

수직 위상 배열 안테나 기반 기상 레이더에서의 해수면 클러터 제거 성능 분석

이종길*

Analysis of Sea Clutter Removal Capability in a Weather Radar Based on a Vertical Phased Array Antenna

Jonggil Lee*

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

요 약

국지적인 기상 이변이나 강우 현상 등을 분석하고 예보하기 위해서는 지역별로 저고도 탐색이 가능한 다수의 단거리 기상 레이더들이 필요하다. 그러나 이러한 레이더들의 특성인 낮은 고각의 전자파 빔 때문에 지표면 및 해수면 클러터가 기상 반사 신호를 오염시킬 가능성이 매우 높다. 대부분의 지표면 클러터는 매우 낮은 도플러 주파수 부근에 집중되어 나타나므로 주파수 대역에서의 구분이 비교적 용이한 편이다. 그러나 해수면 클러터의 경우 도플러 주파수 점유대역이 기상조건에 따라 매우 넓게 나타날 수 있기 때문에 클러터의 제거가 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 전자적인 고각 빔 조향을 위하여 수직 위상 배열 안테나 구조를 갖는 기상 레이더에서의 해수면 클러터 제거 성능 정도를 분석하였다. 또한 위상배열 안테나의 수신 빔 형성을 통하여 해수면 클러터의 제거가 적절하게 이루어질 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

Many short range weather radars with the low elevation search capability are needed for analysis and prediction of unusual weather changes or rainfall phenomena which occurs regionally. However, due to the characteristics of low elevation electromagnetic wave beam, it is highly probable that the received weather signals of these radars are contaminated by the ground and sea clutter. Since most of ground clutter appears around the very narrow low Doppler frequency region, it is somewhat easy to separate. However, the sea clutter removal is very difficult since it can occupy the broad Doppler frequency region according to weather conditions. Therefore, in this paper, the sea clutter removal capability is analyzed for a phased array weather radar which use vertical array elements for electronic elevation beam steering. Also, it is shown that the sea clutter removal can be achieved appropriately using the receiver beam forming technology in a phased array antenna.

키워드 : 해수면 클러터, 위상 배열 기상 레이더, 빔 형성, 클러터 제거

Key word : Sea clutter, Phased array weather radar, Beam forming, Clutter removal

Received 19 August 2017, Revised 25 August 2017, Accepted 30 August 2017

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

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

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2018.22.1.155>

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 레이더는 오랫동안 주로 비구름에 의한 반사 신호를 추정하여 기상 예보에 활용하여 왔다. 이러한 레이더 시스템은 증장거리용으로 넓은 지역에 걸친 전체적인 기상 현상을 파악하는데 큰 도움이 된다[1, 2]. 그러나 최근에는 국지적인 기상 이변에 의한 호우나 강풍 등이 빈번하게 발생하고 있으며 이러한 기상재해나 기상 이변을 기존의 기상 레이더로 탐지하는 것은 뚜렷한 한계가 있다. 따라서 지역적으로 설치 및 운영이 가능한 단거리 및 초단거리 기상 레이더 시스템이 절실히 필요한 실정이다. 이러한 단거리 시스템은 낮은 고도에서 형성되는 비구름 등에 의한 국지적인 기상 현상을 탐지할 수 있어야 하므로 송신 빔의 고각을 높게 유지할 수 없다. 따라서 낮은 송신 빔 고각에 의한 지표면 및 해수면 클러터가 수신 기상 신호를 심각하게 오염시킬 수 있다. 따라서 이러한 클러터의 제거가 적절하게 이루어지지 않으면 강우 예측을 위한 반사파 신호 전력이나 풍속 추정에 큰 오차가 발생하게 된다. 일반적으로 고정 클러터는 매우 좁고 낮은 도플러 주파수 영역을 점유하므로 고주파 통과 도플러 필터를 이용하여 기상 신호와의 분리가 용이한 편이다. 그러나 해수면 클러터는 기상 상황에 따라 상대적으로 넓고 높은 도플러 주파수 영역에서도 존재할 수 있기 때문에 기존 방법으로는 수신 반사파에서 클러터만을 제거하기가 매우 어렵다. 따라서 위상배열 안테나를 이용한 공간 필터 적용 방법을 분석하였다.

