

TSPE17910-075-12

극지 빙하구조 분석 레이더 국산화

Polar Glacier Structure Analysis Radar
Localization



(주)유텔

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 산·연 공동연구프로그램(PIP사업)”에 관한 연구 “극지 빙하구조 분석 레이더 국산화” 과제의 최종보고서(극지 빙하구조 분석 레이더 국산화 최종보고서)로 제출합니다.



연구기관명 : (주) 유텔

연구책임자 : 신 승 하

참여연구원 : 최 문 석

“ : 최 영 우

“ : 송 영 록 외 3명

요 약 문

I . 제 목

II . 연구개발의 목적 및 필요성

- 빙하구조 탐사 레이더 개발
- 레이더 신호수집 및 빙하구조 분석 소프트웨어 개발

III . 연구개발의 내용 및 범위

- 극지환경에서 운용이 가능한 빙하구조 분석 레이더 개발
- 레이더 개발을 위하여 FMCW 방식의 레이더 송수신기를 최적화하여 설계 및 제작하고 탐지거리 및 영역을 고려한 안테나를 설계 및 제작하여 레이더 시스템을 구현
- 상온 및 극지환경에서의 환경시험 및 빙하에서의 설치 운용시험을 통해 최적화된 레이더 시스템을 개발.

IV . 연구개발결과

- 빙하구조 탐사 레이더 개발
- 레이더 신호수집 및 빙하구조 분석 소프트웨어 개발
- 빙하구조분석레이더 시험장치를 통한 성능 검증 수행
- 극지에서 빙하구조 분석 수행

V . 연구개발결과의 활용계획

- 극지에서의 빙하구조 분석

목 차

제 1 장 서론	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	7
제1절 FMCW 레이더 시스템	7
제2절 FMCW를 이용한 시뮬레이션	13
제3절 FMICW 레이더 시스템	17
제4절 FMICW를 이용한 시뮬레이션	20
제5절 극지 빙하구조 분석 레이더 하드웨어 개발	28
1. 빙하구조분석레이더 PBS(Product breakdown structure)	28
2. 빙하구조분석레이더 하드웨어 구성	29
제5절 빙하구조분석레이더 시험장치설계 및 제작	56
1. 기계적 사양	56
2. 전기적 요구 사양	56
3. 빙하구조분석레이더 설계 및 제작	56
4. 빙하구조분석레이더 시험장치 전기적 성능 측정	60
5. 빙하구조분석레이더 시험장치 운용방법	62
6. 극지 현장 시험 및 결과	65
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	67
제1절 최종목표	67
1. 최종목표	67
2. 핵심 기술	68
3. 적용범위(또는 서비스)	68
4. 세부목표	68
5. 목표성능	69
제2절 평가의 착안점 및 기준	70
1. 연구개발성과 및 평가 방법	70
2. 정량적 목표	86
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	87
제1절 활용방안	87
제2절 연구종료후 성과창출 계획	87
제 6 장 참고문헌	88

제 1 장 서론

지구 온난화로 인한 기후의 변화는 심각한 환경 문제로 대두되고 있다. 온난화가 지속되면 빙하가 녹게 되고 해수면 상승과 각종 생태계 문제를 일으키게 되며, 빙하가 대기로 반사시키던 열을 지구가 흡수하게 되어 온난화 현상이 가속화 될 수도 있다.

빙붕(Ice shelf)은 빙상(ice sheet)인 남극대륙과 이어져 있는 바다 위에 떠있는 얼음 덩어리를 뜻한다. 바다에 떠있기는 하나, 남극대륙과 연결되어 있어 얼음이 계속 공급되기 때문에 전체적인 크기를 유지하는 것으로 알려져 있다. 빙붕은 남극 대륙으로 접근하는 따뜻한 물의 흐름을 막아 남극대륙을 유지하는 역할을 하며, 반대로 대륙의 빙하가 바다로 해양으로 유입되는 것을 막아 해수면의 상승을 억제하는 역할을 한다. 최근 이러한 빙붕의 두께가 얇아지거나 붕괴되는 모습이 여러 차례 관측되고 있는데 이는 지구 온난화 때문으로 해석된다. 따라서 이러한 빙붕의 두께 변화를 측정하여 해수면의 상승 등 미래 기후 변화를 예측하고자 하는 연구들이 진행되고 있다.

