

불요신호 특성이 우수한 다기능레이더 신호처리기 개발

The Development of the Multi-function Radar Signal Processor Having the High Spurious Free Dynamic Range

이희영*

Hee-Young Lee

Abstract

The multi-function radar can detect and track the low RCS targets. For this purpose the multi-function radar uses the pulse train waveform. because this waveform has high dynamic range and good SNR(Signal to Noise Ratio). But the spurious signals can also be detected by processing the pulse train waveform. Thus the multi-function radar signal processor must have the high SFDR(Spurious Free Dynamic Range). This paper describes the development of the multi-function radar signal processor having the high SFDR.

Keywords : Multi-Function Radar(다기능레이더), Signal Processor(신호처리기), Pulse Train Waveform(펄스열파형), Dynamic Range(동적영역), SFDR(Spurious Free Dynamic Range : 불요신호가 없는 동적영역)

1. 서론

다기능레이더는 탐지거리내의 다수 표적을 탐지 및 추적, 유도탄을 포착 및 추적하는 기능을 가진 레이더이다. 이 레이더는 탐색, 추적, 유도탄응답신호 처리의 다양한 기능을 가지고 있어서 다기능레이더라 불리며 송신기, 수신기, 신호처리기, 통제기 로 구성된다. 송신기에서 송신한 파형은 목표물에서 반사 되며, 레이더는 이 반사 신호를 수신기에서 수신하여 통제기의 명령에 따라서 신호처리기가 신호처리를 수행한다.

다기능레이더에서 사용되는 파형에는 선형주파수변조파형(LFM : Linear Frequency Modulation), 펄스코드

변조파형(PCM : Pulse Code Modulation), 펄스열파형(PT : Pulse Train)이 있으며, 이 가운데 펄스열파형은 다기능레이더의 주요파형으로 높은 동적영역(Dynamic Range) 및 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio)를 가지고 있어서 작은 레이더 반사 단면적(RCS : Radar Cross Section)을 갖는 목표물도 탐지 및 추적을 할 수 있다^[1].

다기능 레이더는 다른 레이더들에 비해 큰 동적영역을 갖고 있으며 펄스열파형의 높은 동적영역과 신호처리 이득으로 인해 원거리의 목표물뿐만이 아니라 작은 레이더 반사 단면적을 갖는 표적도 탐지를 할 수 있으며 탐지 및 추적에 모두 사용된다. 펄스열파형 신호처리를 통해 다기능레이더는 목표물의 속도를 알 수 있으며, 추가적인 펄스 반복주파수 혼들(PRF Staggering) 프로세싱을 통해 거리정보도 알 수 있다.

펄스열파형 신호처리의 결과는 목표물 도플러주파수에서의 스펙트럼이다. 더욱이 펄스열파형은 큰 처리

† 2009년 9월 22일 접수~2009년 12월 18일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이희영(hyl@add.re.kr)

이득 및 높은 동적영역 특성을 가지고 있기 때문에 목표물로부터의 반사신호가 아닌 원하지 않는 작은 불요신호(Spurious Signal)도 탐지할 수 있다^[2~3].

최근에 개발되고 있는 신호처리기는 전력소비 감소와 경량화를 위해 장비의 집적도를 높여가는 추세이다. 이에 따라 다기능레이더 신호처리기에서는 기존에 분리되어 개발되고 있는 A/D 변환모듈과 디지털 필터 모듈을 단일 보드로 통합하여 개발하였다. 개발 초기에 보드 통합으로 인해 불요신호가 펄스열파형 신호처리 결과에 다수 발생하였으며, 신호처리기 펄스열파형의 불요신호가 없는 동적영역(SFDR) 값을 한 번에 만족시킬 수 없었다. 본 논문은 저피탐 표적을 탐지하기 위해 불요신호 특성이 우수한 다기능레이더 신호처리기 개발에 대해서 기술하였다.

2. 동적영역(DR) 및 불요신호가 없는 동적영역(SFDR)의 정의

동적영역(DR : Dynamic Range)^[4~5]의 정의는 주파수 대역폭 내에서 시스템이 선형적으로 처리할 수 있는 최소 입력신호의 크기와 최대 입력신호의 크기의 비를 나타낸다. 최소 신호의 값은 출력신호의 평균잡음의 크기와 같고, 최대 신호의 값은 입력신호의 증가분 대비 출력신호의 크기 증가분이 1dB 감소된 경우의 출력신호의 크기이다.