본 논문에서는 360도 전 방향 탐색을 위해서는 기계적인 회전에 의한 수평 빔 조향을 채택하고 고각 빔의 조향을 전자적으로 조정할 수 있는 안테나 시스템, 즉 수직 방향만 위상 배열 안테나를 적용하여 비교적 경제적으로 구현 가능한 시스템을 가정하였다[3]. 이러한 시스템에서의 해수면 클러터 제거 성능을 분석하기 위해서는 우선 기상 현상에 따른 다양한 해수면 클러터들의 모의 구현이 선행되어야 한다. 따라서 먼저 적절한 해수면 클러터 모델 및 모델 파라미터를 변경함으로써 다양한 클러터들을 얻을 수 있는 방법에 관하여 고찰하였다. 이러한 시간 영역의 해수면 클러터, I, Q 데이터들은 낮은 고각 빔의 부엽에 의하여 발생하게 되므로 기상신호의 수신방향과는 다르게 나타난다. 따라서 수신시 수직 위상 배열 안테나에서의 위상을 조정하여 수신 빔

패턴을 바꾸면 방향성 필터의 역할을 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 수신 빔 형성 기법으로 불리는 이러한 방법을 적용하였을 때 다양한 해수면 클러터에 대한 제거 성능이 어느 정도인지 분석하고자 한다. 또한 이러한 해수면 클러터의 제거를 통하여 오염된 기상신호로부터 클러터들을 적절하게 분리할 수 있는지를 검증하고 그 결과들을 비교하고 고찰하였다.

본 논문의 2장에서는 해수면 클러터를 모의하기 위한 적절한 모델 선정 및 모의 클러터 구현에 관한 내용을 기술하였으며 3장에서는 수직 위상 배열 안테나에서의 수신 빔 형성 기법 및 적용에 관하여 논하였다. 4장에서는 다양한 해수면 클러터의 제거 정도 및 이에 따른 위상 배열 안테나에서의 수신 단 출력 결과들을 비교하고 분석하였다. 마지막장에서는 고찰한 내용들을 전체적으로 요약하고 정리하여 결론을 도출하였다.

II. 해수면 클러터 특성 및 모의 구현

수면에서의 반사파는 브래그 산란(Bragg scattering)에 의하여 브래그 라인(Bragg line)이라 불리는 특징적인 도플러 주파수 천이, f_d 가 나타난다. 따라서 레이더 시신 방향 해수면 흐름의 속도인 v_c 를 중심으로 양쪽에 브래그 파의 위상 속도인 v_B 가 나타난다[4, 5]. 즉,

$$f_d = \frac{v_c \pm v_B}{\lambda_b} \quad \text{where } \lambda_b = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

식 (1)에서 λ_b 는 수면파의 파장을, λ 는 전자파의 파장을, θ 는 입사각을 각각 표시한다. 이와 같이 나타나는 해수면 클러터는 풍속 및 강우등 기상 여건에 따라 도플러 주파수 영역에서 좁게 나타나기도 하며 때로는 매우 그 폭이 넓어져 두 개의 브래그 라인이 거의 구분이 가지 않는 경우도 있다[6, 7]. 또한 두 개의 브래그 라인은 각각의 크기가 다르게도 나타날 수 있으므로 이러한 해수면 클러터들을 모의 구현하기 위하여 다음과 같은 모델을 적용하였다.

$$C(f) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\sqrt{2\pi}w_i} \exp\left(-\frac{(f-f_{mi})^2}{2w_i^2}\right) \quad (2)$$