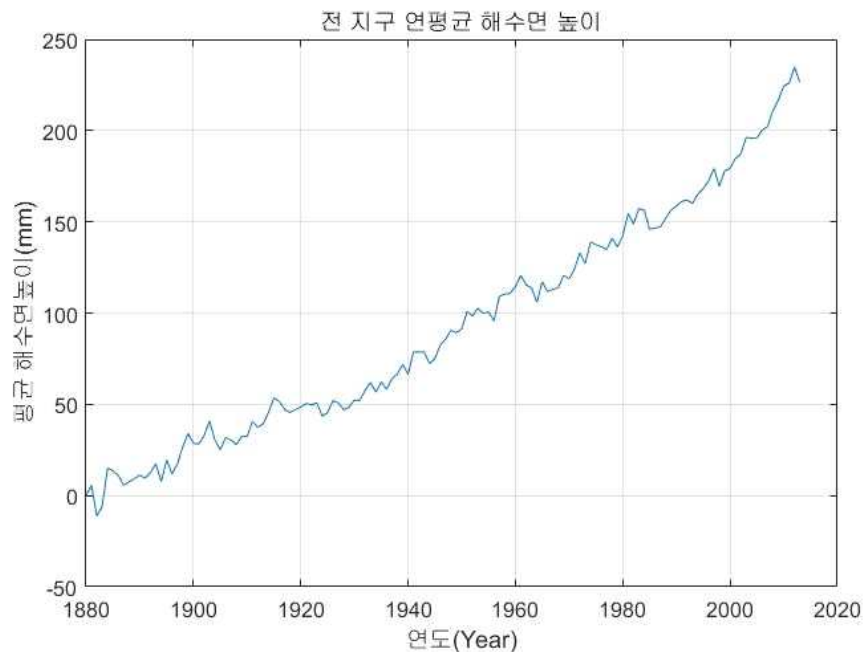


그림 1 전 지구의 연평균 해수면 높이

제 2 장 국내외 기술개발 현황

과거 영국에서 남극 빙붕의 두께 변화를 연간 변화를 밀리미터(mm/year)의 정밀도로 측정하기 위해 위상감지 얼음 투과 레이더, pRES(phase sensitive Radio-Echo Sounder)를 개발하였다. pRES 레이더는 얼음 바닥(Ice base) 또는 빙붕 내층에서 유전율의 갑작스러운 변화에 의해 변화되어 반사된 신호를 탐지하도록 되어있다. UHF 대역의 FMCW 방식의 파형을 사용하였으며, 남극 대륙의 조지6(George VI)빙붕과 로니(Ronne) 빙붕 위의 여러 위치에서 바닥층(basal layer)과 내부 층의 깊이를 측정하였다[2]. 그러나 과거 영국의 pRES는 범용 네트워크 분석기로 이루어져 상대적으로 장치의 부피가 크고, 수신기의 잡음지수가 매우 높으며, 장치의 전력 소비량도 매우 크다. 그 뿐만 아니라 극지방 저온에서의 장시간 작동에 한계를 가지고 있어 이를 보완하기 위한 시스템 개발이 수행되고 있다.

pRES에서 사용한 FMCW방식은 선형적으로 주파수가 변조된 연속파를 사용하고, 송신신호와 수신신호를 주파수 차이를 이용하여 표적의 거리를 측정한다. 이 방식은 하드웨어 및 신호처리를 함에 있어 다소 간단한 것에 비해 성능이 좋아서 고도계, 차량용 레이더 등에 많이 사용되고 있다. 레이더를 이용하여 빙붕의 두께를 측정하는 경우, 반사 신호는 주로 표면층에서와 바닥 층에서 발생하며, 반사되어 오는 수신 신호의 파워 차이로 인해 요구되는 수신기의 동적 범위가 매우 크다. 본 연구개발을 통해 매우 큰 동적범위에 대해 개선하는 방향으로 FMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave)를 혼용 사용가능한 하드웨어를 제작 하였고 이를 통해 개선되는 결과를 제시한다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 FMCW 레이다 시스템

