

펄스 레이더 수신 신호 생성 기법

Method of Received Signal Generation for Pulse Radar

하 종 수*

Jong-Soo Ha

박 규 철*

Gyu-Churl Park

Abstract

To analyze and verify the performance of a pulse radar without the real target data, there is a need to make the simulated signal which is similar to the received signal of the real target. In this paper, a method of the received signal generation for the pulse radar is proposed to solve the above need. The user-made scenarios are used to model the fast and small target and the clutter data based on the ground environment. These data are transformed into the electric signal using the proposed method. The efficiency of the proposed method is proved by comparing the signal of a field test with the simulated signal.

Keywords : Pulse Radar(펄스 레이더), Signal Generation(신호 생성), Target Data(표적 데이터), Clutter Data(클러터 데이터)

1. 서론

대전차미사일을 대상으로 하는 지상 환경에서의 소프트킬(Soft-Kill) 시스템은 그 센서로서 펄스 레이더를 사용한다^[1]. 이러한 펄스 레이더의 성능을 분석하고 검증하기 위해서는 실제 표적을 발사하고 이에 대한 레이더의 대응을 시험해야한다. 그러나 이와 같은 시험을 반복적으로 수행하기에는 시간과 비용적인 측면에서 어려움이 있으며 다수의 표적을 동시에 발사하는 등의 시험적인 측면에서도 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 실제 표적과 유사한 모의 신호를 이용함으로써 반복적인 실제 시험을 대체할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 펄스 레이더

에서 수신하는 레이더 반사와 신호를 생성하는 기법을 제안한다.

먼저 수신 신호를 생성하기 위한 시뮬레이터 설계를 간단하게 설명하고, 고속/소형 표적 데이터와 지상 환경에서의 클러터 데이터를 모델링하는 기법을 제안한다. 그리고 사용자가 만드는 시나리오와 모의 데이터 모델링과의 관계를 설명하며 이렇게 모델링된 데이터를 실제 전기 신호로 변환시키는 기법을 제안한다. 끝으로 생성된 표적과 클러터 신호를 제시하고 실제 시험에서 획득한 수신 신호와 비교함으로써 제안하는 기법의 효용성을 검증한다.

2. 시뮬레이터 설계

펄스 레이더 시뮬레이터는 Fig. 1과 같이 DaqPC에 기반한 신호처리부와 고주파변환기에 기반한 고주파

† 2009년 5월 30일 접수~2009년 8월 31일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 하종수(jsha@add.re.kr)

부로 구성된다. 펄스 레이더에서 고주파부로 기준 클럭을 전송하면 고주파부에서는 이 기준 클럭과 자체 트리거 신호를 신호처리부로 전송한다. 신호처리부에서는 이를 기준으로 IF 표적 신호를 생성하며, 고주파부에서는 IF 신호를 RF 신호로 변환하고 펄스 레이더의 안테나(Ch1, Ch2) RF 신호를 전송함으로써 기능을 수행한다.

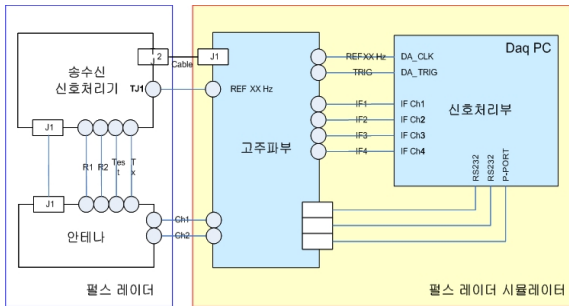


Fig. 1. 펄스 레이더 시뮬레이터 구성도

가. 신호처리부 구성

신호처리부는 Fig. 2와 같이 구성되어 있다. GUI를 통해 생성한 디지털 신호는 ICS-500A-T8 모듈과 ICS-564A 모듈을 통해 IF 아날로그 신호로 변환된다.