가우시안 도플러 전력 스펙트럼을 나타내는 식 (2)에 서의 n 은 브래그 라인뿐만 아니라 해수면의 요동에 따 라 나타나는 매우 폭이 좁으면서도 높은 침투치를 갖는 스파이크(spike) 스펙트럼들을 추가적으로 포함시키기 위하여 설정한 값으로 일반적으로 3 또는 4의 값을 가 지며 스파이크가 없는 경우에는 $n=2$ 로 하여 모델링이 가능하다. 또한 식 (2)에서의 a_i , w_i 및 f_{mi} 는 각 전력 스펙트럼들의 크기, 폭(width) 및 평균 도플러 주파수를 나타낸다. 일반적으로 스파이크가 없는 경우, $n=2$ 로 있 는 경우는 $n=3$ 의 값으로 하여 해수면 클러터 전력 스펙 트럼, C 를 모의 구현할 수 있다. 이제 비, 구름 등에 의 하여 반사되는 즉, 기상 신호로 나타나는 도플러 전력 스펙트럼을 모의 구현하기 위하여 다음과 같은 가우시 안 스펙트럼 모델을 적용하였다.

$$S(f) = \frac{p}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(f - f_{ms})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

식(3)에서의 p 는 기상 신호의 전체 반사 전력 값을 σ 는 기상 도플러 스펙트럼의 폭(width)을 각각 표시한다. 따라서 기상 레이더 시스템에 수신되는 전체 도플러 스펙트럼 모델은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$D(f) = S(f) + C(f) + N \quad (4)$$

식(4)에서의 N 은 부가 성 백색 가우시안 잡음의 전 력밀도를 나타낸다. 이제 SCNR(signal to clutter plus noise ratio)에 따라 수신되는 반사전력을 실질적으로 나타내기 해서는 전파 채널에서의 랜덤 확률 특성을 고려하여야 하며 수신 채널, I, Q 에서 나타나는 크기 (amplitude) 값이 일반적으로 Rayleigh 분포를 가진다 고 가정할 수 있다. 따라서 수신 전력은 다음과 같이 지 수함수 분포로 나타날 수 있게 모의 발생 시킬 수 있다. 즉,

$$P_k = -\ln(x_k) \times D_k \quad (5)$$

식 (5)에서 x_k 는 0에서 1사이의 값을 가지며 균일 분 포(uniform distribution) 로 표시되는 랜덤변수 값들을 나타낸다. 또한 D_k 는 식 (4)로 표시되는 도플러 전력 모 델 값들을 표시하며 P_k 는 실질적으로 기상 레이더에 수 신되는 전력 값들을 모의 구현한 것이다. 식 (5)와 같이 표시되는 전력 스펙트럼으로부터 시간 영역의 데이터,

즉 수신단의 I, Q 채널 데이터 값들을 얻기 위해서는 다 음과 같은 역 푸리에 변환을 수행한다.

$$I(i) + jQ(i) = \sum_{k=1}^L (A_k + jB_k) \exp\left(\frac{j2\pi ki}{L}\right) \quad (6)$$

$$\text{where } A_k = P_k \cos(2\pi u_k), B_k = P_k \sin(2\pi u_k)$$

식 (6)에서의 u_k 는 0에서 1사이의 값을 갖는 균일 분 포로 표시되는 랜덤 변수를 의미한다. 모의 구현과정에서 전체 잡음 전력이 1 이 되도록 정규화 하였으며 따라 서 SCNR 값 은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$SCNR = \frac{\sum_{k=1}^L S_k}{\sum_{k=1}^L C_k + 1} \quad (7)$$

III. 해수면 클러터 제거용 수신 빔 형성

앞장에서 설명한 것처럼 해수면 클러터는 브래그 파 및 해류의 이동 속도, 또는 기상조건에 따라 도플러 주 파수의 차이가 일어나며 이러한 클러터를 저주파 도플 러 대역의 기상신호와 분리하는 것이 매우 어렵다. 따 라서 본 논문에서는 수직 위상배열 안테나를 이용한 수 신 빔 형성을 통한 공간 필터 적용 방법을 채택하였다.