일반적으로 FMCW 방식 레이다는 연속파형(Continuous Wave)에 대해 주파수 변조를 통해 거리를 측정하는 방식이다. FMCW 방식에서는 송신신호와 수신신호의 주파수 차이는 표적 속도에 의한 도플러 천이(Doppler Shift)값과 거리에 의한 주파수 차이의 합으로 나타나지만, 본 연구개발 과제의 목표인 빙붕 측정에서는 표적이 정지해 있으므로 두 신호의 차이는 거리에 의해서만 나타난다고 볼 수 있다. 그림2는 수신 신호에 도플러 주파수가 실려 오지 않는 정지해 있는 빙붕과 같은 표적에 대해 주파수가 시간에 따라 일정하게 증가하는 LFM의 기본원리를 쉽게 표현한 그림이다.

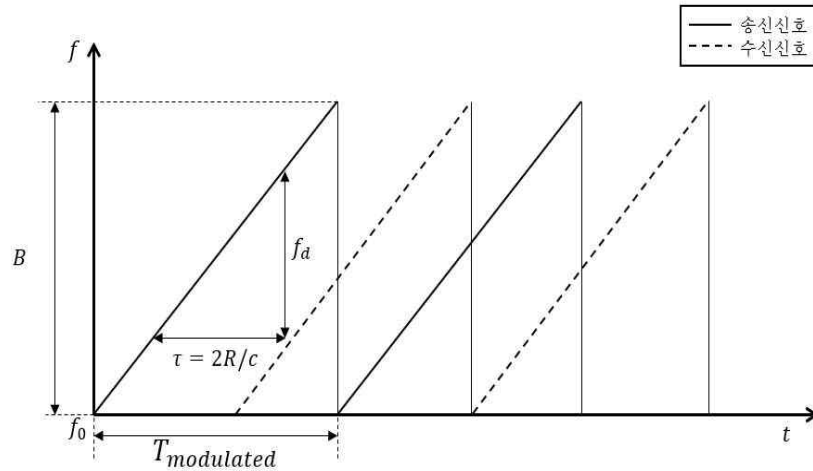


그림 2. LFM(Linear Frequency Modulation)의 기본 원리

FMCW 레이다에서 송신 주파수는 다음과 같은 식(2.1)로 표현할 수 있다.

$$\omega_t(t) = \omega_c + K\left(t - \frac{T}{2}\right), \quad 0 \leq t \leq T, \quad K = 2\pi \frac{B}{T} \quad \text{식 (2.1)}$$

여기서 ω_c 는 반송 각주파수(Carrier angular frequency), T는 송신 주기이고, B는 대역폭이다. K는 주파수 변조 속도 $K = 2\pi B/T$ (rad/s^2)로 표현된다. 주파수 $\omega_t(t)$ 로 얻어지는 송신 위상 $\phi_t(t)$ 는 다음과 같다.

$$\phi_t(t) = \int \omega_t(t) dt = \omega_c t + \frac{K}{2} \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 + \phi_0 \quad \text{식 (2.2)}$$

여기에 도플러 효과가 없는 정지해있는 표적에 대해 이상적으로 수신되는 신호는 송신신호에서 왕복 거리에 대한 지연시간 τ 가 더해진 위상 $\phi_r(t)$ 으로 표현된다. 수신되는 위상 $\phi_r(t)$ 은 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_r(t) = \phi_t(t - \tau) = \omega_c(t - \tau) + \frac{K}{2} \left(t - \tau - \frac{T}{2} \right)^2 + \phi_0 \quad \text{식 (2.3)}$$

기저대역의 수신 신호의 위상은 송수신 신호의 위상차이 $\phi_d(t)$ 로 나타나며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_d(t) = \phi_t(t) - \phi_r(t) = \omega_c \tau + K\tau \left(t - \frac{T}{2} \right) - \frac{K\tau^2}{2} \quad \text{식 (2.4)}$$

여기서 $\omega_c = 2\pi f_c$, $\tau = 2R\sqrt{\epsilon_r}/c$, c 는 광속, ϵ_r 은 얼음의 유전 상수이다. 얼음의 유전율은 $\epsilon_r = 3.1$ 로 표현할 수 있다. 위상을 $T/2$ 만큼 역으로 지연시키면 기저대역의 수신 신호의 위상은

$$\phi_d \left(t + \frac{T}{2} \right) = \omega_c \tau + K\tau t - \frac{K\tau^2}{2} \quad \text{식 (2.5)}$$

