

레이다 수신 신호 분석을 이용한 기상 클러터 환경 내 지상 레이다 탐지성능 개선

Improvement of Detection Performance of a Ground Radar in the Weather Clutter Using Radar-Received-Signal Analysis

오 현 석

Hyun-Seok Oh

요 약

강우 환경에서 레이다는 기상 클러터 반사 신호에 의해 신호처리기 내 잡음레벨 증가와 적응형 CFAR의 탐지 임계값 증가로 표적에 대한 탐지거리가 감소하게 된다. 또한, 강우 클러터에 의해 발생한 고속클러터는 기존의 클러터 제거기법의 제거범위를 벗어나 사라지지 않는다. 이로 인하여 강우시 레이다는 맑은 날에 비해 고속 클러터의 추적을 방지하기 위한 확인횟수가 증가되어 표적 탐지 기회가 감소된다. 이에 본 논문은 강우에 의한 레이다 탐지성능 저하를 해결하기 위해 레이다 수신 신호 저장장치를 이용하여 비정상 수신 신호를 획득하였다. 이들에 대한 분석을 바탕으로 신호처리기 앞단에서 최적감쇄값을 결정하고, 강우 시 감쇄적용결과 레이다 탐지성능이 개선됨을 모의시험 및 수신신호 분석을 통해 확인하였다.

Abstract

Radar detection range is decreased with an increase in the noise levels and detection thresholds in adaptive CFAR of a radar signal processor to the weather clutter reflection signal in the rain. When a high-velocity plot is generated in weather clutter, what are detected are not targets but false plots. Detection opportunity is reduced by radar time resource consumption from additional confirmations regarding the false plots. In this paper, the received signals are saved using a radar-received signal storage device. Based on the analysis of the received signals from weather clutter, the influence of the rainfall reflection has been mitigated by front-end attenuation of the signal processor. The improvement in the detection performance is verified through received signal and simulation results.

Key words: Weather Clutter Received Signal, Ground Radar, Detection Range, False Plot.

I. 서 론

클러터(Clutter)는 레이다 신호 중 표적신호를 제외하고 표적 탐지를 방해하는 모든 반사 신호^[1]를 의미한다. 이러한 반사 신호는 비, 눈과 같은 강우 환경에 의한 기상 클러터, 산, 건물과 같은 고정 위치의 지형클러터로 구분된다.

특히, 기상 클러터 중 강우 클러터는 공중에서 발생하여 채공 항공기의 표적 신호와 섞여 오인될 수 있고, 다양한 형태의 강우의 반사 신호가 잡음을 증가시켜 표적의 탐지 거리를 줄이거나 잡음에 의한 오폭률 제거과정이 늘어나 레이다 시간 자원 소모가 커지게 된다. 또한 강우는 클러터 주변의 바람 속도와 유사한 도플러 성분을 갖게 된다^[1]. 강

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 30, 2018 ; Revised December 20, 2018 ; Accepted December 21, 2018. (ID No. 20181130-122)

· Corresponding Author: Hyun-Seok Oh (e-mail: ohs1231@naver.com)

우 클러터도 이동속도가 거의 없을 경우, 0속도 기준에서 구현된 MTI 필터나 펄스 도플러 처리^[2]로 제거될 수 있다. 그러나 강우와 같은 이동형 클러터는 속도 성분이 단일하게 분포하지 않으며 클러터가 제거 속도 범위가 벗어난 경우 기존 클러터 제거 기법으로는 제거될 수 없으며 이로 발생한 잉여신호로 레이더 탐지성능이 열화하게 된다.

강우 클러터는 레이더로부터 근거리에서 부분적으로 분포할 수 있으며, 레이더 수신기 등이 포화시켜 신호처리 후 비정상 탐지^[3]가 발생하게 된다. 비정상 수신 신호는 레이더 내외부에 구형한 저장장치를 이용하여 저장 후처리를 하면 신호처리 결과에 대한 가시적 분석 및 검증이 가능하다. 이에 Roulette^[4] 연구팀은 탐색 레이더를 360도 회전 운용하고, 방위각에 대한 클러터에 대한 수신 신호를 장시간 중복 저장하고, 저장결과에 대하여 지형 클러터 제거 기능을 적용 후 기능이 지형환경에 맞추어 제거성능을 최적화하였다. 얻어진 신호처리 결과는 거리와 방위각으로 위치에서 클러터 신호를 가시적으로 도시하고 클러터 제거기술 적용 전후 결과를 공간의 위치에 대한 2차원으로 가시적 제시하였다. 이와 유사하게 최근에 지형 클러터 중 풍차 날개에 의한 도플러를 수신 신호에서 확인하고, 레이더 영향을 최소화 기법^[5]을 제시한 바 있다. 그러나 앞서의 연구결과들은 이동형 클러터인 강우 클러터에 대하여 수신신호를 획득한바 없으며 이들의 결과로 클러터 제거 기술로 적용한 사례는 없다.

본 논문에서는 강우 클러터 환경 내 운용 중인 레이더에서 기존 PT 파형 송신 후 클러터 반사 수신 신호를 실시간 저장장치로 저장하고 저장된 수신 신호에서 도플러 영역의 비정상 현상을 확인하였다. 수신신호분석을 이용하여 강우 시 하드웨어 변경없이 신호처리기 앞단 감쇄 적용으로 탐지거리 개선을 확인하고, 강우 시 획득한 수신 신호에 감쇄를 적용하여 결과를 입증하였다.

