 최근에 설계된 차세대용 기상레이다는 그 특성이 상당히 우수한 것으로 평가되고 있다[4]. 그러나 우리나라와 같은 산악지형에서는 산등에 의한 지표면 클러터가 매우 강하므로 적응배열 안테나를 사용하는 것이 더욱 바람직하다고 할 수 있다. 그러나 센서수가 많은 복잡한 배열 안테나를 이용할 경우 제작비용이 너무 많이 든다는 단점이 있을뿐만 아니라 계산양도 엄청나게 증가하므로 실효성이 없다. 따라서 본 논문에서는 슬롯 안테나(slotted array antenna)를 수직방향으로 일정한 간격으로 최대 4개 정도를 배열시켜 안테나를 구성하며 전방향 탐지를 위해서 1분에 3-4회정도 360도 회전시키는 형태를 제안 하고자 한다.

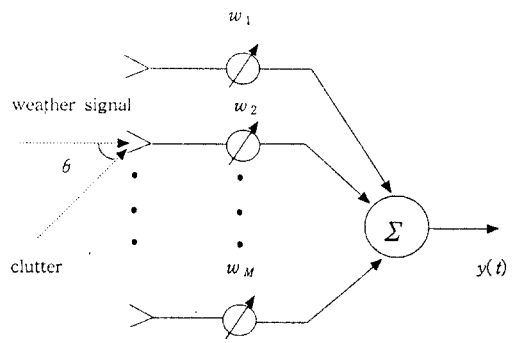


그림 1. 클러터 제거를 위한 적응배열 안테나 구성도
Fig. 1 Adaptive array antenna for clutter cancellation

제안된 안테나의 성능분석을 하기 위하여 우선 지표면 또는 산등에 의해 반사되는 클러터 및 기상신호의 반사경로를 생각하여 보자. 그림 1로부터 알 수 있는 것처럼 입사각 θ가 0인 주엽에 의해 반사되는 기상신호이외에 부엽에 의해 반사되는 클러터들은 입사각 θ에 따라 서로 다른 거리방 (range cell)에 영향을 주게 된다. 이러한 클러터들은 그림 1에서 보듯이 기상신호와 달리 반사파 수신시 각각의 센서별로 시간지연 효과가 일어나게 된다.

따라서 이러한 현상을 이용하여 각각의 센서별 가중치 값을 수신상태에 따라 적절히 적응시킴으로서 기상신호에 악영향을 주는 부엽에 의한 클러터들을 제거할수 있다. 그런데 이러한 신호 및 클러터의 대역폭이 너무 크면 각각의 주파수 신호에 따른 센서별 위상지연이 서로 달라지게 되며 이러한 상황에서 본 논문에서 제안한 바와 같이 센서수가 작을 경우 안테

www.dbpia.co.kr

나의 성능이 매우 열악해지리라는 것을 예상할수 있다. 그러나 기상레이다에서 사용하는 송신 주파수는 주로 3-6 GHz 대역이며 민수용 레이다이므로 고의적인 간섭신호의 회피를 위한 무작위 송신 주파수 변경(random frequency hopping)등의 기법은 채택하지 않는다. 그리고 도플러 신호획득을 위한 펄스반복 주파수 PRF(Pulse Repitition Frequency)는 대부분 2-3 KHz를 초과하지 않을뿐 아니라 실제 수신되는 클러터 및 기상신호들은 도플러 대역폭의 일부분에서만 관측된다. 따라서 그 영향은 매우 미미할 것이므로 무시할수 있다. 즉, 센서간 간격 d를 $a\lambda$로 표시하면 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \ll 1$ 이므로 인접한 센서간 위상지연은 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\begin{aligned}\Phi_d &= \omega_c \frac{d}{v_c} \sin\theta = \frac{\lambda}{\lambda_c}\ 2a\pi\sin\theta \\ &= \frac{\lambda}{\lambda \pm \Delta\lambda}\ 2a\pi\sin\theta \simeq 2a\pi\sin\theta\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 ω_c, λ_c는 각각 수신되는 각주파수 및 파장을 표시한다. 그리고 a는 양의 실수를 표시하며 센서간 간격을 파장 λ의 배수로 표시하기 위한 변수이다. 그러면 이러한 어레이 안테나에서 수신하는 신호를 $\underline{X}$라는 벡터로 표시하여 보자.