가된다. 일반적으로 FMCW방식에서 거리는 식(2.5)의 두 번째 항인 주파수($\Delta f = K\tau/2\pi$)로부터 아래와 같이 검출한다.

$$R_{coarse} = \Delta f \cdot \frac{T}{B} \cdot \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{식 (2.6)}$$

이렇게 주파수로부터 검출한 거리의 해상도는 대역폭(B)에 의해 결정된다. 그러나 빙봉의 두께 측정에 요구되는 mm급 정확도의 높은 거리 해상도를 얻기 위해서는 이론적으로 100GHz이상의 주파수 대역폭이 필요하다. 실제로 이러한 시스템을 구현하는 것은 불가능에 가깝기 때문에 식(2.5)의 세 번째 항인 위상($\frac{K\tau^2}{2}$)으로부터 검출하는 거리를 이용하여 추가 정밀도를 확보하여야 한다. 따라서 측정거리는 식(2.6)에서 계산된 R_{coarse} 와 위상에 의한 추가 정밀 거리

R_{fine} 을 더하여 아래와 같이 거리를 계산한다.

$$\begin{aligned} R &= R_{coarse} + R_{fine} \\ &= \tau \cdot \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} = (\tau_{coarse} + \tau_{fine}) \cdot \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \end{aligned} \quad \text{식 (2.7)}$$

기저대역의 수신 신호의 위상 식(2.5)에서 $t=0$ 일 때 구할 수 있는 초기 위상 ϕ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_d\left(\frac{T}{2}\right) = \omega_c \tau - \frac{K\tau^2}{2} \\ &= \omega_c(\tau_{coarse} + \tau_{fine}) - \frac{K(\tau_{coarse} + \tau_{fine})^2}{2} \\ &\simeq \omega_c(\tau_{coarse} + \tau_{fine}) - \frac{K(\tau_{coarse})^2}{2} \end{aligned} \quad \text{식 (2.8)}$$

이므로 측정된 위상으로 부터 정밀 거리 R_{fine} 은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{fine} &= \frac{c}{2\omega_c} \left[\phi - \omega_c \tau_{coarse} + \frac{K(\tau_{coarse})^2}{2} \right] \\ &= \frac{c}{2\omega_c} \Delta\phi = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi \end{aligned} \quad \text{식 (2.9)}$$

여기서 λ 는 파장이다. 즉, 정밀 거리 R_{fine} 에 의하여 파장보다 짧은 상세 거리를 구하고 식 (2.5)에서 주파수로부터 검출한 대략적인 거리 R_{coarse} 와 합하여 최종 거리를 측정한다. 이러한 방식으로 거리 측정치를 구하는 것을 Vernier-like process라고 한다. 신호 대 잡음비와 관련해서 rms(root mean square) 위상은 아래 식(2.10)과 같이 표현된다[3].

$$\Delta\phi_{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2SNR}} \quad \text{식 (2.10)}$$

이렇게 측정된 거리는 최적 방법에 의해 측정될 수 있는 rms 거리오차의 수학적 최솟값인 크래머-라오 한계치(Crammer-Rao bound)에 이르며, 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_{error, CR} = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{2SNR}} \quad \text{식 (2.11)}$$