II. 강우 클러터에서의 레이더 성능

2.1 강우 클러터의 탐지거리 감소

강우 클러터는 강우 내 물방울에서 발생한 반사 신호의 크기와 비례하여 레이더 내 잡음이 증가하고, 대기 중 발생한 층별 바람에 의한 물방울의 이동으로 도플러 성

표 1. X-밴드에서 강우량에 따른 반사도^[1]

Table 1. Reflectivity^[8] of rain clutter un X-band.

Condition	Reflectivity(dBm ² /m ³)
Drizzle, 0.24 mm/hr	-88.7
Light rain, 1 mm/hr	-78.8
Moderate, 4 mm/hr	-69.2
Heavy rain, 16 mm/hr	-59.6

분을 갖게 된다. 이러한 도플러 성분들은 도플러 영역에서 가우시안 분산형태를 갖는다. 또한 도플러 영역에서 협대역 레이더 신호로 가정하면, 클러터 중심에서 떨어진 속도에서는 백색 형태^[6]로 가정할 수 있다.

동일한 RCS를 갖는 표적에 대한 반사 신호가 강우 조건에서 강우 클러터의 신호 크기와 비교하여 작으면 해당 조건에서 표적은 클러터에 의해 차폐^[1]된다. 표적 RCS가 변화하지 않는다면, 강우 조건에 따라 탐지가능 여부가 클러터 반사도에 의해 강우 세기 정의가 가능하고, 일반적인 청명한 날 기준신호 대 잡음비를 대하여 강우 시 발생한 클러터 크기를 이용하여 식 (1)과 같이 SN을 쓸 수 있다. 열잡음 $N = kT_0BF$ 기준 SN에서 얻어진 탐지거리(R_0)에 대하여 클러터 반사 신호에 대한 CN은 클러터 반사 신호가 없는 기준 SN에 대하여 손실값으로 정의하고, 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

따라서 청명한 날 탐지거리 R_0 는 강우 세기에 따라 탐지거리는 줄어들게 된다. 표 2는 강우 세기 조건에 대하여 열잡음과 비교하여 조건을 나누고, 이에 대한 SNR 손실과 거리 감소율을 정리하여 보았다.

$$\frac{S_{target}}{N_{clear} + C_{rain}} = \left(\frac{S_{target}}{N_{clear}} \right) \left(\frac{1}{1 + C_{rain}/N_{clear}} \right) \quad (1)$$

$$L_{clutter} = -10 \log(1 + C_{rain}/N_{clear}) \quad (2)$$

표 2에서 R_0 는 맑은 날 주어진 RCS로 결정된 탐지거리이며, 이는 레이더의 파라미터(송신출력 등)에 의해 결정된다. 본 논문에서 R_0 는 표적 RCS가 충분히 큰 경우(민항기 기준) 80 km 이상 만족한다. 강우 시 SNR은 표 2에서 보는 바와 같이 강우 클러터 신호조건에 따라 감소되고, 이로 인하여 탐지거리가 감소되고, 그 비율은 항상

표 2. 클러터 신호크기에 따른 탐지거리 감소^[2]

Table 2. Detection range reduction for clutter signal amplitude^[2].

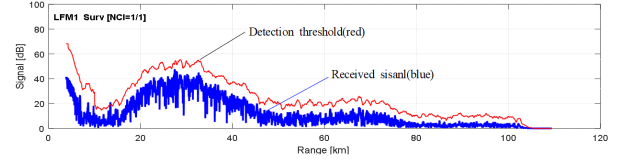
Condition	SNR loss (dB)	Relative range
$C_{rain} \ll N_{clutter}$	-0	R_0
$C_{rain} = N_{clutter}$	-3	$0.8R_0$
$C_{rain} = 2N_{clutter}$	-4.7	$0.75R_0$
$C_{rain} = 4N_{clutter}$	-6.9	$0.67R_0$
$C_{rain} = 8N_{clutter}$	-9.5	$0.57R_0$

1보다 작게 된다.

2-2 강우 클러터의 시간 및 도플러 영역 특성

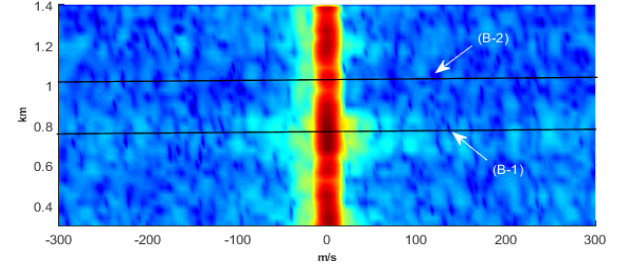
강우 시 잡음증가 효과는 시간영역과 도플러 영역의 레이다 수신 신호에서 그 영향을 확인할 수 있다. 레이다 수신 신호는 레이다가 공간에 실제 송신 후 안테나를 통해 표적이나 클러터에서 반사되어 돌아온 신호로 정의한다. 지상 레이다는 내 수신 신호 저장장치^[7]로 클러터에 대한 수신 신호를 획득한다. 레이다에서 빔 방사 후 클러터나 표적에서 반사된 RF 신호가 레이다의 배열안테나와 수신기를 거쳐 수신된 후 아날로그 IF 신호로 변환된다. 변환된 IF 신호는 아날로그-디지털 변환을 거쳐 디지털 I/Q 데이터로 저장된다. 강우 환경에서 수신 신호를 분석하기 위해 LFM 또는 PT 파형을 선택 저장하고, 신호처리 기법의 S/W로 분석한다.