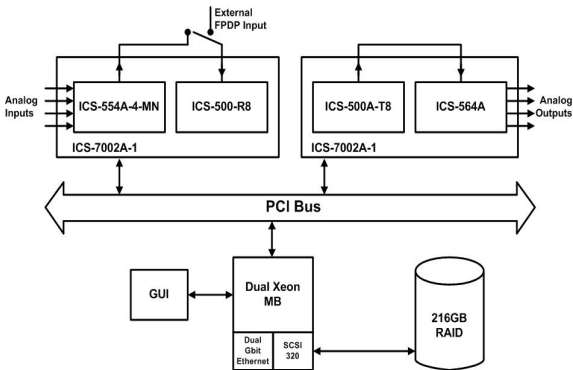


Fig. 2. 신호처리부 구성도

나. 고주파부 구성

고주파부의 구성도는 Fig. 3과 같다. 4개의 IF 입력 단자와 2개의 RF 출력 단자를 통해 입출력이 이루어지며 펄스 레이더로부터 10MHz의 기준 클럭을 입력받아 시뮬레이터와 펄스 레이더의 동기를 일치시킨다. 신호처리부에서 생성한 IF 신호는 주파수상향변환기를 통해 RF 신호로 변환되며 인터페이스 기판에서는 펄스

레이더와의 동기화, 트리거 신호를 이용한 수신 신호의 거리제어 등을 수행한다.

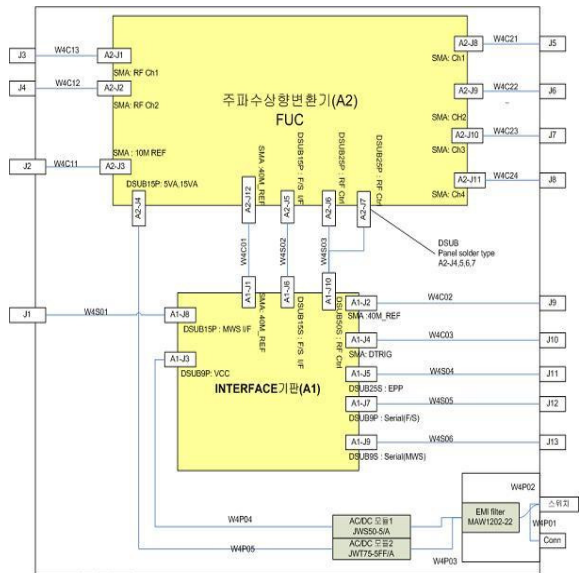


Fig. 3. 고주파부 구성도

3. 수신 신호 생성 기법

가. 표적 데이터 모델링

표적 데이터는 주파수 영역에서 거리셀과 속도셀의 2D 좌표 평면에 나타나며^[3] 레이더 신호에 반사된 정도에 따라 신호크기가 다르므로 표적 데이터를 모델링하기 위해서는 이 값들을 설정해야한다.

1) 거리셀 크기

거리셀의 개수 N_{rng} 은 식 (1)과 같이 펄스 레이더의 PRI와 샘플링 주파수 f_s , 그리고 보정개수 N_{comp} 에 의해 설정된다. 식 (1)에 의해 N_{rng} 는 128이 되며 거리셀의 크기 A_{rng} 은 식 (2)에 의해 30m가 된다. R_{max} 는 최대 탐지 거리이다.

$$N_{rng} = \frac{PRI \times f_s}{N_{comp}} \tag{1}$$

$$A_{rng} = \frac{N_{rng}}{R_{max}} \tag{2}$$

2) 속도셀 크기

표적 속도 V_{tgt} 는 식 (3)과 같이 펄스 레이더의 반송 주파수 f_c 와 도플러 주파수 f_d , 그리고 빛의 속도 c 에 의해 설정된다. 이 때 속도셀의 크기 A_{vel} 는 셀 당 도플러 주파수에 따라 바뀌므로 식 (4)에 의해 결정되며 0.7697m/s가 된다. N_{vel} 는 속도셀의 개수이다.

$$V_{tgt} = \frac{f_d \times c}{2f_c} \tag{3}$$

$$A_{vel} = V_{tgt} \cdot \frac{PRF}{N_{vel}} \tag{4}$$

3) 신호 크기

신호 크기 A_{tgt} 를 설정하기 위해서는 본 시뮬레이터의 특성을 반영해야 한다. ADC의 비트수는 16비트이므로 최대값인 $2^{15}-1$ 이 최대전압이 되며 신호처리부 IF 출력단의 전력 P_{IF} 은 Table 1과 같다.