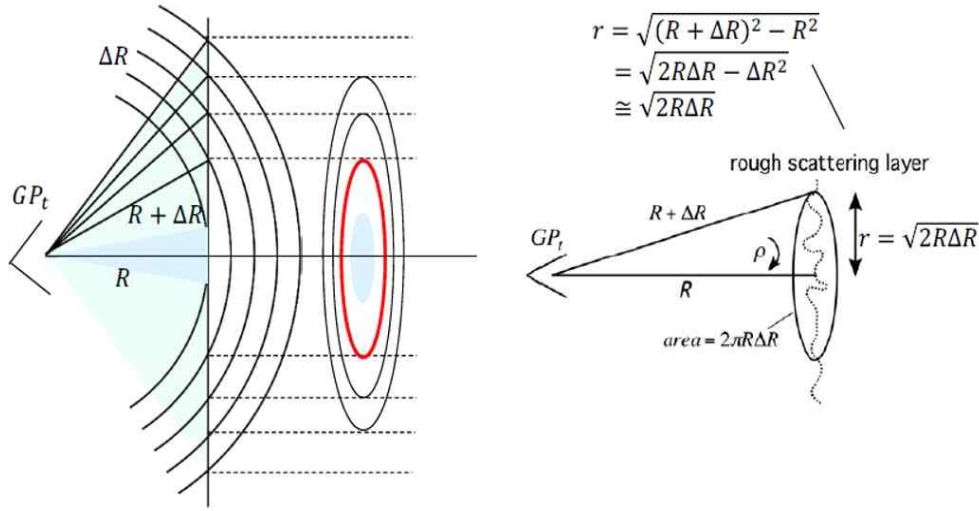


그림 3 . 표적의 RCS

이론적으로 빙봉에서 깊이의 차이는 표면과 바닥에서의 반사되는 진폭이 다르다는 원리를 이용하여 측정한다. 이상적인 조건으로 외부 신호나 반사되는 수신신호의 잡음이 들어오지 않는다면 빙봉에서의 표적, 즉 깊이는 특정 RCS를 가진 점표적의 형태를 나타내며 RCS는 안테나 이득과 거리의 함수로 나타낼 수 있다. 거리에 따른 표적의 반지름을 계산하고 원형의 RCS로 수신 범위를 계산하면 위 그림3 처럼 표현 할 수 있으며 아래 식(2.12)과 같이 표현할 수 있다[3].

$$r = \sqrt{(R + \Delta R)^2 - R^2} \cong \sqrt{2R\Delta R} \quad \text{식 (2.12)}$$

본 연구 과제의 시스템에서 표적의 거리를 임의로 100m로 두고 안테나의 빔폭 α를 계산해봤을 때 약 10.6° 정도의 각이 나오는데, 10.6° 각도 보다 빔폭이 커진다면 거리분해능의 제한으로 구현이 불가능하고, 10.6° 보다 빔폭이 작다면 빔 폭의 제한으로 시스템이 구현이 불가능하다. 이를 바탕으로 RCS 즉, 면적 A는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$A = 2\pi R\Delta R \quad \text{식 (2.13)}$$

송신을 기준으로 반구 형태로 송신거리(R)의 제곱에 반비례하는 송신 파워 P_{int} 는 식(2.14)과 같이 레이더 방정식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{int} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \pi r^2 = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \pi (2R\Delta R) = \frac{P_t G \Delta R}{2R} \quad \text{식 (2.14)}$$

표적을 맞고 돌아오게 되는 수신 파워는 거리에 따른 감쇠와 표적 RCS에 대한 정보가 포함된 신호가 돌아온다. 수신 파워 P_r 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} L \quad (L: Loss) \\ &= \frac{P_t G_t \rho (2\pi R \Delta R)}{(4\pi R^2)^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} L = \frac{P_t G_t G_r \rho L \lambda^2 \Delta R}{32\pi^2 R^3} \end{aligned} \quad \text{식 (2.15)}$$

식을 통해 수신 파워 P_r 은 R^3 에 반비례하며 ΔR 에 비례해서 커지는 것을 알 수 있다. $\Delta R = \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon_r}}$ 으로부터 수신파워는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_r = \frac{P_t G_r G_t \rho L \lambda^2}{32\pi^2 R^3} \cdot \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{식 (2.16)}$$

식(2.16)에서 L 은 경로에 따른 손실을 나타내며 거리에 따라 손실이 늘어나며, ρ 는 얼음에 서의 반사 계수이다. 표2의 조건으로 계산해본 거리에 따른 수신 파워는 그림4와 같다.