본 논문에서는 수직방향으로 반 파장 간격으로 slotted waveguide 4개를 배열하는 비교적 간단한 구조 의 9GHz 대역 array antenna 를 가정하였다. 수직 배열 된 안테나 구조 및 수신 블록 도를 그림 1에 간략하게 표시 하였다. 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 저고도 기 상 신호는 0도 방향에서 수신되고 있는 상황을 표시한 다. 즉 저고도 기상현상의 탐지를 위하여 빔 조향 각을 낮춘 경우이다. 따라서 빔 부엽에 의한 해수면 클러터 가 강력하게 나타날 수 있으며 이와 같은 클러터의 수 신 각은 아래쪽으로 θ 도 기울어진 경사각을 가지며 수 신되는 경우를 그림 1에 나타내었다. 기상신호의 수신 은 안테나 지향 각에 따른, 즉 조향 벡터인 \mathbf{a} 에 의하여 결정된다. 가중치 벡터 \mathbf{w} 를 고려하지 않으면 일반적으로 수신 기상신호 및 해수면 클러터에 의한 안테나 수 신 벡터는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(\theta_1) s_1(t) + \sum_{m=2}^M \mathbf{a}(\theta_m) c_m(t) + \mathbf{n}(t) \quad (8)$$

where $\mathbf{a}(\theta) = g(\theta) [1 e^{-j\pi \sin \theta} \dots e^{-j\pi(L-1)\sin \theta}]^T$

식 (8)에서 $g(\theta)$ 는 배열 안테나에서의 각 방사 소자의 빔 패턴을 s 는 기상 신호, c 는 해수면 클러터를 각각 나타내며 L 은 수직 배열된 안테나의 숫자를 표시한다. 그러므로 가중치 벡터 \mathbf{w} 를 고려한 수신 단 출력은 다음과 표시된다.

$$y(t) = \sum_{l=0}^L w_l^* x_l(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (9)$$

식 (9)에서의 * 및 \mathbf{H} 는 각각 켈레 복소수 및 Hermitian을 나타낸다. 따라서 수신 전력을 샘플링 된 출력 값, $\mathbf{x}(k)$ 및 $y(k)$ 를 이용하여 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |y(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k) \mathbf{x}^H(k) \mathbf{w} = \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w} \quad (10)$$

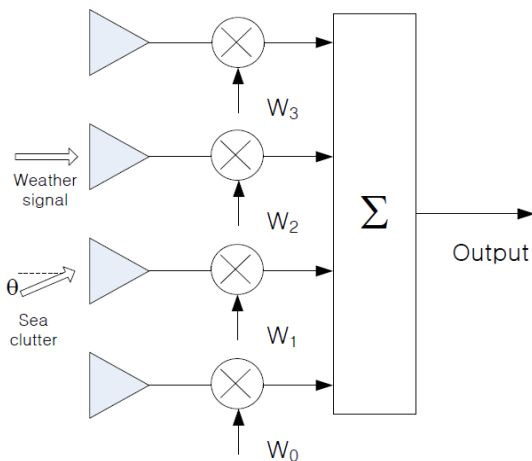


Fig. 1 A simplified block diagram of the phased array

그러므로 수신 빔 형성을 하는 기법의 차이는 이러한 가중치 벡터를 어떻게 결정하는지에 달려 있다. 본 논문에서는 해수면 클러터의 제거를 위하여 기상신호가 수신되는 고각 방향, 즉 특정한 방향의 수신 이득을 일

정하게 유지하면서도 전체 수신 전력을 최소화하는 방법을 적용하였다. 즉, 다음과 같이 표현되는 MVDR (minimum variance distortionless response) 빔 형성 방법이 가장 적절한 것으로 판단된다[8].

$$\text{Minimize } P(\mathbf{w}) \text{ subject to } \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_1) = 1 \quad (11)$$