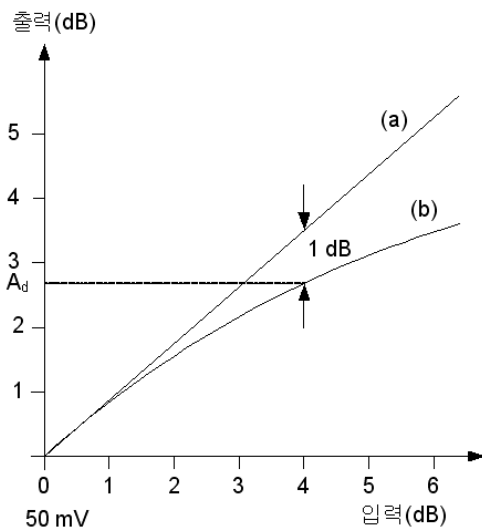


Fig. 1. 동적영역의 정의

Fig. 1은 최대 동적영역의 정의를 보여준다. (a)는 이상적인 입출력 결과를 보여주며, (b)는 측정된 값을 보여준다. 이상적인 값과 측정값이 1dB가 차이가 나는 지점에서의 출력값 A_d 를 측정하여 최대 동적영역을 계산한다.

$$DR(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{A_d}{N}\right) \quad (1)$$

여기에서 A_d 는 1dB 신호 크기 감소가 생긴 지점에서의 출력 값이고, N 은 출력의 평균잡음값이다.

펄스열파형의 신호처리 결과에서 동적영역 개념과 함께 중요한 개념이 불요신호가 없는 동적영역(SFDR : Spurious Free Dynamic Range)^[4~5]이다. 불요신호가 없는 동적영역의 정의는 문자의 의미 그대로 불요신호가 없을 때의 동적영역으로서 주파수 대역폭 내에서 시스템이 선형적으로 처리할 수 있는 최대 입력신호의 크기와 평균잡음의 크기보다 큰 불요신호 중 가장 큰 불요신호의 비를 나타낸다.

$$SFDR(dBc) = 20\log_{10}\left(\frac{A_d}{A_s}\right) \quad (2)$$

A_d 는 1dB 신호 크기 감소가 생긴 지점에서의 출력 값이고, A_s 는 평균잡음의 크기보다 큰 불요신호 중 가장 큰 불요신호의 크기이다.

이러한 동적영역과 불요신호가 없는 동적영역을 펄스열파형 신호처리 관점에서 살펴보면 Fig. 2와 같다. 펄스열파형 신호처리의 결과가 스펙트럼이기 때문에 Fig. 2의 가로축은 도플러 주파수(f_d) 세로축은 해당 도플러 주파수에서의 신호의 크기이다.

신호와 잡음 그리고 원하지 않는 불요신호가 함께 펄스열파형 신호처리과정에서 처리되었다면 그 결과는 다음과 같다. 신호는 일정오경보율(CFAR)의 문턱값보다 크기 때문에 탐지가 되며 또한 불요신호도 일정오경보율의 문턱값보다 크기 때문에 탐지가 된다. 이러한 이유로 펄스열파형 신호처리에서 동적영역과 함께 불요신호가 없는 동적영역이 중요하다. 다기능레이더 펄스열파형 동적영역은 85dB 이상이어야 하며, 불요신호가 없는 동적영역은 다기능레이더 오경보확률(P_{fa})을 감안할 때 수정된 셀 평균 오경보율(MCA CFAR : Modified Cell Average Constant False Alarm Rate)의 문턱값이 평균잡음값 N 보다 15dB이상 큰 값

이기 때문에 이 값을 고려한 80dBc 이상으로 정하고 있다.