Table 1. IF 출력단 전력

출력단1 [dBm]	출력단2 [dBm]	출력단3 [dBm]	출력단4 [dBm]
-7.33	-7.27	-7.47	-7.26

각 IF 출력단은 레이더 주파수 채널에 따라 Table 2와 같은 감쇄값을 가지게 된다. 출력단 1, 2의 경우 표적 신호를 생성하므로 감쇄값이 크며 출력단 3, 4의 경우 클러터 신호를 생성하므로 감쇄값이 작다. 레이더 주파수 채널이 2번일 때 출력단 1로 -100dBm의 표적 신호를 생성하고자 할 경우 A_{tgt} 설정을 위한 수신 전력 P_r 은 감쇄값 -78.2dB와의 차이값 -21.8dBm이 된다.

P_r 로부터 A_{tgt} 를 계산하기 위해서는 먼저 비트 최대값과 출력단 전력사이의 변환값 SF_{tgt} (Scale Factor)를 식 (5)와 같이 구해야 한다. 그런 다음 식 (6)에 의해 A_{tgt} 를 계산할 수 있다. 채널 2, 출력단 1에서 -100dBm의 표적 신호를 생성하고자 할 경우 A_{tgt} 는 6195가 된다.

Table 2. IF 출력단의 채널별 감쇄값

채널	출력단1 [dB]	출력단2 [dB]	출력단3 [dB]	출력단4 [dB]
1	-78.8	-79.1	-25.4	-27.3
2	-78.2	-79.0	-25.4	-26.9
...
9	-78.2	-79.3	-26.9	-26.4

$$SF_{tgt} = \frac{2^{15} - 1}{\sqrt{\frac{P_{IF}}{10^{10}} \cdot 1000}} \tag{5}$$

$$A_{tgt} = SF_{tgt} \times \sqrt{\frac{P_r}{10^{10}} \cdot 1000} \tag{6}$$

나. 클러터 데이터 모델링

클러터 데이터도 표적 데이터와 마찬가지로 주파수 영역에서 거리셀과 속도셀의 2D 좌표 평면에 나타난다. 다만, 클러터의 경우 정지해있거나 매우 느리게 움직이기 때문에 DC 레벨로 신호들이 집중되어있으며 side-lobe가 주변 주파수에 나타나게 된다. 본 논문에서는 표적 신호탐지를 방해하는 요인으로서의 클러터 데이터를 모델링하였다. 즉 주파수 영역에서 나타나는 실제 클러터의 현상^[4]과 클러터의 공학적 모델을 혼용하여 클러터 데이터를 모델링하였다.

1) 신호 크기

정현파 형태의 표적 신호와는 달리 클러터 신호는 잡음 형태이기 때문에 V_{rms} 를 기준으로 신호크기 A_{clt} 를 설정해야한다. 따라서 비트의 rms값과 출력단 전력사이의 변환값 SF_{clt} 는 식 (7)과 같이 정의된다. 그런 다음 식 (8)에 의해 A_{clt} 를 계산할 수 있다. 이 때 미리 구한 전체 클러터 데이터의 V_{rms} 의 평균값 $E_{V_{rms}}$ 를 이용해 신호크기에서 rms성분을 제거한다. 채널 2, 출력단 3에서 -50dBm의 클러터 신호를 생성하고자 할 경우 $E_{V_{rms}}$ 이 0.3이라면 A_{clt} 는 10147이 된다.

$$SF_{dt} = \frac{2^{15} - 1}{\sqrt{2} \sqrt{\frac{P_r}{10^{10}}}} \quad (7)$$

$$A_{dt} = SF_{dt} \times \sqrt{\frac{P_r}{10^{10}}} \div E_{V_{rms}} \quad (8)$$