$$\underline{X} = [x_1, x_2, \cdots x_M]^T \tag{2}$$

여기서 윗 첨자 T는 transpose를 의미하며 M은 배열 안테나의 센서수를 표시한다. 수신벡터 $\underline{X}$는 클러터 벡터 $\underline{C}$ 및 기상신호 벡터 $\underline{S}$, 배경잡음 벡터 $\underline{N}$의 합으로 표시할수 있다. 즉,

$$\underline{X} = \underline{S} + \underline{C} + \underline{N} \tag{3}$$

여기서 기상신호 벡터 $\underline{S}$는 그림 1을 참조하면 지향방향으로부터 입사되는 신호를 뜻한다. 따라서 θ는 항상 0 도가 되므로 다음과 같이 표시할수 있다.

$$s_m = s_m(k)\ ;\ k = 1, 2, \cdots, N,\ \ m = 1, 2, \cdots, M \tag{4}$$

여기서 N은 수신되는 신호의 샘플수를 뜻한다. 부엽에 의한 클러터들은 그림 1을 참조하면 입사하는 방향 θ에 따라 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}&c_m = c_m(k)\exp(-jm\pi\sin\theta) \\ &k = 1, 2, \cdots N;\ \ m = 1, 2, \cdots M\end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $s_m(k)$ 및 $c_m(k)$는 각 센서에 의해 수신되는 기상신호 및 클러터 샘플을 의미하며 다음 장에서 이러한 모의샘플들의 발생방법에 대하여 간략히 언급하였다. 입력벡터 $\underline{X}$를 기상신호와 클러터 및 잡음이 존재하는 경우(H_1)와 클러터 및 잡음만 존재하는 경우(H_0)로 나누어 생각할수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}H_0 &: \underline{X} = \underline{D} \\ H_1 &: \underline{X} = \underline{S} + \underline{D}\end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $\underline{D} = \underline{C} + \underline{N}$을 의미한다. 기상신호를 정확히 검출하기 위해서는 클러터와 잡음의 영향이 최소가 되도록 하여야 하며 이러한 목적을 위해서는 출력의 신호대 클러터 및 잡음을 더한 비인 SCNR (Signal-to-Clutter plus Noise Ratio)을 최대로 하는 방법을 적용하여야 한다. 배열 안테나의 센서별 계수벡터를 다음과 같이 표시하여 보자.

$$\underline{W} = [w_1, w_2, \cdots w_M]^T \tag{7}$$

따라서 수신기의 출력은 그림 1을 참조하면 다음과 같이 표시된다.

$$y(k) = \underline{W}^H \underline{X}\ ;\ k = 1, 2, \cdots N \tag{8}$$

여기서 윗첨자 H는 complex conjugate transpose를 뜻한다.

기상신호와 disturbance $\underline{D}$와는 상관관계가 없다고 가정하고 출력 SCNR을 계수벡터 $\underline{W}$에 대하여 최대화하면 이를 만족하는 계수벡터는 잘 알려진 바대로 다음과 같이 나타낼수 있다[5].

$$\underline{W} = \mu M_D^{-1} \underline{S} \tag{9}$$

www.dbpia.co.kr

여기서 μ는 0이 아닌 복소상수를 말하며 M_D는 다음과 같이 표시되는 disturbance의 공분산(covariance) 행렬이다. 즉,

$$M_D = E[\underline{D}\,\underline{D}^H] \tag{10}$$

이러한 최적계수 벡터는 다음과 같이 선형 제한조건을 갖는 최소분산 알고리즘을 통해서도 구현이 가능하다[6, 10]. 즉,

$$\underset{w}{Minimize}\ \underline{W}^H M_x \underline{W};\ \underline{S}^H W = 1 \tag{11}$$

이 알고리즘은 기상신호에 대한 단위이득을 유지하는 제한 조건을 가지면서 출력분산을 최소로 하는 계수 벡터를 구하는 방법이다. 식 (11)에서 M_x는 입력벡터 $\underline{X}$의 공분산 행렬을 나타낸다. 제한조건을 가지고 있으므로 Lagrangian Multiplier 방법을 이용하여 계수벡터를 구하면 다음과 같이 표시된다.