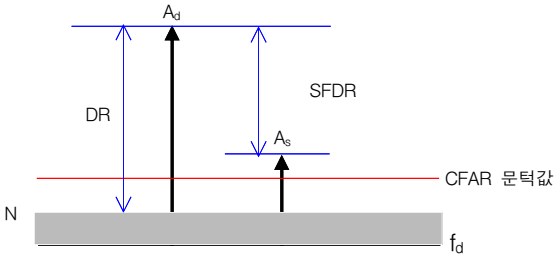
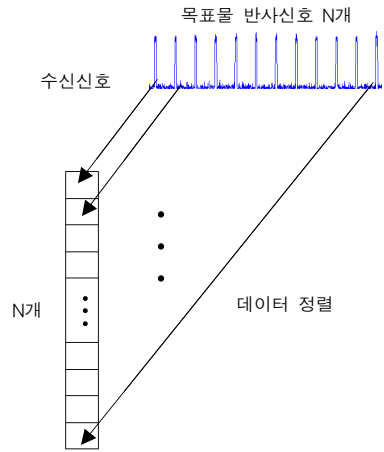


Fig. 2. DR and SFDR



3. 다기능레이더 펄스열파형 신호처리의 개념

펄스열파형은 단순 펄스(Pulse)의 집합체로서 Fig. 3에서 파형의 모양을 확인을 할 수 있다. 이 파형은 Fig. 4에서처럼 다기능레이더에서 송신하며, 다기능레이더는 목표물로부터의 반사신호를 수신한다.

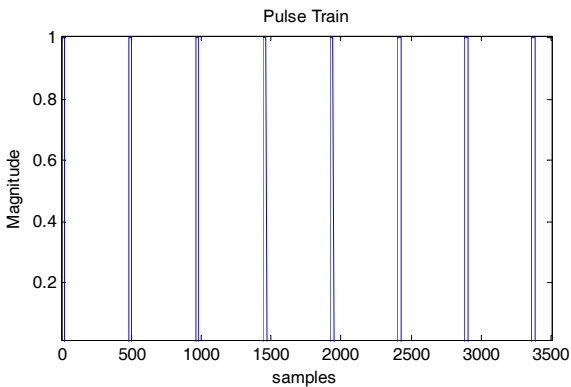


Fig. 3. 펄스열파형의 예

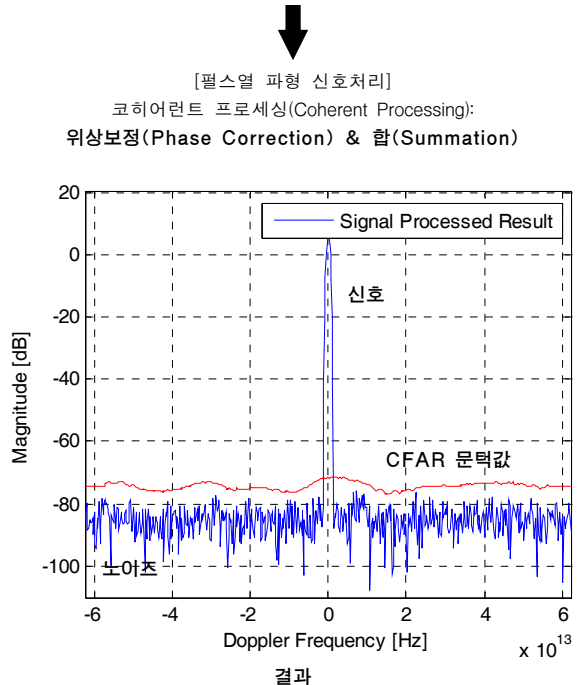


Fig. 5. 펄스열파형의 신호처리 결과

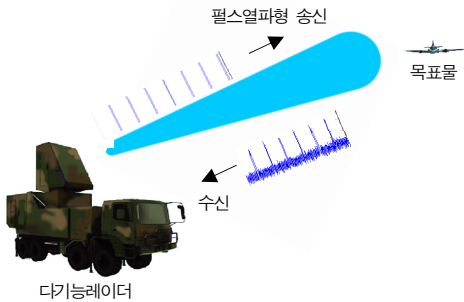


Fig. 4. 펄스열파형의 송수신

펄스열파형은 코히어런트 프로세싱(Coherent Processing)을 위한 파형으로 Fig. 5에서처럼 목표물로부터 반사된 신호들의 위상을 보정하여 합하는 방식으로 신호처리를 수행한다. 이러한 위상보정(Phase Correction)과 합(Summation)은 목표물 반사신호의 크기를 노이즈의 크기보다 크게하여 신호처리 최종출력단에서의 신호대 잡음비를 증가시켜 목표물의 탐지를 원활하게 한다. 펄스열파형 신호처리를 통해 목표물이 탐지되면 탐지된 목표물의 속도를 알 수 있다. 목표물의 속도는 도

플러 주파수를 통해 알 수 있는데, 이 값은 위상을 보정할 때 사용한 주파수와 같은 값이다.