2) 수신 전력

표적 데이터의 경우 P_r 은 표적탐지거리, RCS, 안테나 이득 등에 의해 결정되나 클러터 데이터의 경우에는 지면, 수면, 나무 등 클러터 요소에 대한 정밀한 모델링을 통해 P_r 을 구해야한다. 그러나 본 논문에서는 펄스 레이더에서 로깅한 데이터들을 바탕으로 P_r 을 도출하였다. 다만, 클러터 수신 전력의 경우 거리의 제곱에 반비례하므로 거리셀 별 수신전력 $P_r(rng)$ 은 식 (9)와 같이 구할 수 있다. rng 는 거리셀이다.

$$P_r(rng) = \frac{P_r}{rng} \quad (9)$$

3) 데이터 분포

클러터에 의한 표적 신호 탐지 성능의 저하를 모델링하기 위해서는 DC레벨에 있는 클러터 데이터의 분포를 조절할 필요가 있다. 이를 위해 본 논문에서는 저역통과필터를 사용하였으며 식 (10)의 j 번째 필터계수(전체 필터 길이 중) $C_{flt}(j)$ 를 설정함으로써 저역통과필터를 구성하였다. 식에서 보듯이 $C_{flt}(j)$ 는 필터의 길이 L_{flt} 와 대역폭 BW, PRF에 의해 조정된다.

$$C_{flt}(j) = e^{-\frac{(j - \frac{L_{flt}}{2})^2}{2(\frac{PRF}{BW})^2}} \quad (10)$$

다. 수신 신호 생성

1) 신호 형식

펄스 레이더에 수신되는 시간 영역의 신호를 2차원으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 셀의 개수는 ‘채널

(4)×레이더신호(I,Q:2)×펄스구간(M)×펄스수(N)’개가 된다.

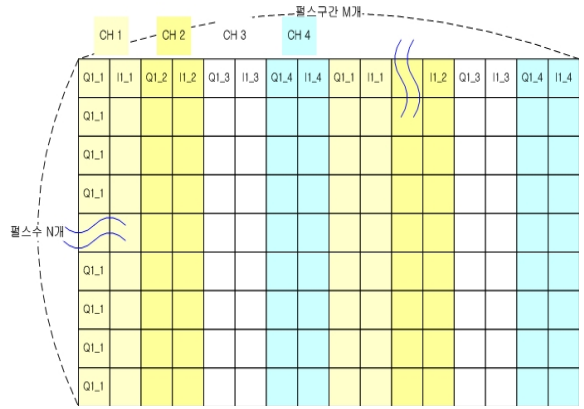


Fig. 4. 수신 신호 형식(시간 영역)

2) 표적 신호

표적 신호는 정현파이므로 수신 신호는 식 (11)과 같이 I(In phase : cos), Q(Quadrature phase : sin) 형태로 생성한다.

$$I(i) = \cos(2\pi f_d(\frac{i}{f_s} - \frac{2rng(i)}{c} + \theta_0)) \quad (11)$$

$$Q(i) = \sin(2\pi f_d(\frac{i}{f_s} - \frac{2rng(i)}{c} + \theta_0))$$

펄스 레이더는 한번 스캔시 N개의 펄스를 송신하는데 $I(i)$, $Q(i)$ 는 i 번째 펄스에 대한 수신 신호이며 $rng(i)$ 는 i 번째 펄스에서의 표적과의 거리를 나타낸다. θ_0 는 수신 신호의 위상차이며 다중 표적을 생성할 경우 표적들을 구분하는 기준이 된다.

Fig. 4에서 수신 신호는 매 펄스(세로축)마다 존재하며 표적의 거리에 의해 펄스구간이 결정된다. 펄스구간은 식 (12)에 의해 구해진다. PW는 펄스폭이며 ceil과 floor는 c언어 함수이다.

$$Target \geq ceil(\frac{2rng(i)}{c} \cdot \frac{f_s}{N_{comp}}) \quad (12)$$

$$Target \leq floor((\frac{2rng(i)}{c} + PW) \cdot \frac{f_s}{N_{comp}})$$

3) 클러터 신호

표적 신호의 경우 수신전력 등을 고려하여 정현파를 생성하였지만 클러터 신호의 경우 Fig. 5와 같은 일련의 과정을 거쳐야 한다.