그림 1(a)는 강우 상황에서 LFM 파형 송신 후 얻어진 수신 신호에 대한 신호처리결과(blue)로 가로축은 수신시간을 거리로 환산한 거리값이고, 세로축은 신호 크기가 된다. 수신 신호 상에 30 km 영역에서 잡음이 증가되는데, 이 영역이 강우 반사가 발생한 지역임을 알 수 있다. 80 km 이후는 매우 잡음이 낮아는데, 80 km 이전에서 강우 클러터에 의해 대부분 반사되는 효과로 보인다. 따라서 80 km에서 잡음은 반사 신호가 거의 없는 영역으로 볼 수 있고, 여기서 얻어진 잡음을 맑은 날의 값으로 고려한다. 따라서 30 km 영역에서의 탐지할 수 있는 신호크기와 80 km 영역에서 탐지할 수 있는 표적 신호 크기는 탐지 임계값 기준(red-line)으로 판단하면 20 dB 이상이 되며, 이것으로 강우 시 탐지거리는 30 km에서 줄어듦을 알 수 있다.



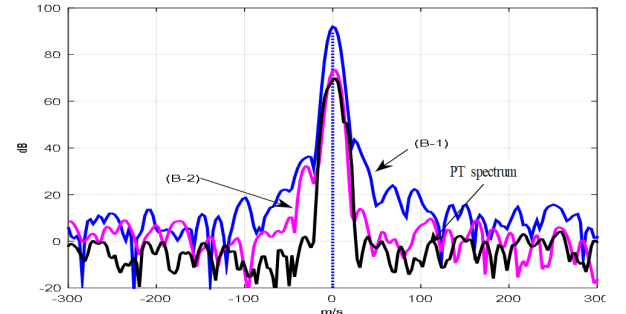
(a) 강우 시 LFM 파형 수신 신호

(a) LFM waveform received signal on raining



(b) 강우 시 펄스반복주파수가 높은 PT 파형 수신 신호

(b) High PRF PT waveform received signal on raining



(c) 거리별(B-1, B-2) PT 파형 속도 스펙트럼

(c) PT waveform received signal in respect to range

그림 1. 강우 시 레이다 수신 신호 특성

Fig. 1. Radar-received-signal characteristics at a rainy day.

강우 클러터 도플러 신호분포(W)^[8]는 식 (3)과 같이 클러터가 클수록 특정 도플러값(v_w)으로 이동되고, 클러터에 대한 특정 도플러값 중심으로 분산(σ_v)을 갖는 폭을 갖게 되고, 이 값이 클수록 신호폭이 두꺼워진다. 본 논문에서 사용한 PT 파형은 강우 클러터의 도플러영역에서는 800 m/s까지 확인이 가능하므로 식 (3)과 같이 도플러 신호분포를 수신 신호에서 확인할 수 있다.

$$W(v, \sigma_v) = \frac{W_{0v}}{\sqrt{2\pi\sigma_v}} e^{-\frac{(v-v_w)^2}{2\sigma_v^2}} \quad (3)$$

그림 1(b)에서 가로축은 신호처리 시 측정할 수 있는 PT 파형의 도플러 속도정보이며, 세로축은 모호성이 포함된 거리정보를 의미한다. 이러한 특성으로 PT 파형은 정확한 거리상 위치값을 확인할 수 없고, 신호처리 후 강우는 거리에 대하여 묶인 띠 형태나 파선 형태로 나타나게 된다. 임의 거리에 대한 선(B-1), 선(B-2)에서 얻어진 신호처리 속도 스펙트럼 결과를 그림 1(c)에 보였다. 여기서 검정색 선은 맑은 날 PT 파형으로 송신으로 얻어지는 수신 신호에서 임의 거리에서 속도 스펙트럼이다. 강우에 의한 도플러 특성이 나타나는 (B-1)과 (B-2)에서 속도 스펙트럼은 맑은 날 정상적으로 획득한 PT 파형의 속도 스펙트럼과 비교하면 선(B-1), 선(B-2)에 대한 속도 스펙트럼에서 주클러터 신호폭(6 dB)이 두꺼워짐과 클러터 중심 속도 이동이 표 3과 같이 정리된다. 클러터 반사 신호 증가로 B-1, B-2 도플러 영역에서의 잡음 레벨이 맑은 날에 비해 높아진 것을 알 수 있다.

표 4와 같은 파형 파라미터를 갖는 PT 파형은 거리에 대한 모호성으로 정확한 클러터의 거리 위치를 확인할 수 없으나, 높은 도플러 해상도를 갖게 되므로 속도 방향에서 잡음증가에 따른 클러터 폭이 두꺼워짐과 제로클러터의 중심 속도값이 바람 등에 의해 발생하는 속도편이 분석에 적합하다. 이러한 영향은 고도에 따라 바람이 다르므로^[11] 그림 1(b)와 같이 동일한 R-V 매트릭스에서 강우 영

표 3. 강우 클러터 환경에서의 도플러 영역 특성
Table 3. Doppler characteristics from weather clutter.

Contents	Clear day	Rain day
Velocity offset	<3 m/s	3~24 m/s
Width(6 dBc)	12 m/s	21 m/s

표 4. 지상 레이더에서 사용 중인 PT 파형 파라미터^[7]
Table 4. PT waveform parameters available at ground-radar^[7].