식 (11)을 만족하는 가중치 벡터는 Lagrange multipliers 기법을 이용하여 찾을 수 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{w} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)}{\mathbf{a}^H(\theta_1) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1)} \quad (12)$$

식 (12)에서 구한 가중치 벡터를 식 (10)에 적용하면 다음과 같은 고각 방향에 따른 수신 전력, 즉 형성된 수신 빔 패턴을 얻을 수 있다.

$$P(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (13)$$

IV. 성능 분석 및 고찰

해수면 클러터는 기상 조건 및 해류의 속도 등에 따라 도플러 주파수 대역에서 기상 신호와 겹치거나 인접하게 되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 경우 일반적인 주파수 대역 필터로는 클러터의 억제가 매우 어렵다. 그러므로 앞장에서 언급한 수신 빔 형성 기법을 적용하여 어느 정도의 클러터 억제가 가능한지 분석하고자 한다. 기상신호는 0도 방향으로 해수면 클러터는 수평 아래쪽 15도로 수신되고 있으며 신호 대 잡음 전력 비는 10dB, 신호 대 해수면 클러터 전력비가 -5dB인 경우의 모의 수신 도플러 전력 스펙트럼을 그림 2에 표시하였다. 해수면 클러터는 브래그 파에 의하여 두 개의 거의 동일한 크기의 첨두치가 형성되고 있으며 해류 등에 의한 도플러 천이 현상으로 기상신호와 상당 부분 중첩되어 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그림 2에서와 같은 강력한 해수면 클러터의 억제 없는 기상 정보의 추출이 거의 불가능하다. 따라서 앞장에서 설명한 MVDR 빔 형성 기법을 적용하였다. 여기에서 식(8)에서의 개별 안테나 소자의 이득 빔 패턴, $g(\theta)=1$, 즉 지

향성이 없는 것으로 가정하였다. 식(11)로부터 가중치 벡터를 구하여 수신 전력 빔 패턴을 형성하면 그림 3과 같이 나타난다.

그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 0도 방향, 즉 기상신호의 수신방향 이득은 0 dB로 유지하면서도 아래쪽 15도 방향, 즉 강력한 해수면 클러터가 유입되는 방향의 수신이득을 -40dB 정도로 급격하게 감소시키고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 유입되는 해수면 클러터를 거의 완벽하게 제거할 수 있음을 의미한다. 앞에서와 같이 하여 얻어진 가중치 벡터를 적용하여 얻어진 출력에 대한 수신 도플러 전력 스펙트럼을 그림 4에 표시하였다. 그림 4로부터 알 수 있는 바와 같이 도플러 주파수 대역에서 중첩되어 나타났던 클러터가 거의 완벽하게 제거되었음을 확인할 수 있다. 특히 기상신호에 대한 추가적인 왜곡이나 손실 없이 해수면 클러터만 선택적으로 제거되고 있음을 그림 4의 결과로부터 알 수 있다. 따라서 수신 빔 형성 기법을 적용하면 이와 같은 강력한 해수면 클러터들을 거의 완벽하게 제거하고 원래의 수신 기상신호로 복원시킬 수 있음을 보여준다.

앞에서 설명한 바와 같이 해수면 클러터의 형태는 매우 다양하게 나타날 수 있는데 그림 5에서는 브래그 파에 의해 형성되는 두 개의 첨두치 값이 다르면서 다소 분산되어 뚜렷한 두 개의 첨두치 값을 확인하기가 쉽지 않은 경우를 나타낸다. 그림 5는 기상신호 대 해수면 클러터 전력의 비가 -10dB로 강우를 동반하지 않는 기상 탐지 조건 등에서 발생할 수 있으며 이때의 기상 수신 전력은 상대적으로 매우 낮게 나타난다. 그림 5의 모의 수신신호로부터 확인할 수 있는 것처럼 상대적으로 강력한 해수면 클러터가 도플러 주파수 영역에서 분산되어 기상신호를 심각하게 오염시키고 있음을 알 수 있다. 그림 5에서는 해수면 클러터는 아래쪽 22.5도 방향에서 수신되고 있으며 기상신호의 수신고도 방향은 0도로 하여 얻어진 모의구현 결과이다.