먼저 시간 영역에서 노이즈 특성을 보여야 하므로 가우시안 노이즈를 발생시킨다. 이 신호를 FFT를 이용하여 주파수 영역의 신호로 변환시키고 DC 레벨에 몰려있는 노이즈만 남기기 위해 저역통과필터(LPF)를 사용한다. 그런 다음 IFFT를 이용하여 주파수 영역의 신호를 시간 영역의 신호로 변환시키고 클러터 수신 전력 $P_r(mg)$ 을 곱하면 클러터 신호가 생성된다.

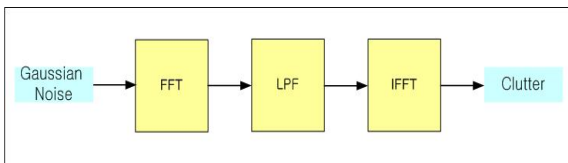


Fig. 5. 클러터 신호 생성

라. 표적 시나리오 생성

표적 시나리오를 생성하기 위해 Table 3의 주요 파라미터를 생성할 필요가 있다.

Table 3. 시나리오 관련 주요 파라미터

주요 파라미터	설명
이동 거리(r_{te})	표적과 종료점 사이의 거리
거리(r_{to})	수신 레이더와 표적과의 거리
표적궤적각도 (θ_{se})	표적 궤적(시작점~종료점)과 수평면 사이의 각
방위각(θ_{to})	수신 레이더와 표적과의 방위각
이동 속도($v_{r_{te}}$)	표적 궤적과 수평인 표적의 이동 속도
가속도($a_{r_{te}}$)	표적의 가속도
도플러 속도 (v_d)	표적의 도플러 속도
도플러 주파수 (f_d)	표적의 도플러 주파수
수신 전력(P_r)	표적의 수신 전력

위 파라미터를 이용한 표적 시나리오의 기본 설계 개념도를 Fig. 6에 도시하였다. 이를 바탕으로 표적 시나리오와 관련된 주요 관계식을 식 (13)에 정리하였다⁵⁾.

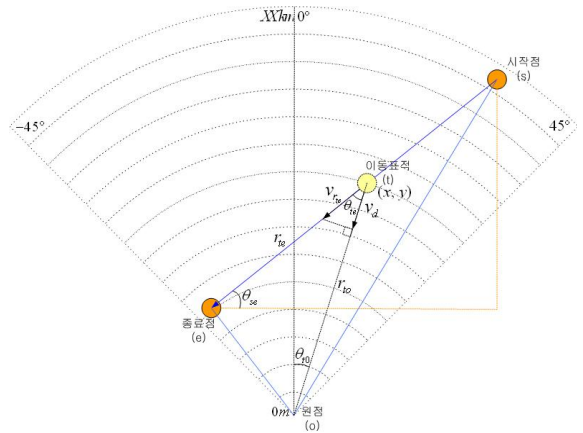


Fig. 6. 표적 시나리오 기본 설계 개념도

$$r_{te}(t) = r_{te}(t - \Delta t) - v_{te}(t) \cdot \Delta t \tag{13}$$

$$x(t) = r_{te}(t) \cdot \cos\theta_{se}(t) + x_c$$

$$y(t) = r_{te}(t) \cdot \sin\theta_{se}(t) + y_c$$

$$r_{to}(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$$

$$v_{r_{te}}(t) = v_{r_{te}}(t - \Delta t) + a_{r_{te}}(t) \cdot \Delta t$$

$$\theta_{te}(t) = \cos^{-1}\left(\frac{r_{te}(t)}{r_{to}(t)}\right)$$

$$v_d(t) = v_{r_{te}}(t) \cdot \cos\theta_{te}(t)$$

$$\theta_{to}(t) = \cos^{-1}\left(\frac{r_{to}(t)}{y(t)}\right)$$

$$f_d(t) = \frac{2v_d(t) \cdot f_c}{c}$$

f_c 는 반송 주파수, c 는 빛의 속도이다. 시간 t 에서 수신 신호의 전력 $P_r(t)$ 는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다⁶⁾. 본 논문에서는 송신기 측면에서 수신 신호를 생성하기 때문에 누적 히트수, 잡음 지수, 볼츠만 상수, 표준 온도, 수신기 대역폭 등의 요소는 식 (14)에

서 제외시켰다.

$$P_r(t) = \frac{P_t \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot G_t \cdot G_r(t)}{(4\pi)^3 \cdot r_{to}^4(t)} \quad (14)$$

P_t 는 송신 전력, σ 는 RCS, λ 는 파장, G_t 는 송신 안테나 이득이며 $G_r(t)$ 는 시간 t 에서의 수신 안테나 이득이다. 펄스 레이더의 좌우 수신 안테나 이득을 Fig. 7에 나타내었다.