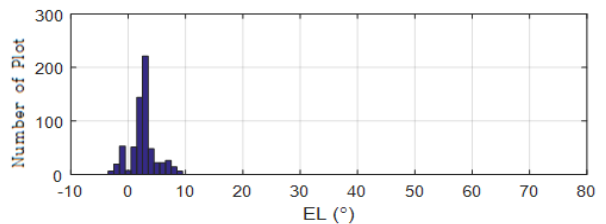
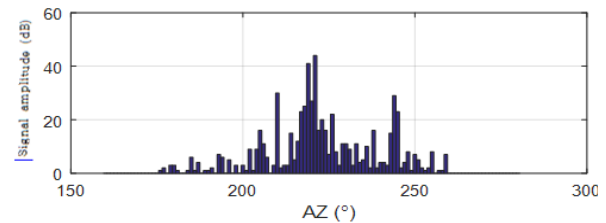
PRI	T_0	8.5 usec~11.5 usec
Number of pulses	N_p	<600
Duty	τ	4 %~6 %
Number of Doppler	-	>500
Carrier frequency	f_c	9~10 GHz

향으로 클러터들이 점 형태나 파선 형태로 발생한다.

2-3 강우 시 레이더 허상 플롯

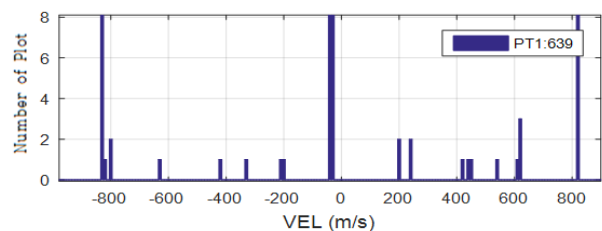
X대역 지상 레이더는 탐색과 추적을 동시에 수행하기 위해 탐색 플롯에 대한 추적 초기화 과정으로 허상 추적 발생을 최소화한다. 그러나 그림 2와 같이 탐지 플롯이과 다하게 발생하는 경우, 수신 신호상의 특이현상이 발생하면 예측할 수 없는 허상추적이 발생한다.

그림 2(a)는 강우 시 발생한 플롯에 대한 방위각 상에 플롯의 신호 크기와 고각 방향에서 플롯이 분포하는 각도를 동시에 보였다. 그림 2(a) 상단은 방위각에서 신호 크기가 큰 플롯은 허상추적이 발생한 위치와 유사하며, 그림 2(a) 하단에서 고각 방향에서의 플롯의 수를 보면 고각 0~10도에 그 수가 주로 분포하는 것을 알 수 있다. 그림



(a) 각도별 강우 클러터 플롯 특성

(a) Characteristics of rain clutter plots in respect to angle



(b) 강우 클러터의 플롯의 속도 특성

(b) Velocity characteristics of rain clutter plots

그림 2. 강우 시 레이더 운용 결과

Fig. 2. Radar operation result through raining.

2(b)는 정해진 시간 내 발생한 총 639개에 대하여 속도 특성(가로축)에 대한 플롯수(세로축)를 도시하였다. PT 파형은 도플러 처리 결과로 강우 클러터의 제거 속도(<30 m/s)를 적용할 경우, 이상적으로는 플롯 상에 30 m/s 이상의 성분은 존재할 수 없으나, 운용 결과로는 제거 속도 이상의 성분(200 m/s, 400 m/s, 800 m/s)이 있는 것을 알 수 있다.

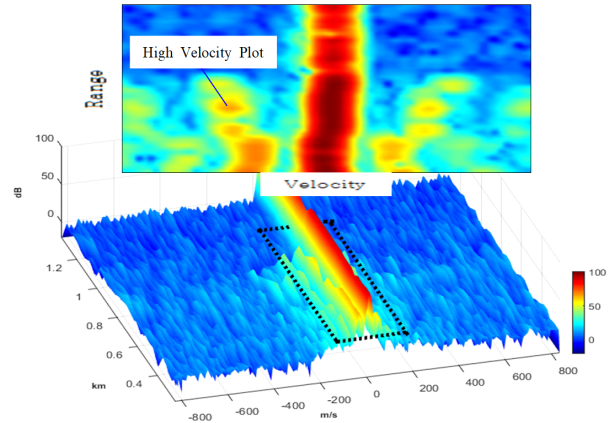
이러한 현상은 기존 클러터 제거 방법인 도플러 신호 처리로는 제거가 어려운 예외사항으로서 강우 시 수신 신호에 의해 탐지 플롯 중 고속특성을 보이는 것을 선택적으로 저장하여 수신 신호상 특성을 분석하였다.

2.4 고속 강우 클러터의 수신 신호 분석

강우 클러터에서 발생한 플롯에 대한 표적이나 클러터에서 반사 신호는 안테나, 수신기 전단부, 수신기, ADC(Analog to Digital Converter)를 거쳐 이진데이터 형태로 전환되고 신호처리용 DDCM(Digital Down Converting Module)과 신호저장용 DDCM에 입력되므로 신호처리기 입력 수신 신호와 저장 수신 신호는 동시점 동일데이터가 된다. 얻어진 수신 신호를 신호처리기 모의 S/W를 이용하여 수신 신호를 도시하면 그림 3(a)와 같다.

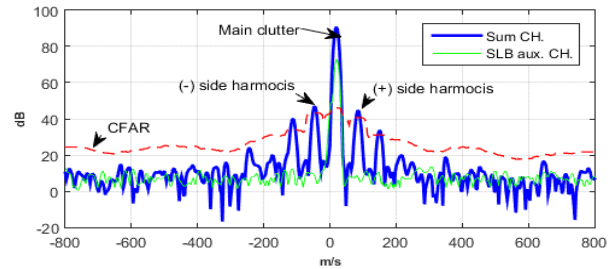
그림 3(a)는 0도 이상 고각에서 획득한 PT 파형 처리 결과로 x축(가로) 속도, y축 거리, z축 신호 크기를 3차원으로 고속플롯 수신 신호 형상을 도시하였다. 거리축정영역 0.4~1 km 거리에서 도플러 방향으로 0속도 근처에서 일정 도플러 간격으로 부엽이 확산된다. 그림 3(a)는 2차원 거리-속도 매트릭스 형태로 0 속도에서 주클러터(붉은 색)가 보이고, 이를 기준으로 일정한 속도 간격으로 고조파 형태로 플롯이 발생한다. 고속플롯이 있는 임의 거리에서 1차원 속도 스펙트럼을 그림 3(b)에 도시하고, 나타난 고조파의 속도 성분과 크기는 표 5와 같으며, 강우 신호와 부엽고조파로 구분된다.