$$\underline{W} = \frac{M_x^{-1}\underline{S}}{\underline{S}^H M_x^{-1}\underline{S}} \tag{12}$$

여기서 계수벡터를 구하기 위해서는 입력벡터의 공분산 행렬인 M_x를 구하여야 한다. 그러나 실제로 정확한 공분산 행렬을 구하기 어려우므로 다음과 같이 공분산 행렬을 추정하는 방법을 이용한다.

$$\hat{M}_x = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \underline{X}(k)\,\underline{X}(k)^H \tag{13}$$

이렇게 추정된 공분산 행렬로부터 역행렬을 구하여 계수벡터를 구할수 있다. 여기서 N은 샘플수를 뜻하는데 샘플값이 많을수록 공분산 행렬의 추정이 정확하므로 따라서 계수벡터도 최적치에 근접할 것이다. 이러한 공분산 행렬의 추정치는 기상레이다의 운용환경이나 주변여건에 적응하기 위해서는 주기적으로 새로운 추정값을 반복 계산하여야 한다.

III. 모의 클러터 및 기상신호 발생

이러한 적응배열 안테나를 이용한 기상레이다의 성능분석을 위해서는 우선 클러터 및 기상관련 모의신호 발생이 필요하다. 따라서 먼저 실제 기상신호 및 클러터등의 특성을 파악하여야 한다. 현재 운용되고 있거나 시험중인 기상레이다로 관측한 자료들을 분석하여보면 기상신호의 도플러 전력 스펙트럼은 중심주파수를 기준으로 대칭이며 가우시안 형태를 보이고 있다[7]. 또한 지표면등에 의한 클러터 스펙트럼도 안테나 회전에 의한 변조효과, 바람에 의한 지표면 클러터등의 도플러 변이등을 고려하면 분산상태에 따라 가우시안 형태로 모델링 할 수 있다[8]. 그러므로 이러한 전력 스펙트럼 모델로부터 기상레이다에 실제로 수신되는 I(Inphase) 및 Q(Quadrature) 데이터를 구하여 보면 다음과 같이 표시할수 있다.

$$I(k) + jQ(k) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} P_i^{1/2}\exp(j\theta_i)\exp(-j\frac{2\pi}{N}ik) \tag{14}$$

여기서 P_i는 일반적으로 신호 및 클러터, 배경잡음등을 포함하는 순간전력(instantaneous power)을 의미하며 θ_i는 균일분포를 갖는 위상성분이다. 그러므로 신호 및 클러터를 앞에서 언급한 바와 같은 전력 스펙트럼 모델로부터 실제상황과 유사한 모의신호를 얻기위해서는 순간전력에 대한 확률밀도 함수가 필요하다. 먼저 수신되는 신호의 envelope Z를 고려하면 다음과 같이 표시된다.

$$Z = \sqrt{I(k)^2 + Q(k)^2} \tag{15}$$

기상레이다에서는 대부분의 경우 클러터 및 신호 성분들은 비슷한 반사 유효면적을 갖는 수많은 물체들에 의한 반사파들의 합으로 생각할수 있다. 그러므로 central limit theorem에 의해 Z는 Rayleigh 분포를 가지게 됨을 예측할수 있다. 따라서 순간전력의 확률분포는 다음과 같은 지수함수(exponential distribution)로 표시될수 있다.

$$p(P_i) = \frac{1}{PM_i}\exp[-P_i/PM_i] \tag{16}$$

www.dbpia.co.kr

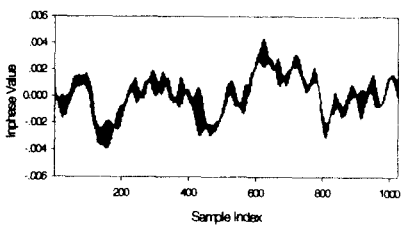
여기서 PM_i는 가우시안으로 모델링한 신호 및 클러터의 전력 스펙트럼 값을 의미한다. 따라서 모델링된 전력 스펙트럼으로부터 P_i를 얻기 위해 균일분포(uniform distribution) 랜덤변수 U_i를 이용한다면 다음과 같이 표시할수 있다. 즉,

$$p(P_i)\,dP_i = p(U_i)\,dU_i \tag{17}$$

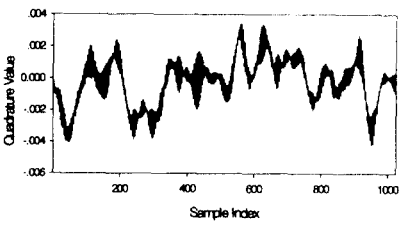
따라서 (17)식의 양측을 적분하면 다음과 같은 변환 식을 유도할수 있다.