이제 가중치 벡터를 구한 후 수신 빔 형성 기법을 적용하여 해수면 클러터의 제거 정도를 살펴보았다. 그림 6은 얻어진 가중치 벡터에 의해 형성되는 수신 빔 패턴을 보여준다. 예상하였던 바와 같이 22.5도 부근에서 -30dB 이상의 감쇄가 일어나고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 신호 대 해수면 클러터의 비가 0dB로 클러터 전력과 신호전력이 거의 동일한 경우를 나타내었다. 그림 7에서의 신호의 수신고도 방향은 앞에서와 같이 0

도이며 해수면 클러터의 수신 방향은 아래쪽 30도로 가정하였다. 모의 구현된 수신 전력 스펙트럼에서 나타난 해수면 클러터는 음의 도플러 주파수를 가지면서 두 개의 브래그 파 분산이 매우 커서 두 개의 스펙트럼 형태가 합쳐져 첨두치가 하나로 나타나는 경우이며 기상신호의 중심 도플러 주파수도 음의 영역에서 나타나고 있다. 여기에서는 클러터 전력이 신호 전력보다 크지 않지만 해수면 클러터의 분산으로 기상신호와 클러터가 도플러 주파수 대역에서 중첩되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 해수면 클러터를 효율적으로 제거하기 위하여 앞에서와 같은 방법으로 가중치 벡터를 구하여 형성된 수신 빔 패턴을 그림 8에 표시하였다. 앞에서와 결과들과 마찬가지로 기상신호의 수신방향 빔 이득은 유지하면서도 해수면 클러터 수신 방향인 30도에서 -45dB 정도의 감쇄 패턴을 형성함으로써 해수면 클러터를 차단하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과들을 고찰하여 보면 해수면 클러터가 기상신호와 도플러 주파수 대역에서 중첩되어 나타나는 경우에도 배열 안테나에서의 수신 빔 형성을 통하여 효과적으로 클러터들을 차단할 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 이러한 가중치 벡터들을 적용한 수신 빔 형성에서 클러터들을 제거하기 위한 적절한 널(null) 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 기상신호가 낮은 도플러 주파수 대역에 존재하는 경우에는 배열 안테나를 이용한 가중치 벡터를 구함으로써 해수면 클러터를 제거하여야만 정확한 기상정보를 추출할 수 있을 것이다.

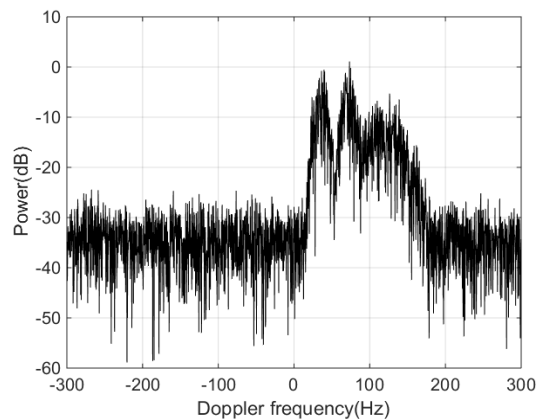


Fig. 2 The simulated weather spectrum including the strong sea surface clutter with the signal to clutter ratio of -5dB

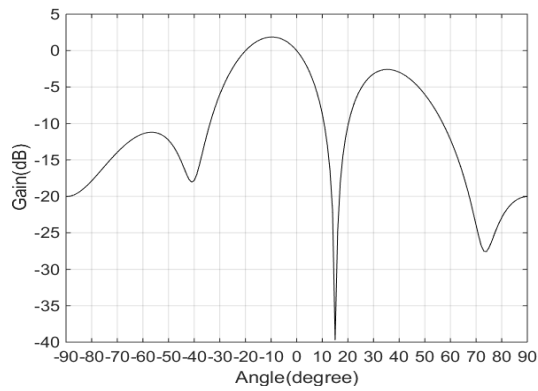


Fig. 3 The receiving array beam pattern with the 15 degree incident angle of the sea surface clutter and the 0 degree incident angle of the weather signal