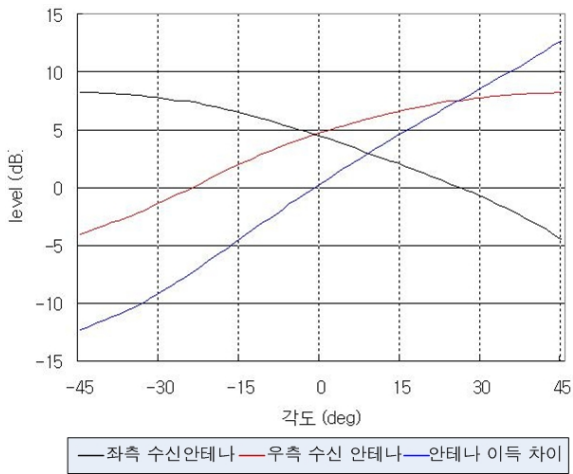


Fig. 7. 각도별 좌우 수신 안테나 이득

마. 표적 및 클러스터 신호 합성

생성된 표적과 클러스터 신호는 Fig. 1의 신호처리부에서 고주파부로 4채널의 IF 신호로 전송되고 고주파부에서는 이 신호를 Fig. 8과 같이 RF 신호로 변환하고 2채널의 신호로 합성함으로써 펄스 레이더의 수신 신호는 생성된다.

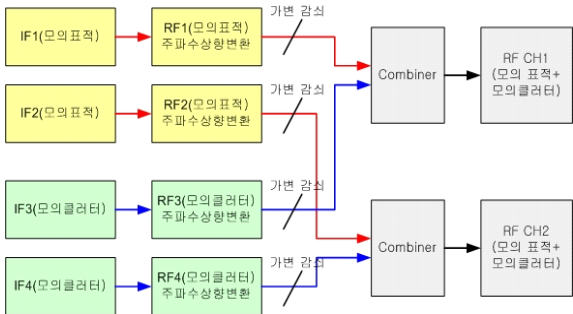


Fig. 8. 표적 및 클러스터 신호 합성

4. 수신 신호 생성 결과

이러한 설계를 바탕으로 Fig. 9의 본 논문에서 구현한 S/W의 GUI를 이용하여 다수의 표적이 있는 상황을 모의하여 수신 신호를 생성하였다.

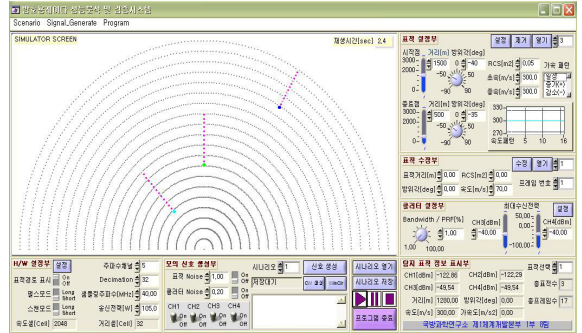


Fig. 9. 수신 신호 생성 GUI

가. 표적 신호 생성

모의한 다수의 표적 사양을 Table 4에 나타내었다. 이를 바탕으로 Fig. 10과 같이 노이즈를 삽입한 시간 영역의 신호를 생성하였다.

Table 4. 모의 표적 사양

	표적 1	표적 2	표적 3
시작 거리[m]	2000	3000	1500
종료 거리[m]	1000	2000	500
시작 방위각[deg]	0	30	-40
종료 방위각[deg]	0	30	-35
RCS[m ²]	0.05	0.05	0.05
초속[m/s]	300	250	300
종속[m/s]	300	200	300
프레임 수	17	22	17

Fig. 10의 신호에 대해 FFT를 수행하면 Fig. 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. 3개의 표적이 생성되었음을 알 수 있으며 각 표적 신호의 수신전력 차이와 거리, 속도 등을 구분할 수 있다.