$$P_i = -PM_i \ln U_i \tag{18}$$

이러한 방법을 이용하여 클러터, 기상신호및 배경잡음등이 포함된 대표적인 모의 I, Q 수신신호를 그림 2에 표시하였다. 그러면 이제 이와같이 모의 발생시킨 여러형태의 클러터 및 기상신호를 사용하여 제안한 적응배열 안테나를 이용하는 기상레이다의 성능을 분석하여 보자.



(a)



(b)

그림 2. 모의 발생시킨 I, Q 기상 레이다 수신신호
Fig. 2 I, Q components of a simulated weather radar signal

IV. 모의실험 및 결과

기상레이다에서 사용하는 펄스반복 주파수는 2kHz로 하였으며 앞에서 설명한 바와같이 기상신호의 수신방향 θ는 0 이다. 그리고 배열 안테나 센서 수는 4개이며 반파장 간격으로 위치하고 있다고 가정하였다. 안테나 부엽의 크기는 주엽으로부터 멀어질수록 급격히 감소하므로 레이다의 성능에 영향을 주는 부엽으로 인한 대부분의 클러터들은 수신방향이 0도에서 30도사이가 될 것이다. 이러한 클러터들은 안테나 주빔의 고도를 수평으로 유지한다고 가정하고 안테나 설치지역의 높이가 500m 정도라고 한다면 수신되는 지표면의 클러터들은 1-14km 정도의 거리영역에 심각한 영향을 줄 수 있다. 즉, 레이다로부터 인접한 거리영역의 기상정보는 매우 부정확하다고 할 수 있다. 모의실험을 하기 위하여 우선 일반적으로 상황에 따른 기상신호대 클러터의 전력비 및 신호대 잡음비를 다음과 같은 전형적인 값들을 사용하였다.

신호대 클러터비 (SCR):
비구름을 동반한 기상조건 (wet weather situation) :
$0 \sim -10dB$
비구름등이 없는 기상조건 (dry weather situation) :
$-10 \sim -50dB$

신호대 배경잡음비(SNR)는 $30 \sim 40dB$ 정도로 하였으며 기상신호 및 클러터의 분산정도에 따른 스펙트럼 폭은 기상 레이다의 일반적인 실측자료를 근거로 하여 각각 $5 \sim 25\,Hz$, $20 \sim 70\,Hz$ 정도로 가정하였다. 그림 3은 SCR 및 SNR 이 각각 −10dB 및 30dB인

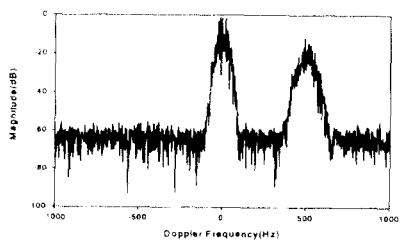


그림 3. 모의 도플러 기상신호의 전력 스펙트럼
(SCR = −10dB, SNR = 30dB)
Fig. 3 A simulated Doppler weather spectrum
(SCR = −10dB, SNR = 30dB)

www.dbpia.co.kr

레이다모의 도플러 스펙트럼을 보여준다.

특정한 거리방에 영향을 미치는 이러한 부엽에 의한 반사 클러터 수신방향 θ를 10도라고 가정하여 적응 계수벡터를 구하였다. 그리고 적응 알고리즘으로는 SMI 방법을 사용하여 다음과 같이 표시되는 출력 SCNR을 구하였다.