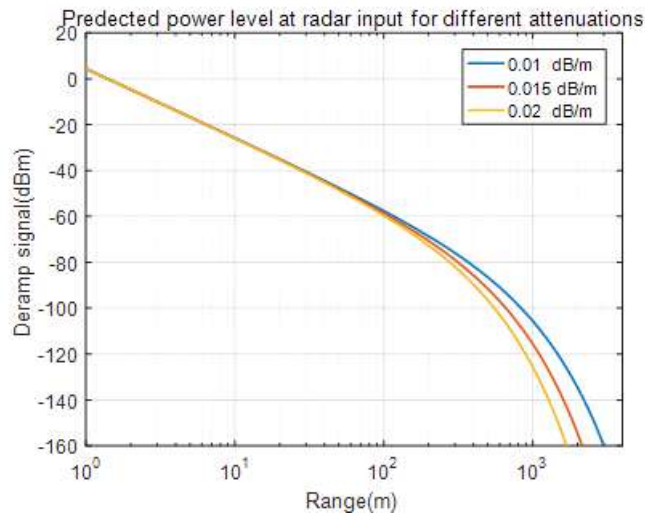


그림 4 표적 거리에 따른 수신 신호의 파워

위 수식들을 사용하여 대략적인 거리(R_{coarse})와 위상에 의한 정밀 거리(R_{fine})를 측정하는 위상 검출 FMCW 레이더의 신호처리 방식은 아래 그림5와 같이 도식화 하여 표현할 수 있다.

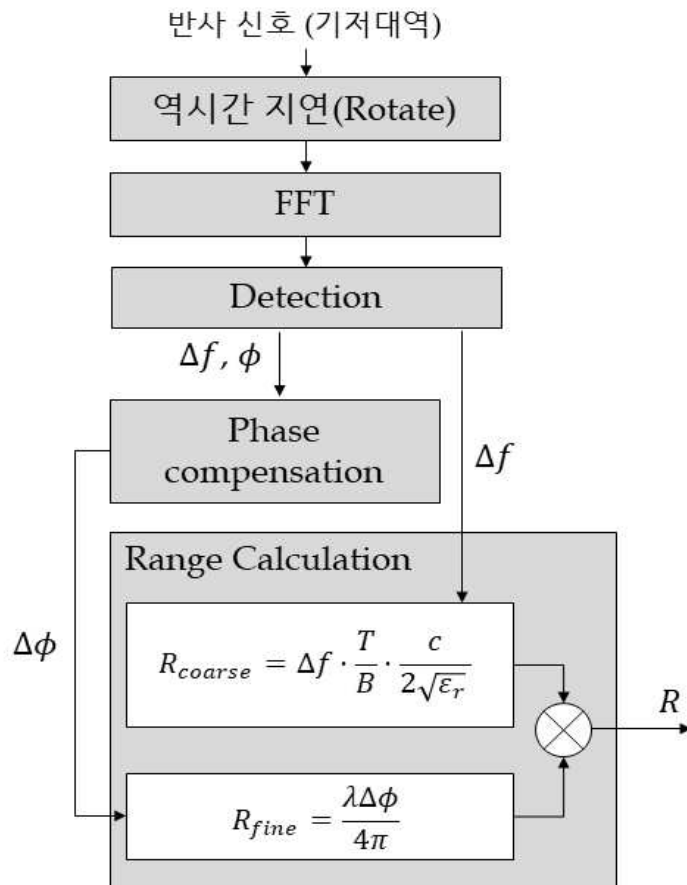


그림 5 위상 검출 FMCW 레이더의 신호처리

제2절 FMCW를 이용한 시뮬레이션

본 연구개발 FMCW 레이더 시스템 블록 다이어그램은 그림6과 같다. 파형 생성 후 Tx Gate를 통해 송신신호를 보낸 후 Rx Gate로 수신한다. 그다음 송신신호와 표적의 정보를 포함한 수신신호와 송신신호를 Mixing하여 정보를 추출해낼 수 있다.

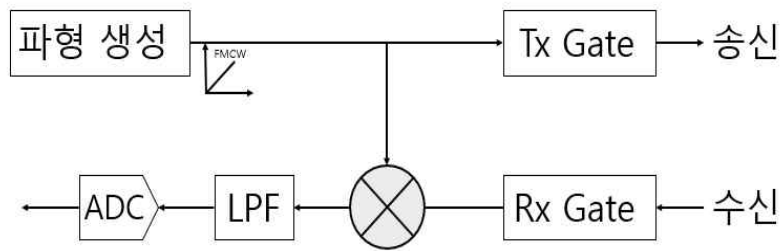


그림 6. FMCW 블록 다이어그램

신호처리 즉 Mixing 하는 과정은 앞서 그림5에서 나타내었다. 수신된 신호를 역시간 지연 (Rotate)과 함께 Zero-Padding이란 기법을 적용한다. Zero-Padding이란 시간 영역 (Time-Domain)에서 원 신호 뒤에 0으로 된 신호를 이어 붙여 신호의 길이를 늘이는 것이다. 위상 측정에 있어서 모호성(Ambiguity)을 없애며 FFT bin의 개수를 증가시킴에 따라 거리분해능을 쉬운 방법으로 늘릴 수 있기 때문에 Zero-Padding을 사용한다.