이러한 부엽고조파는 신호 포화 효과로 발생하는데 그림 3(b)의 속도 스펙트럼 형상은 ADC단 포화 후 스퓨리어스 형태^[9]와 달리 일정한 고조파 간격과 부엽의 sinc 함수 형태로 대신호(high power) 정현파가 리미트된 왜곡 신호^[3]와 유사한 것으로 판단된다. 또한 지상 레이다는 주안테나와 물리적으로 다른 부엽 제거용 보조 안테나를 갖게 되며, 이는 부엽 신호 제거 기능을 하게 된다. 그림



(a) 강우 시 고속플롯 수신 신호

(a) Received signal for the high velocity plot on raining



(b) 주/보조 안테나들의 수신 신호 속도 스펙트럼

(b) Velocity spectrum from main/auxiliary antenna

그림 3. 고속 클러터 플롯의 수신 신호 특성

Fig. 3. Received signal's characteristics of high velocity plot from rain clutter.

표 5. 강우 클러터에서 플롯 신호의 크기와 속도

Table 5. Amplitude and velocity of plots in rain clutter.

Velocity	Amplitude(dB)	Remark
-113 m/s	39.93	Side harmonics
-45 m/s	46.95	Side harmonics
19.5 m/s	90.84	Main clutter
-84.52 m/s	44.56	Side harmonics
149.5 m/s	33.52	Side harmonics

3(b)의 보조 안테나의 수신 신호(녹색선)는 속도 스펙트럼 포화 현상이 없고, 주안테나 신호 크기에 비해 작으므로 클러터 신호가 주안테나 정면 방향에서 유입된 것으로 보인다.

그림 3(b) 고조파 성분들은 CFAR 임계값 이상 신호크기를 갖는 고속의 허상 오피플롯이 된다. 이러한 고속 클러터 플롯은 기존 클러터 경감기술 신호처리^[9]로는 제거될 수 없다. 이러한 플롯에 대하여 감쇄 적용 후 탐지거리 감소의 최소화를 통해 고속 클러터의 원인인 부엽고조파 제거에 효과적임을 다음 장에서 확인하였다.

III. 강우 클러터 감쇄를 통한 탐지거리 개선

3-1 ADC 전단 감쇄를 이용한 클러터 신호영향 경감

강우 클러터 반사 신호는 식 (1)에서 레이더에 대한 잡음증가의 영향을 줄이기 위해 그림 4(a)에 같이 신호처리기 전단부인 ADC 전단 감쇄(L_{atn})를 적용^[10]한다. 이는 X 대역 전단부에서 수신 감쇄를 얻을 수 없고, 잡음지수 증가 등 영향으로 수신 전단부 열화 등을 줄이기 위해 그림 4(a)와 같은 구조를 구성하였다. 신호처리기 거리속도 매트릭스 내 측정 영역에서 잡음 측정 후 그 수준을 레이더 통제기에 전달하면 통제기가 이를 반영하여 감쇄기에서 적용한 감쇄를 적용할 수 있다. 이러한 감쇄를 반영한 ADC 앞단에서의 S/N은 식 (1)을 수정하여 식 (4)와 같이 정리된다. 레이더는 잡음환경에서 신호처리기가 속도와

거리를 측정하고, CFAR로 잡음에 대한 적응형 임계값^[9]이 적용된다. 실제 레이더 빔송신 수신 신호에서 레이더의 정해진 표적에 대한 S/N 분석이 가능해진다.

$$\frac{S_{target}}{N_{tot}} = \frac{\frac{S_{target}}{L_{atn}}}{\frac{N_0 + C_{rain}}{L_{atn}} + N_{RSP}} \quad (4)$$

그림 4(b)는 표적에 대하여 ADC 앞단 감쇄 적용 전 후 수신 신호 속도 스펙트럼으로 감쇄 전후 S/N값 변화가 없는 것을 알 수 있다. 다시 말해 ADC 앞단에서 적용한 감쇄는 시스템 S/N에 크게 영향을 주지 않는다. 이는 감쇄가 신호와 잡음에 적용되며, 탐지 임계값(탐지 임계값-2)도 낮아지므로 탐지능력은 크게 차이가 없게 된다. 그러나 감쇄 값이 점차 커짐에 따라 수신기에서 유입성분(N_0 , C_{rain})은 ADC 앞단에 낮아지고, 신호처리기 내부 잡음 성분이 점차 나타나게 된다. 이것은 식 (4)에서 외부유입 잡음 신호(N_0 와 C_{rain})는 감쇄기 영향으로 작아지면 N_{RSP} 는 고정되고 S_{target} 은 감쇄되어 S/N값이 감소하게 된다. 따라서 그림 4(b)에 적용한 최적 감쇄값 범위에 대한 레이더에서 검증이 필요하다.