펄스열파형 신호처리를 보다 더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 펄스열파형을 신호처리하기에 앞서 같은 거리게이트(Range Gate) 데이터를 각각 뽑아서 Fig. 5와 같이 재정렬한다. 이후 재정렬된 데이터의 위상을 보정하며, 합을 수행한다. 예를 들어 재정렬된 데이터를 $x[n]$ 이라고 하면, 위상보정은 $e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$ 을 곱해서 이루어진다. 여기에서 N 은 전체 샘플의 개수이며 k 는 주파수 샘플의 인덱스, n 은 시간 샘플의 인덱스이다. 이것을 수식으로 표현하면 (3)과 같다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (3)$$

k : 주파수 샘플의 인덱스

n : 시간 샘플의 인덱스

N : 재정렬된 데이터 샘플 개수

$x[n]$: 재정렬 데이터

$X[k]$: 펄스열 파형 신호처리 결과

$\cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$: 위상 보정

$\sum_{k=0}^{N-1}$: 합

위의 수식은 이산푸리에변환(DFT : Discrete Fourier Transform)과 같은 수식임을 알 수 있다. 그래서 펄스열 파형의 신호처리는 이산푸리에변환을 사용하는데 실제로는 이산푸리에변환을 빠르게 처리하기 위한 알고리즘인 고속푸리에변환(FFT : Fast Fourier Transform)을 사용한다. 이러한 신호처리방법을 도플러 필터링(Doppler Filtering)이라고 한다. 여기에서 신호처리 결과인 $X[k]$ 의 k 인덱스 각각의 샘플들을 도플러 필터뱅크(Doppler Filter Bank)라고 부른다.

신호처리 전 신호의 크기 = A

신호처리 전 신호의 전력 = A^2

신호처리 전 노이즈의 전력 = σ^2

신호처리 전 신호대잡음비

$$SNR_1 = \frac{A^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

신호처리 후 신호의 크기 = NA

신호처리 후 신호의 전력 = $(NA)^2$

신호처리 후 노이즈의 전력 = $N\sigma^2$

신호처리 후 신호대잡음비

$$SNR_N = \frac{N^2 A^2}{N\sigma^2} = N \cdot SNR_1 \quad (5)$$

위의 방법으로 재정렬된 데이터를 처리하면, Fig. 5의 결과 그림이 출력되며 신호대잡음비는 수식 (4), (5)에서 알 수 있듯이 N 배($10\log_{10}N$ [dB]) 증가^[6]한다. 이 결과와 일정오경보율 문턱값과의 비교를 통해 목표물을 탐지하며 탐지된 위치의 도플러 필터의 도플러주파수를 통해 목표물의 속도를 알 수 있다.

펄스열파형의 신호처리를 통해 신호대잡음비가 도플러 주파수영역에서 N 배 증가하기 때문에 작은 크기의 원하지 않는 불요신호도 신호처리를 통해서 목표물로 탐지 될 수 있다. 이러한 이유로 신호처리기에서는 원하지 않는 불요신호가 발생되지 않아야한다. 그래서 이것과 관련이 있는 불요신호가 없는 동적영역이 펄스열파형 신호처리에서 중요한 것이다.

4. 다기능레이더 신호처리기의 불요신호가 없는 동적영역(SFDR) 구현 및 시험결과

다기능레이더 신호처리기 펄스열파형 동적영역은 수식 (6)에서처럼 아날로그 디지털 변환기(ADC : Analog to Digital Converter)의 동적영역, 이득(신호처리기 아날로그 이득 및 펄스열파형의 신호처리 이득) 그리고 손실을 통해 85dB이상^[1]으로 정하고 있다.

$$DR_{Pulse Train} = DR_{ADC} + Gain_{RSP(PT)} + Loss_{RSP(PT)} \quad (6)$$

$$= 60.28 + 28.90 - 4.00$$

$$= 85.18 \text{ [dB]}$$

이러한 값을 갖는 신호처리기를 제작하기위해 여러 모듈을 설계 및 제작하였으며, 구성 모듈은 Fig. 6과 같다.