$$SCNR_{out} = \frac{W^H S S^H W}{W^H M_D W} \tag{19}$$

그림 4에서는 (19)식의 계산결과를 이용하여 성능향상 정도를 나타내는 출력 SCNR과 입력 SCNR의 비로 표시한 IF(Improvement Factor)값을 표시하였다. 샘플수가 증가함에 따라 최대값 40dB에 접근하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 이러한 경우의 적응 계수벡터에 의한 빔 패턴을 표시한다. 그림 5에서 보면 10도 방향에 82dB 정도의 널(null)이 형성되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 클러터들의 수신방향이 기상신호의 수신방향인 0도 부근으로 접근하는 상황 즉, 레이다 설치지역으로부터 비교적 멀리 떨어진 지표면 반사 클러터의 경우에는 완전한 제거가 어려우리라고 예견할수 있다. 그림 6은 이와같은 클러터의 수신방향에 따른 IF 값을 나타내었다. 0 도에 인접한 경우 IF값이 상당히 낮아짐을 알 수 있다.

다음으로 25개의 거리방에 클러터 및 배경잡음이 포함된 다양한 모의신호를 발생시켰다. 이러한 모의신호로부터 평균 도플러주파수와 스펙트럼 폭을 추정

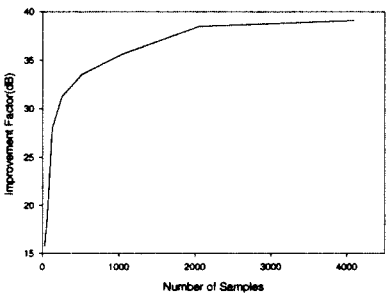


그림 4. 샘플수를 2N으로 하여 구한 IF 값의 수렴곡선 ($N=5\sim13$)

Fig. 4 IF convergence curve for 2N samples($N=5\sim13$)

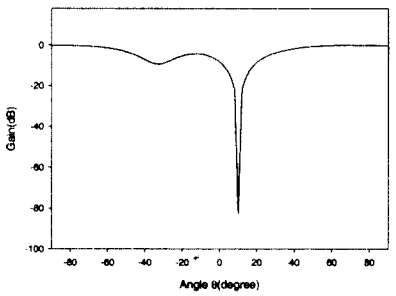


그림 5. 적응계수 벡터에 의한 수신방향 θ에 따른 빔 패턴

Fig. 5 Beam pattern for the received angle θ by an adaptive weight vector

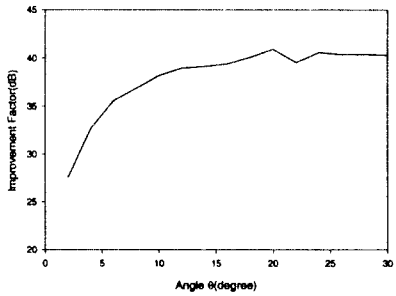


그림 6. 클러터의 수신방향 θ에 따른 IF 값의 변화곡선

Fig. 6 Variation of IF values according to the received clutter angle θ

하기 위한 펄스페어 추정치를 구하였다. 그림 7과 그림 8에서는 적응 계수벡터를 이용하여 클러터를 제거한 뒤의 펄스페어 추정치와 제거전의 추정치 그리고 실제 값을 비교하여 표시하였다. 그림 7에서 보여주는 바와 같이 평균 도플러 주파수 추정에 있어서는 적응 배열안테나 적용시 거의 실제값과 일치할 정도로 정확한 추정 값을 보여줌을 알 수 있다. 그림 8의 주파수 폭 추정의 경우는 약간의 오차를 보이는데 이는 펄스페어 추정방식의 고유오차가 많음으로 인해 발생한다[9]. 그러나 적용하지 않은 경우에 비해 상대적으로 정확도가 매우 향상 되었음을 알 수 있다.