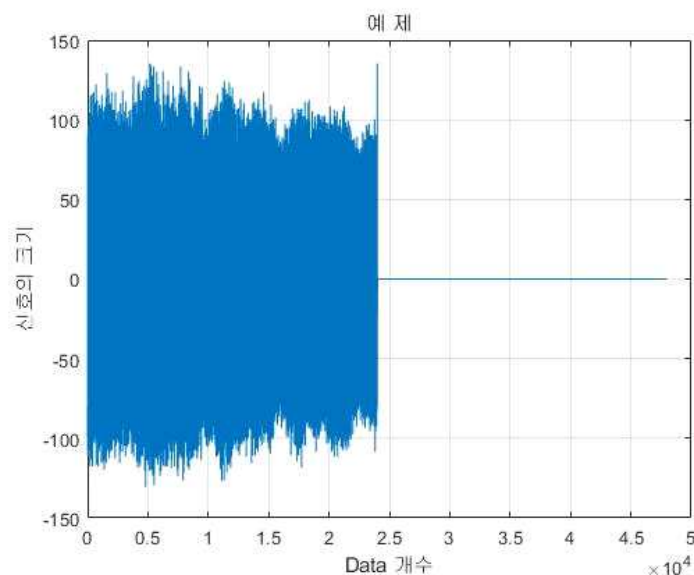


그림 7. Zero Padding 예제 신호

하지만 원 신호보다 과하게 Zero-Padding 한다면 오차가 발생할 수 있기 때문에 본 연구 과제의 신호처리에서는 원신호의 Data 개수, 즉 샘플 개수만큼 0인 신호를 더해 2배로 늘려 시뮬레이션을 시행했다. 그림7은 한 Raw Data에 대한 Zero-Padding을 진행한 신호이다. 그림7과 같이 Zero-Padding한 후 신호를 역으로 회전을 시켜준다. 식(2.5)와 같이 $T/2$ 의 위상이 초기 위상이 되도록 신호를 회전시켜준 뒤 FFT를 진행한다. Zero-Padding과 Rotate를 진행한 예제 신호는 아래 그림8과 같다.

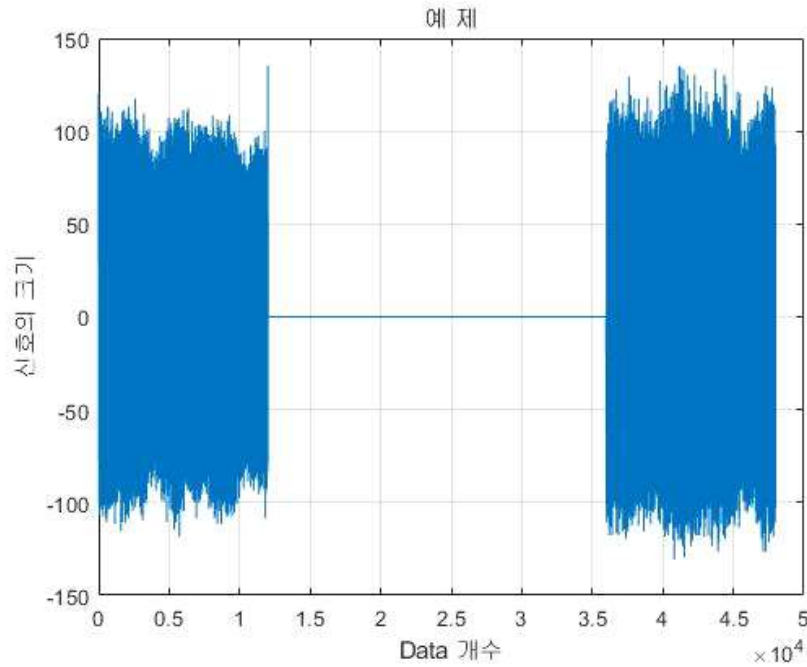


그림 8 . Rotate 예제 신호

먼저 시뮬레이션에 사용된 FMCW의 신호 대 잡음 비(SNR, Signal to Noise Ratio)는 식 (2.16)를 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 SNR &= \frac{P_r T}{k T_a F} \\
 &= \frac{P_t G_r G_t \rho L \lambda^2}{16\pi R^3} \cdot \frac{c}{2B \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{T}{k T_a F}
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