첫 번째 모듈인 이득변환 모듈은 수신신호를 선택하여 신호의 이득조절 및 잡음의 자동이득 제어를 수

행하며, 아날로그 신호를 디지털로 변환하여 기저대역으로 하향변환하는 기능을 한다. 신호발생 및 분배 모듈은 기준주파수 신호를 생성하여 분배하는 기능을 하며, 프로세싱 모듈은 신호처리 알고리즘에 따라서 수신신호의 신호를 처리한다. 호스트 모듈은 레이더 통제기의 명령에 따라 신호처리기의 모든 모듈을 관리하며, 동기 및 시험 모듈은 동기신호를 분배하고 각 모듈별 고장테스트 신호를 종합하여 분석하는 기능을 수행한다. 출력제어 모듈은 신호처리기 결과를 통계기로 전송하며, 수동제어지시기 모듈은 수신신호의 점검 및 신호처리기의 상태를 표시하는 기능을 수행한다. 신호모사모듈은 신호처리기 디지털부의 시험을 위한 모의 신호를 발생시키고 통합기판 모듈은 모든 모듈을 하나로 연결해주는 기능을 하며, 나머지 모듈은 전원을 생성 및 분배해준다. 이러한 모듈로 구성되는 신호처리기의 형상은 Fig. 7과 같다.



Fig. 7. 신호처리기의 형상

신호처리기

- 이득변환 모듈
- 신호발생 및 분배 모듈
- 프로세싱 모듈
- 호스트 모듈
- 동기 및 시험 모듈
- 출력제어 모듈
- 수동제어지시기 모듈
- 신호모사 모듈
- 통합기판 모듈
- 전원공급 모듈
- 교류/직류 변환 모듈
- 직류/직류 변환 모듈

Fig. 6. 신호처리기 하드웨어 구성

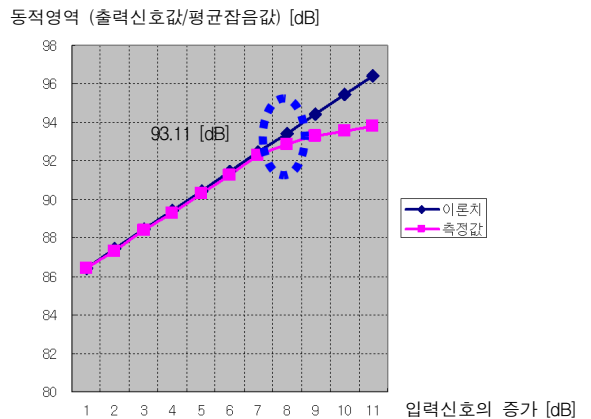


Fig. 8. 펄스열파형 동적영역 측정 결과

신호처리기의 펄스열파형 동적영역은 동적영역의 정외에 의해 Fig. 8과 같이 입력신호의 변화에 의한 신호처리기 출력신호의 변화를 비교하여 측정하였다. 펄스열파형 동적영역은 한 번의 제작만으로 85dB 이상의 값을 만족하였으며, 차 후 이득변환 모듈의 설계변경 후에도 Table 1에서처럼 85dB 이상의 값을 만족하였다.

Table 1. 다기능레이더 펄스열파형 동적영역(DR)

파 형	동적영역
펄스열파형	93.11 dB

하지만 펄스열파형 신호처리 결과를 통해 문제가 있음을 확인할 수 있었다. 신호처리 결과에서는 Fig. 9에서처럼 원하지 않는 불요신호가 나타났으며, 불요신호가 Fig. 9의 일정오경보율 문턱값보다 커서 목표물로 탐지되었다. 여러 번의 시험을 통해 불요신호의 발생원인이 신호처리기의 첫 번째 모듈인 이득변환 모듈에 있음을 알아냈고, Fig. 10과 같이 많은 불요신호가 이득변환모듈에서 만들어지고 있음을 확인하였다.