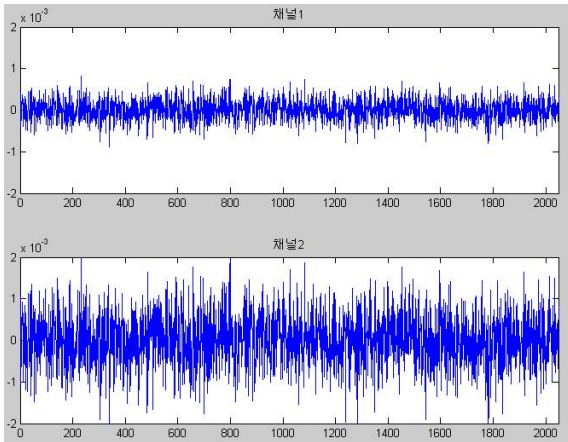


Fig. 10. 모의 표적 신호(시간 영역)

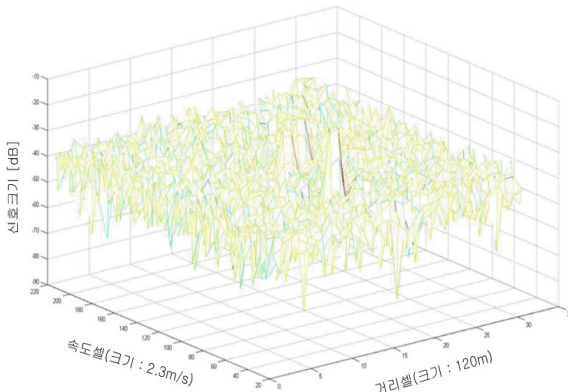


Fig. 11. 모의 표적 신호(주파수 영역)

나. 클러스터 신호 생성

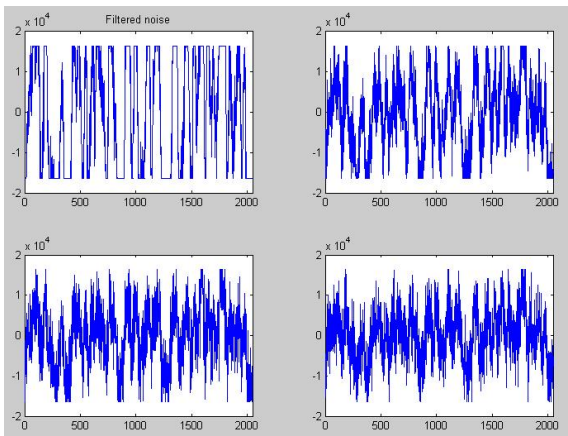


Fig. 12. 모의 클러스터 신호(시간 영역)

표적 신호가 특정 거리셀에 존재하는 것과 달리 클러스터 신호는 전 거리셀에 걸쳐 존재한다. 따라서 모의 클러스터 신호를 생성할 때는 전 거리셀에 대해 클러스터 신호를 생성해야 한다. Fig. 12에 노이즈를 삽입한 시간 영역의 모의 클러스터 신호를 나타내었다.

위 그림은 4개의 구역으로 나뉘어 있는데 이는 Fig. 4의 M개의 거리셀(펄스구간) 중 1, 9, 17, 25번 셀을 선택하여 속도셀(펄스수)을 축으로 도시한 결과이다. 위 그림에서 1번 거리셀(좌측 상단)의 경우 수신 전력이 매우 크게 나타나서 본 논문에서 정한 한계값에 의해 잘려지고 거리가 멀어질수록 신호의 크기가 작아지고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 13에 FFT 결과를 도시하였다.