3-2 수신 신호 분석을 이용한 감쇄 적용 범위 도출

근거리 클러터는 지상 레이더에 대하여 PT형 근거리에서 반사 펄스에 대해 처리하지 않으므로 근거리 신호에 대한 수신기 포화는 레이더 신호처리 시 영향을 주지 않는다. 그림 5(a)는 빔방사 시 획득한 3차원 수신 신호로 거리 0.4 km~1.4 km까지 얻게 되고, 속도 -800 m/s~+800 m/s 영역 내 R-V 매트릭스가 얻게 된다. 빔방사 후 표적이 없는 상태에서 신호처리기에 유입된 잡음 신호를 z축에 신호 크기로 도시하였다. 빔방사 시 클러터가 존재하는 0속도 근처에서 상당한 크기를 갖는 반사 신호가 발생한다. 여기서 잡음 레벨이 0속도 근처 제거 시 잡음 레벨은 0 dB 근처로 계산된다. 이러한 잡음은 빔송신 시 안테나를 통해 강우 또는 지형 등의 외부환경에서 유입되는 신호가 열잡음에 합해진 형태로 나타나게 된다.

그림 5(b)는 레이더 신호처리기 자체잡음 수신 신호를 도시한 결과이다. 외부에서 안테나 유입 신호를 배제하

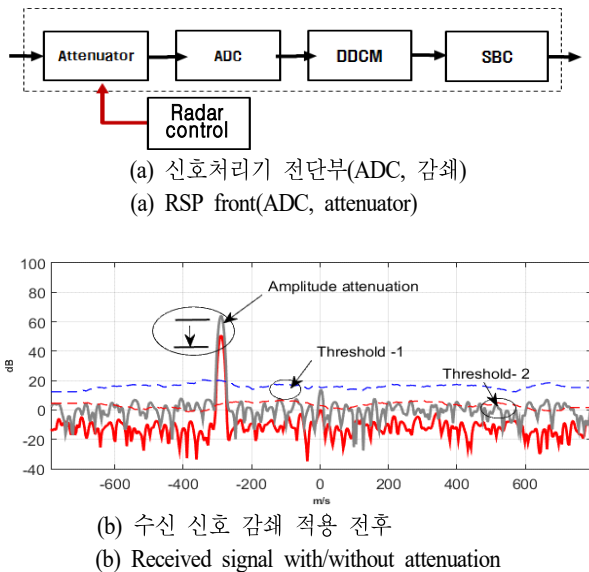
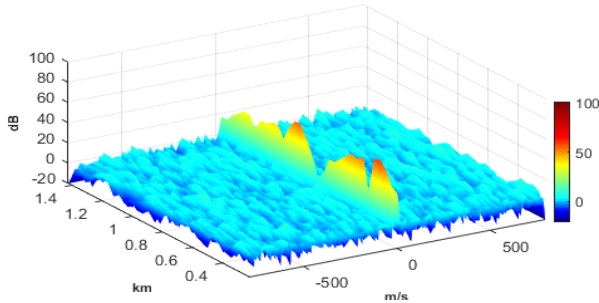
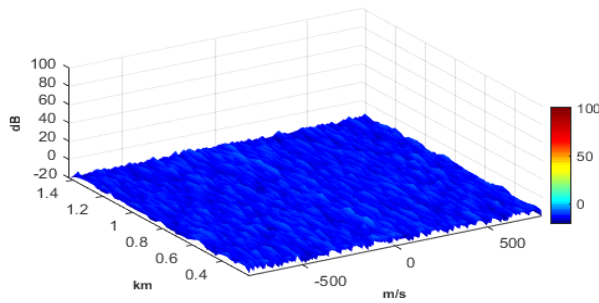


그림 4. ADC 전단부에서 감쇄 적용 시 수신 신호
Fig. 4. Received signal of attenuation in the RSP front.

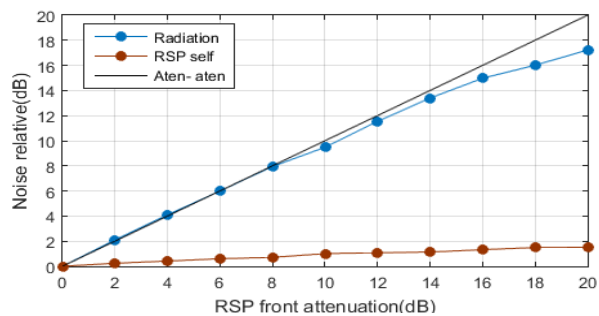
기 위해 안테나 입력 경로를 개방하였다. 이는 그림 5(a)에 비해 매우 작은 값이며, 이러한 잡음은 외부환경과 관계없이 신호처리기 내에 잡음으로 항상 일정하게 작용하게 된다. 외부에서 유입되는 잡음 신호는 신호처리기



(a) 빔 방사 시 신호처리기 잡음
(a) Noise of the RSP after radar radiations



(b) 신호처리기 자체잡음
(b) RSP self noise



(c) 감쇄에 대한 상대잡음전력 비교
(c) Comparison of relative noise power for the noises to attenuations

그림 5. 빔 송신 잡음과 신호처리기 자체 잡음 수신 신호에 대한 ADC 감쇄 적용

Fig. 5. ADC attenuation of received signals for a noise of radiation and self noise of RSP.