www.dbpia.co.kr

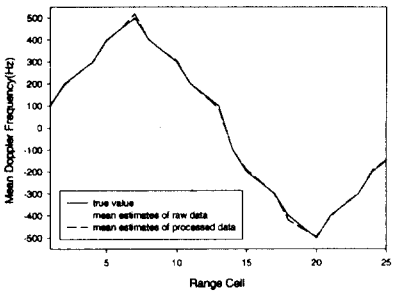


그림 7. 평균 도플러 주파수 추정치 비교
Fig. 7 Comparison of mean Doppler frequency estimates

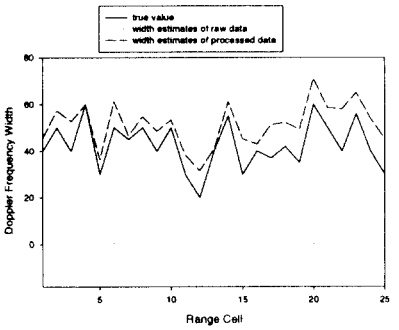


그림 8. 도플러 스펙트럼 폭 추정치 비교
Fig. 8 Comparison of width Doppler frequency estimates

V. 결 론

본 논문에서는 적응배열 안테나를 기상레이다에 사용하였을 경우의 특성 및 성능 향상정도에 관한 분석을 수행하였다. 기존의 기상레이다들은 대부분 반사형 안테나를 사용하고 있으나 이러한 시스템을 산악지형에서 운용할 경우 신뢰성 있는 기상정보의 추출을 기대하기 힘들었다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 적응배열 안테나의 적용을 제안하였으며 모의실험 결과에서 보는 것처럼 대부분의 클러터를 거의 완전하게 제거하고 있어 매우 우수한 성능을 보인다. 또한 이러한 방식의 장점은 종래의 고주파통과(high-pass) 필터를 통해서는 거의 불가능한 이동 클러터의 제거도 가능하다. 따라서 그림 7, 8의 모의실험 결과로부터 알수 있는 바와 같이 레이다 수신자료를 적응배열 안테나로 처리한 경우 풍속, turbulence 등의 기상정보 추출을 위한 펄스페어 추정치의 정확도가 비약적으로 향상됨을 확인할수 있다.

그러나 이러한 성능향상 정도는 수신샘플수가 많아질수록 뛰어나므로 비교적 많은 샘플수를 필요로 하고 있다. 그런데 기상레이다에서는 안테나의 회전수가 느리므로 필요한 데이터 획득에는 큰 문제가 없으나 계산량이 늘어난다는 단점이 있다. 따라서 고정된 위치에서 운용하는 레이다의 경우 적응계수 벡터를 매번 갱신하지 않고 주기적으로 수정하여 주는 방법을 채택할수 있다.

참 고 문 헌

1. R. J. Doviak, R. M. Rabin, and A. J. Koscielny, "Doppler weather radar for profiling and mapping winds in the prestorm environment", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 21, pp. 25-33, 1983.
2. L. J. Battan, Radar Observation of the Atmosphere, Univ. of Chicago Press, Chicago, Illinois, 1973.
3. L. L. Horowitz, H. Blatt, W. G. Brodsky, and K. D. Senne, "Controlling antenna arrays with the sample matrix inversion algorithm", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, AES-15, no. 6, 1979.
4. W. H. Heiss, D. L. McGrew, and Dale Sirmans, "Nexrad:Next Generation Weather Radar (WSR-88D)", Microwave Journal, pp. 79-98, 1990.
5. I. Reed, J. Mallett and L. E. Brennan, "Rapid Convergence in Adaptive Arrays", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, AES-10, no. 6, 1974.
6. O. L. Frost III, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing", Proceedings of the IEEE, 60, no. 8, 1972.
7. L. H. Janssen and G. A. Van der Spek, "The shape of Doppler spectra from precipitation," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-21, 1985.
8. D. Bernella, "Terminal Doppler weather radar operational test and evaluation", Lincoln Laboratory

www.dbpia.co.kr

Report DOT/FAA/NR-91/2, 1990.

9. J. G. Lee, "Robust estimation of mean Doppler frequency for the measurement of average wind velocity in a weather radar", Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, Adelaide, Australia, 1994.
10. B. J. Kwak, K. M. Kim, I. W. Cha and D. H. Youn, "The Output SINR of the lineraly constrained beamformer", IEEE Trans. Antennas and Propagation, AP-41, no. 10, 1993.
11. M. I. Skolnik, Radar Handbook, 2nd edition, McGraw-Hill, 1990.

李 鍾 吉(Jong Gil Lee) 정회원

1982년 : 연세대학교 전자공학과(공학사)

1985년 : 미국 Case Western Reserve University, Electrical Eng. (M.S.)

1990년 : 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년～1993년 : 삼성전자 특수연구소

1993년～현재 : 인천대학교 정보통신공학과 부교수

※주관심분야 : 무선통신, 레이다신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석

www.dbpia.co.kr