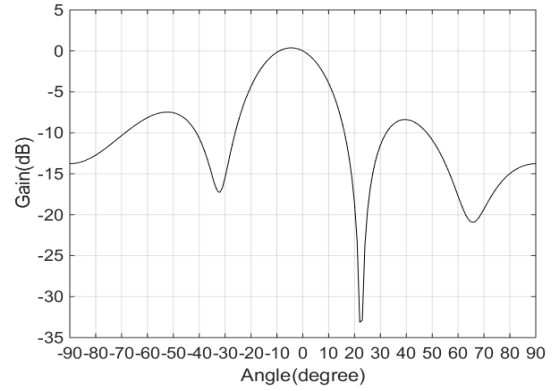


Fig. 6 The receiving array beam pattern with the 22.5 degree incident angle of the sea surface clutter and the 0 degree incident angle of the weather signal

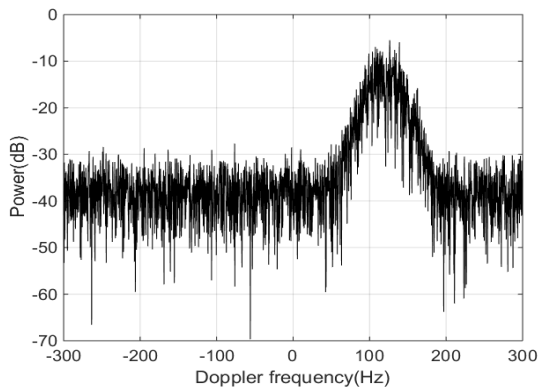


Fig. 4 The output power spectrum of the phased array using the weighting vector obtained for Fig. 2

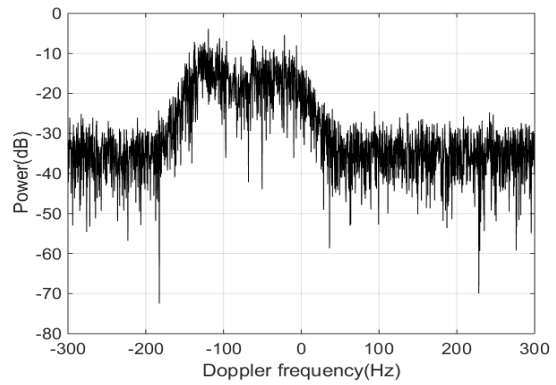


Fig. 7 The simulated weather spectrum including the spreaded sea surface clutter with the signal to clutter ratio of 0dB

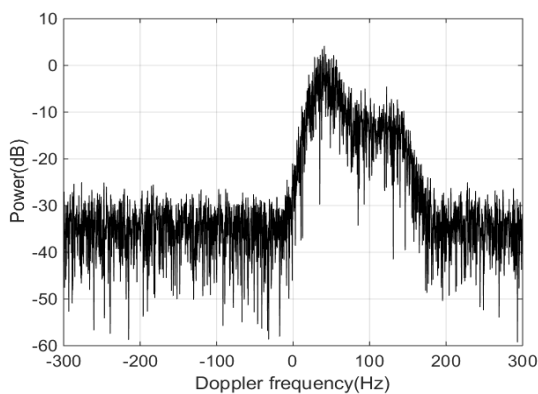


Fig. 5 The simulated weather spectrum including the spreaded strong sea surface clutter with the signal to clutter ratio of -10dB