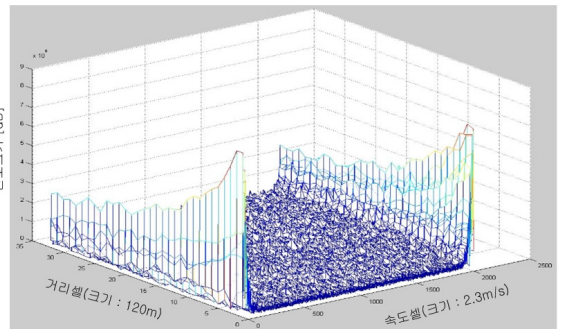


Fig. 13. 모의 클러스터 신호(주파수 영역)

다. 펄스 레이더 수신 신호

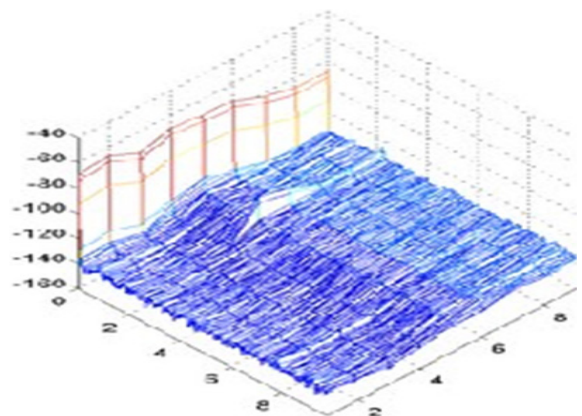


Fig. 14. 실제 수신 신호(주파수 영역)

Fig. 14에 펄스 레이더에서 수신한 신호를 FFT한 결과를 나타내었다. 펄스 레이더는 접근하는 표적만을

탐지하기 때문에 수신한 클러터 신호가 Fig. 13과는 달리 한쪽 DC 레벨에만 나타난다. 그림으로부터 Fig. 11, 13의 모의 표적과 클러터를 합성할 경우 Fig. 14와 비슷한 형태의 신호가 됨을 유추할 수 있으며, 따라서 생성한 수신 신호는 효용성이 있다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 펄스 레이더의 성능을 분석하고 검증하기 위한 모의 수신 신호 생성 기법을 제안하였다. 펄스 레이더와 연동되어 모의 수신 신호를 입력하기 위해 설계한 시뮬레이터의 신호처리부와 고주파부를 설명하였으며 신호처리부에서 이루어지는 수신 신호 생성과정을 설명하였다.

신호처리부에서는 표적 데이터와 클러터 데이터를 모델링하고 실제 전기 신호로 변환시키는데 표적 데이터의 경우 실제 펄스 레이더가 수신하는 신호형식을 바탕으로 거리셀, 속도셀, 신호크기를 모델링하고 정현파로 변환시키는 기법을 설명하였다. 클러터 데이터의 경우 신호크기와 데이터 분포를 설정하는 방법을 설명하고 FFT, LPF, IFFT를 이용한 신호생성과정을 설명하였다.

그리고 사용자가 원하는 시나리오에 따라 표적 데이터의 값을 어떻게 제어하는지를 설명하였으며 표적 데이터와 클러터 데이터의 합성기법을 설명하였다.

이와 같은 과정을 통해 생성한 표적과 클러터 신호를 시간 영역과 주파수 영역에 따라 제시하였으며 실제 펄스 레이더에서 수신한 신호와 비교하였다. 실제 수신 신호와 생성한 모의 신호가 비슷한 결과를 보이므로 실제 야외 시험을 대체하기 위해 제안하는 본 기법은 상당한 효용성을 가진다고 할 수 있다.

Reference

- [1] 박규철, 하중수, 이종민, “방호용 레이더 기본시제 시스템 설계”, 국방과학연구소, GSDC-517-060620, 2006.
- [2] 하중수, 박규철, 이정수, “방호용 레이더 모의 신호 생성 프로그램 설계”, 국방과학연구소, GSDC-417-060935, 2006.
- [3] 하중수, 박규철, 이정수, “흑표 방호용 레이더의 소프트웨어 설계”, 국방과학연구소, ADDR-517-071282, 2007.
- [4] 박규철, 하중수, “방호용 레이더 클러터 측정결과 및 분석”, 국방과학연구소, ADDR-517-090247, 2009.
- [5] Kwak J. H. and Hong S. P., Linear Algebra, Birkhauser 1997.
- [6] Skolnik M. I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Book Company, 3rd edition 2001.