앞단에서 감쇄를 적용할 경우 외부환경 잡음증가를 상쇄할 수 있다. 그림 5(c)는 x축 RSP 전단 감쇄량에 따라 잡음전력 감소를 나타내었다. 그림 5(c)의 검정색 선은 정상적으로 감쇄를 적용하여 동일한 상대잡음 전력은 동일한 값으로 직선의 형태로 감소된다. 반면, 빔방사 후 잡음감쇄는 RSP 전단 15 dB 이상 감쇄값에 대하여 선형적으로 감쇄되지 않음을 모의시험을 통해 확인하였다. 그림 5(b)에서 보인 잡음은 그림 5(c) 붉은색 선에서 감쇄를 적용하더라도 신호처리기 자체 잡음으로 앞서 더 이상 잡음전력이 1 dB 이상 감소되는 않는다. 이상의 결과에서 신호처리기 앞단에서 감쇄 0 dB에서 15 dB가 적절한 값을 알 수 있다. 표적 S/N은 15dB 이상의 감쇄에서는 측정되는 잡음전력이 더 이상 감쇄되지 않아 표적 신호크기가 점차 감소된다. 그림 4(a) 앞단에서 잡음추가 모의한 후 탐지추적시험에서 발생하는 허상플롯 수를 확인한다. 빔방사 없이 신호처리기 전단 감쇄기 입력단에 추가잡음 9 dB 기준으로 입력하면 표 6과 같이 초당 플롯 0.81개가 발생되고, 점차 감쇄를 추가함에 따라 초당 플롯수가 줄어들고, 9 dB 감쇄 적용시 상대입력잡음 0 dB로 허상 플롯이 거의 측정되지 않는다. 따라서 추가 입력 잡음은 적절한 감쇄를 이용하면 레이다에서 허상 플롯이 제거됨을 확인하였다.

3-3 강우 시 레이다 감쇄 적용

실제 레이다 운용 중에는 빔방사 전후에서 신호처리기 잡음상태가 달라진다. 강우 클러터에 의한 반사 신호 유입에 대하여 적절한 감쇄값을 적용하여 탐지거리 감소를 최소화할 수 있다. 그림 6에서 부가잡음의 크기에 따른 탐지거리 감소율 모의 표적에 대한 탐지거리 확인을 통

표 6. 잡음모의시 감쇄적용 후 PT신호 플롯 수

Table 6. Number of plots by simulated noises after attenuation.

Noise addition(dB)	Attenuation(dB)	Plots per second
9	9	0/sec
9	6	0.64/sec
9	3	0.72/sec
9	0	0.81/sec

한 시험으로 결과를 획득하여 붉은색 선으로 도시하였다. 예를 들어 외부로부터 유입된 맑은 날 대비 부가잡음 12 dB라면 식 (1)에 의하여 탐지거리는 약 40 % 감소로 예측되는데, 실제 레이더 내 모의시험에서 12 dB 잡음추가 시 얻어진 결과와 유사하다. 그림 6의 파란색 실선은 레이더에 유입되는 잡음에 대하여 감쇄 적용 후 모의시험 시 얻어지는 탐지거리이다. PT 파형에 대한 탐지거리는 모호성을 배제하기 위해 최초 추적거리 값을 기준으로 정의하였다. 감쇄 12 dB에 대한 탐지거리 감소율이 5 % 이내임을 다수 진입 표적 생성 후 탐지 모의시험을 통해 확인하였다. 부가잡음에 대하여 감쇄를 적용하면 탐지거리 감소율이 부가잡음에 대하여 거리감소율이 개선되는 것을 확인하였다. 그림 7(a) 및 그림 7(b)는 실제 강우 신호에 대하여 감쇄 전후 적용하여 얻어진 수신 신호이다. 그림 7(b)는 감쇄 15 dB를 적용한 수신 신호 결과로 R-V 매트릭스에서 2개의 선(C-1, C-2)에서 속도 스펙트럼을 그림 7(b)에 표시하였다. 여기에 감쇄 값을 적용 전 수신 신호의 속도 스펙트럼을 검정색 실선으로 도시하였다.

감쇄 전 표적이 고속 플러트에 의해 표적 신호가 차폐되어 탐지되지 않으나, 감쇄가 적용된 선 C-1의 경우 표적 신호에 대하여 클러터 신호 감소로 표적탐지가 정상적으로 이루어진다. 선 C-2의 경우 감쇄 전 수신 신호 속도 스펙트럼에서의 잡음 레벨에 비해 낮아진 것을 확인하였다. 따라서 강우 수신 신호에 감쇄값 15 dB 적용하면 강우 클러터에 의한 탐지거리 감소를 최소화하고 고속플러트를 제거함을 보였다. 본 논문에서 신호처리기 앞단에서 감쇄18 dB까지 적용될 수 있음을 확인하였다.

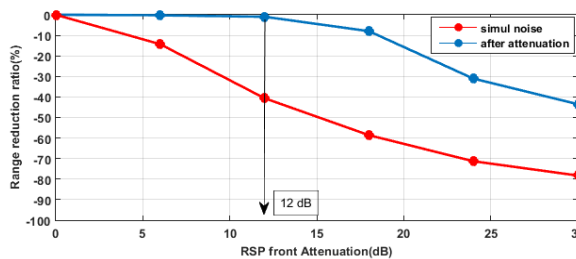
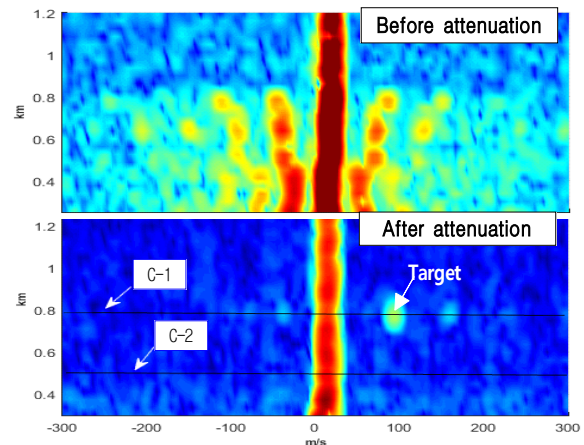