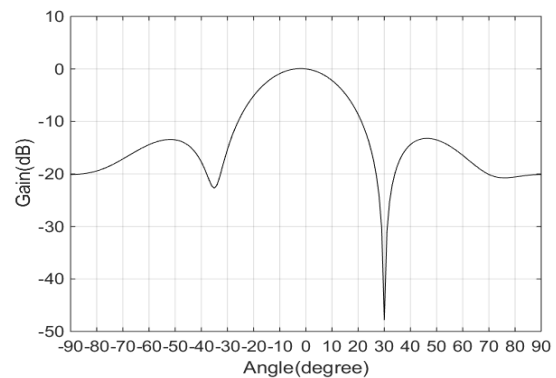


Fig. 8 The receiving array beam pattern with the 30 degree incident angle of the sea surface clutter and the 0 degree incident angle of the weather signal

V. 결론

본 논문에서는 기상 레이더에서의 기상 정보추출에 심각한 문제점을 야기할 수 있는 해수면 클러터의 효율적인 제거 방법에 관하여 고찰 하였다. 이러한 목적으로 해수면 클러터의 특성을 감안하여 다양한 경우의 해수면 클러터들을 모의 구현 하였으며 이러한 클러터가 수신 단 출력에서 도플러 주파수 영역에서 기상 신호와 중첩되어 나타나는 현상을 표시하였다. 앞장의 결과로부터 확인할 수 있는 것처럼 비교적 간단한 구조인 수직 배열된 4개의 안테나 소자를 이용하여 수신 빔 형성을 효과적으로 수행 할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 수신 빔 형성은 도플러 주파수 영역에서의 분리가 거의 불가능한 해수면 클러터들을 -30~ -45dB까지 감쇄시키는 공간 필터(spatial filter)의 역할을 함으로서 효과적으로 클러터를 제거하고 원하는 기상신호들만을 수신할 수 있게 해 준다. 이와 같은 공간 필터 적용에서 원하는 방향의 기상 신호들은 영향을 받지 않기 때문에 기상 정보 추출에서의 정확도를 유지할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

저고도 탐지가 필수적인 근거리 기상 레이더의 경우 강력한 해수면 클러터들이 정확한 기상 정보추출에 심각한 장애 요인이 될 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 본 논문에서 분석, 고찰한 바와 같이 배열 안테나 구조를 활용한 수신 빔 형성을 통한 공간 필터를 적용함으로써 이러한 강력한 클러터들을 기상신호로부터 분리, 제거함으로써 신뢰성 있는 기상 정보 추출이 이루어져야 할 것이다. 그러므로 본 논문에서 분석, 고찰한 기법들을 적절하게 활용한다면 기상 레이더에서의 성능 열화의 원인인 강력한 클러터들을 효율적으로 제거함으로써 추출된 기상 정보의 신뢰도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] R. J. Doviak, R. M. Rabin and A. J. Koscielny, "Doppler weather radar for profiling and mapping winds in the prestorm environment," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 21, no. 1, pp. 25-33, Jan. 1983.
- [2] M. Yearly et al., "A brief overview of weather radar technologies and instrumentation," *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, vol. 17, no. 5, pp. 10-15, Oct. 2014.
- [3] D. Cho et al., "The radar development of the low output using the phased array antenna," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 21, no. 5, pp. 913-920, May 2017.
- [4] M. Postacchini et al., "Lagrangian observations of waves and currents from the river drifter," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 94-104, Jan. 2016.
- [5] L. Rosenberg, "Characterization of high grazing angle X-band sea-clutter Doppler spectra," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 406-417, Jan. 2014.
- [6] Y. Wei, L. Guo and L. Juan, "Numerical simulation and analysis of the spiky sea clutter from the sea surface with breaking waves," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4983-4994, Nov. 2015.
- [7] H. Ding et al., "Modeling of heavy tailed sea clutter based on the generalized central limit theory," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 11, pp. 1591-1595, Nov. 2016.
- [8] L. L. Horowitz et al., "Controlling adaptive antenna arrays with the sample matrix inversion algorithm," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 840-848, June 1979.



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