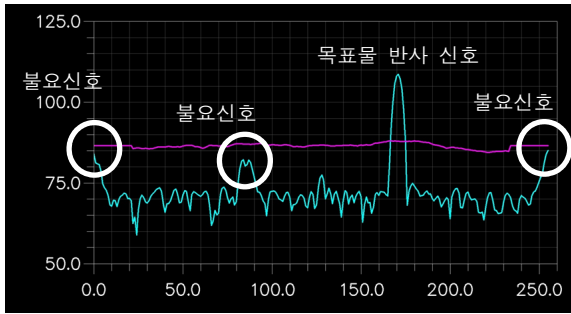


Fig. 9. 신호처리 출력의 불요신호

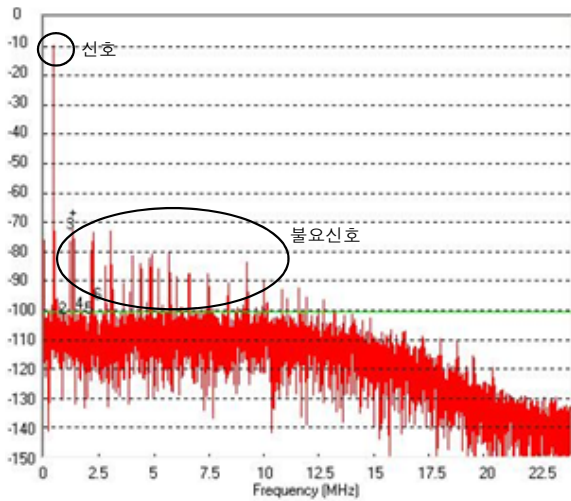


Fig. 10. 이득변환모듈의 불요신호

불요신호가 없는 동적영역의 측정값이 72dBc이었으며, 이 값은 80dBc 이상에 못 미치는 값이었다. 이처럼 불요신호가 많이 발생한 원인을 분석한 결과 이득변환모듈의 아날로그부와 디지털부를 Fig. 11에서와 같이 통합한 것이 원인임을 확인하였다.

Table 2. 신호의 주입 위치에 따른 SFDR

신호 입력	SFDR [dBc]
VHF 입력단	72.00
RF Switch 입력단	73.01
RF Switch 출력단	85.99
AGC 입력단	84.05
NAGC 입력단	85.00

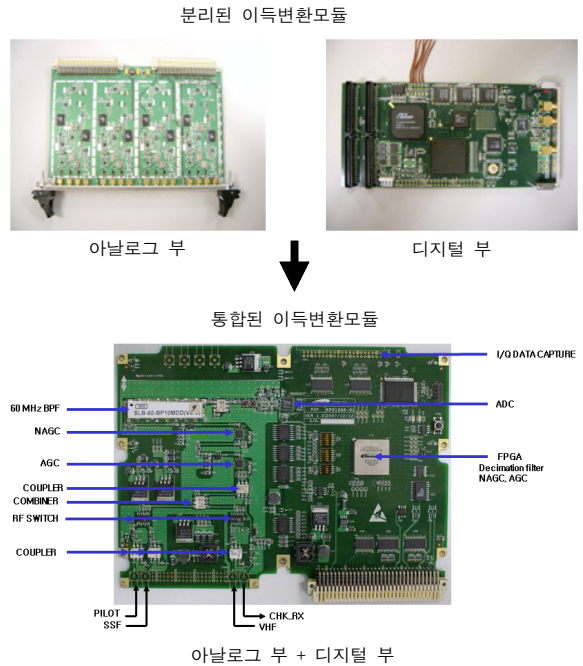


Fig. 11. 이득변환 모듈 아날로그 부와 디지털 부의 통합

이러한 불요신호의 발생 원인을 분석하기 위해 Fig. 11과 Table 2에서와 같이 아날로그 부의 여러 위치에 신호를 입력하여 테스트를 하였다. RF Switch 출력단으로 신호를 주입했을 때 불요신호가 없는 동적영역의 값이 85.99dBc로 80dBc 이상을 만족했고 RF Switch의 앞단에 문제가 있음을 확인하였다. 하지만 테스트 결과 불요신호는 제거되지 않았고 불요신호의 발생원인을 찾지 못했다. 이러한 이유로 이득변환 모듈의 아날로그 부와 디지털 부를 분리하여 2장의 보드로 재설계를 하려던 중 이득변환 모듈의 접지판(Ground Plane)에 문제가 있음을 확인하였다. 아날로그 접지판과 디지털 접지판이 간섭을 일으키며 접지판의 면적이 작기 때문에 Fig. 12의 (a)에서처럼 불요 신호가 발생한 것이다. 이것을 해결하기 위해서는 Fig. 12의 (b)에서처럼 아날로그 접지판과 디지털 접지판을 분리하고 접지판의 면적을 확장해야 한다. 그래서 이득변환 모듈의 아날로그 접지판과 디지털 접지판을 분리하였고 접지판을 넓히는 설계변경을 하였다.