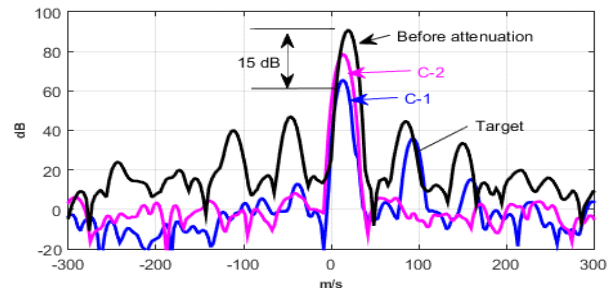
그림 6. 부가잡음 탐지거리 감소율 및 감쇄값에 따른 탐지거리 감소율 비

Fig. 6. Range reduction by additional simulated noises and range reduction range by attenuations.



(a) 강우 클러터에 대한 감쇄 전/후 수신 신호

(a) Received signal before/after attenuation for rain clutter



(b) 강우 시 감쇄 전/후 속도 스펙트럼

(b) Velocity spectrum before/after attenuation at rains

그림 7. 강우 감쇄 후 수신 신호형상 및 속도 스펙트럼
Fig. 7. Received signal and velocity spectrum after attenuations.

그림 8은 신호처리기 감쇄 15 dB 이상에서 발생하는 탐지거리 감소에 대한 개선방안으로 PT 파형 펄스누적의 효과를 보였다. 펄스 누적 5개 사용 시 신호 크기는 대략 2~3 dB 개선되며, 이를 통해 감쇄 20 dB까지 탐지거리 개선 확장이 가능하다. 그러나 탐색시간이 5 배 증가되므로 누적 탐지거리 감소에 대한 절충(trade off)이 필요하다. 또한 기존 연구 사례^[4]와 비교하면 기존 연구는 MTI를 수신 신호 결과를 이용하였으나, 속도 성분이 없는 지형 클러터만 배제됨을 레이더에 적용하였으나, 본 논문은 속도 성분이 있는 지상 클러터 또는 속도 성분이 있는 허상의 클러터도 대응할 수 있어 클러터 경감기법으로써 보다 효과적으로 사료된다.

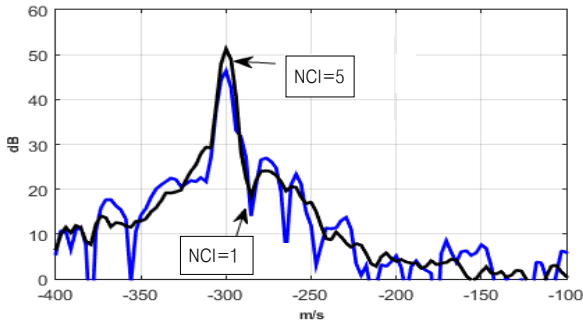


그림 8. 펄스 누적을 통한 표적 신호 크기 개선
Fig. 8. Improvement of target amplitude from pulse integration.

IV. 결 론

본 논문에서는 강우 시 잡음증가로 인한 탐지거리 감소를 증가와 강우 레이다 수신 신호에서 고속 클러스터 발생을 확인하였다. 강우에 의한 탐지성능 저하를 개선하기 위해 신호처리기 앞단 감쇄를 적용하고, 수신 신호 분석을 통해 감쇄값의 최적 범위를 도출하였다. 레이다 빔방사 후 예상 잡음입력에 대한 다표적 탐지 모의시험결과 감쇄 후 탐지거리 감소율이 개선됨을 확인하고 강우 시 감쇄된 수신 신호를 통해 고속플러티 제거됨을 확인하였다.

References

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, New York, McGraw Hill, 2001.
- [2] C. Alabaster, *Pulse Doppler Radar: Principles, Techno-*

- logy, Application*, Edison, NJ, Scitech Publishing, 2012.
- [3] 김태형, 이재웅, 변영진, "마이크로파 탐색기의 HPRF 파형에 대한 지표면 부엽클러스터와 표적탐지 오류 확률," *한국통신학회논문지*, 34(4), pp. 478-483, 2009년 4월.
- [4] J. F. Roueltte, K. A. Skrivseth, "Coherent data collection and analysis capability for the An/SPS-48E radar," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 18, no. 3, pp. 388-397, 1997.
- [5] S. L. Krich, M. Montanari, V. Amendolare, and P. Berestesky, "Wind turbine interference mitigation using a waveform diversity radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 2, pp. 805-815, Apr. 2017.
- [6] 이종길, "기상레이다에서의 클러스터 영향 분석," *한국정보통신학회논문지*, 20(9), pp. 1641-1648, 2016년 9월.
- [7] 오현석, 김수근, "지상레이다의 PT-파형 수신 신호와 항공기 추적정보를 이용한 항공기 도플러 프로파일 추출," *한국전자과학회논문지*, 28(2), pp. 129-138, 2017년 2월.
- [8] D. K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Boston, MA, Artech House, 2005.
- [9] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed. Chicago, McGraw-Hill, 2005.
- [10] 노지은, 최병관, 이희영, 양진모, 이광철, 이동휘, 정래형, 김태환, 이민준, "3차원 다기능 레이다 고속 실시간 신호 처리기 개발," *한국전자과학회논문지*, 22(12), pp. 1045-1059, 2011년 12월.

오 현 석 [국방과학연구소/선임연구원]



2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2011년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
2012년 9월: 충남대학교 전파전기공학연구

소 객원연구원

2012년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이다시스템설계, 초고주파 회로설계