이득변환 모듈의 설계변경을 통해 불요신호가 없는 동적영역 값이 Fig. 13과 Table 3에서처럼 83.2dBc임을 확인하였으며 불요신호가 없는 동적영역의 값을 80dBc 이상의 값으로 만족시킬 수 있었다.

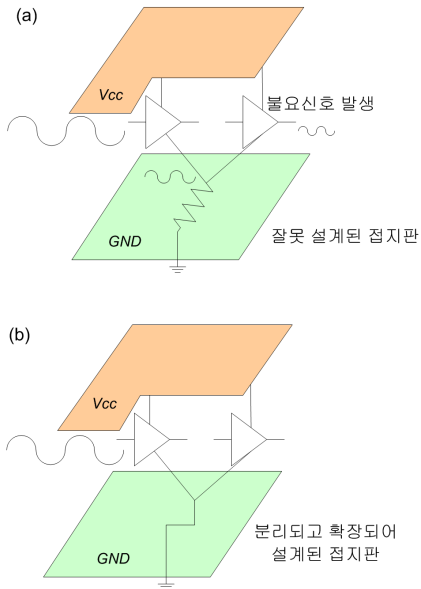


Fig. 12. 접지판에 기인한 불요신호 발생

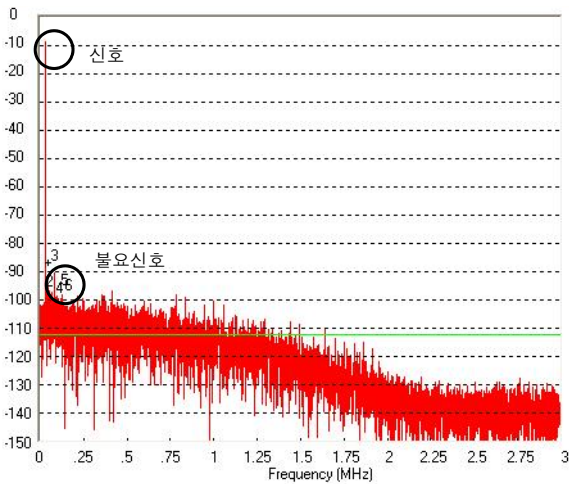


Fig. 13. 설계변경 후 이득변환 모듈의 불요신호

Table 3. 다기능레이더 펄스열파형의 불요신호가 없는 동적영역(SFDR)

파 형	불요신호가 없는 동적영역
펄스열파형	83.2dBc

5. 결론

본 논문은 불요신호가 없는 동적영역(SFDR) 특성이 우수한 다기능레이더 신호처리기 개발에 대해서 기술하였다. 높은 불요신호가 없는 동적영역은 원거리 표적 및 낮은 레이더 반사 단면적을 갖는 표적 탐지 성능에 매우 중요한 요소가 된다. 개발된 신호처리기의 불요신호가 없는 동적영역은 83dBc 이상으로, 기존의 탐색레이더에 비해 약 20dBc 이상 높은 수준이다. 또한 접지부 강화 및 최적보드 설계를 통해 A/D 변환모듈과 디지털 필터 모듈이 통합된 단일보드를 개발하였다. 개발된 다기능레이더 신호처리기는 저피탐 표적 탐지/추적에 효과적으로 이용될 것으로 판단된다.

Reference

- [1] 최병관, 노지은, 이회영, 철매-II 다기능레이더 신호처리기 요구규격서, 국방과학연구소, ADDR-517-081719, 2008.
- [2] Charles E. Cook, Marvin Bernfeld, Radar Signals, Artech House, pp. 306~309, 1993.
- [3] Nadav Levanon, Eli Mozeson, Radar Signals, John Wiley & Sons, pp. 67~71, 2004.
- [4] Merrill Skolnik, Radar Handbook 3rd Edition, Mc Graw Hill, 6.4~6.8, 2008.
- [5] 양진모, 염동진, 임정수, “다기능레이더 신호처리기 아날로그부 성능분석”, 국방과학연구소, TEDC-509-020408, 2002.
- [6] 홍동희, “능동배열 레이더의 동적영역 구현”, 국방과학연구소 기술문서, 2008.