여기서, k 는 볼츠만 상수, T_a 는 사용하는 시스템의 온도, F 는 잡음 지수(Noise Figure), T 는 누적 측정시간이다. 빙붕의 두께를 측정하는 경우, 레이더 신호의 반사는 표면층에서의 반사와 약 2km 근처의 바닥 층에서 반사를 비교해야 되기 때문에 수신기에 요구되는 동적범위는 대략 160(dB) 이상이 된다. 표적거리에 따른 신호 대 잡음비를 그림9에 나타내었다. 그림9

에서 수신기에 요구되는 동적범위가 160(dB)이상이 되는 것을 확인할 수 있다.

Parameter	값 (단위)
Operating frequency, f_c	300 (MHz)
sweep bandwidth, B	200 (MHz)
RF power, P_t	20 (dBm)
Antenna gains, G_t, G_r	10 (dBi)
Noise Figure, N	6 (dB)
Pulse Duration, T	1 (s)
ADC sampling rate	24 (ksamples/s)
Path Loss, L	0.015 (dB/m)
Reflection coefficient, ρ	-2 (dB)

표 1. 시뮬레이션에 사용된 변수들

이는 실제 제작에 어려움이 있기 때문에 본 연구 과제 3장에서는 FMICW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave)파형을 이용하여 동적범위를 줄이는 것을 시뮬레이션 하였다. 제안된 FMICW는 펄스를 사용함으로써 전체적으로 파워가 줄어들지만, 표면층에서의 반사 신호와 바닥 층에서의 반사 신호를 분리 할 수 있는 장점을 가질 뿐 아니라, 수신구간을 제한하는 방법으로 표면 반사 파워를 없앨 수 있다. 간단하게 수신기의 동적범위를 줄이는 방법은 예를 들어 100m 이하의 신호의 수신을 제한하는 신호처리를 사용한다면 수신기의 동적범위는 100(dB) 이하로 만들 수 있다.

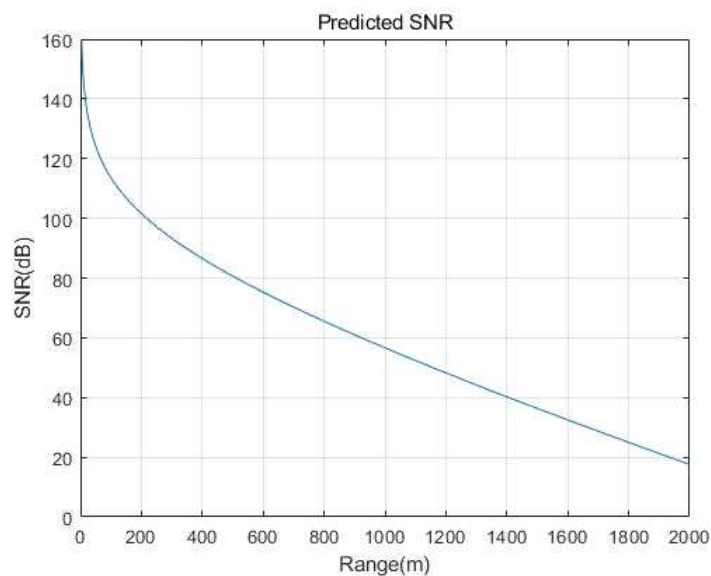


그림 9. 표적 거리에 따른 신호 대 잡음비의 비교

그림5에서 제시된 과정에 따라 반사 신호를 시뮬레이션을 진행하였으며 거리에 따라 측정 정확도를 몬테카를로 시뮬레이션으로 수행했을 때 그림10과 같이 결과를 알 수 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 각 거리에 대하여 각 1000회 실시하였다. 그림10에서 rms거리 오차가 이론식으로 계산한 이론값과 같음을 알 수 있다. 표2에 정리되어 있는 변수들을 사용했으며 노이즈는 가우시안 분포로 가정하여 설정하였다.

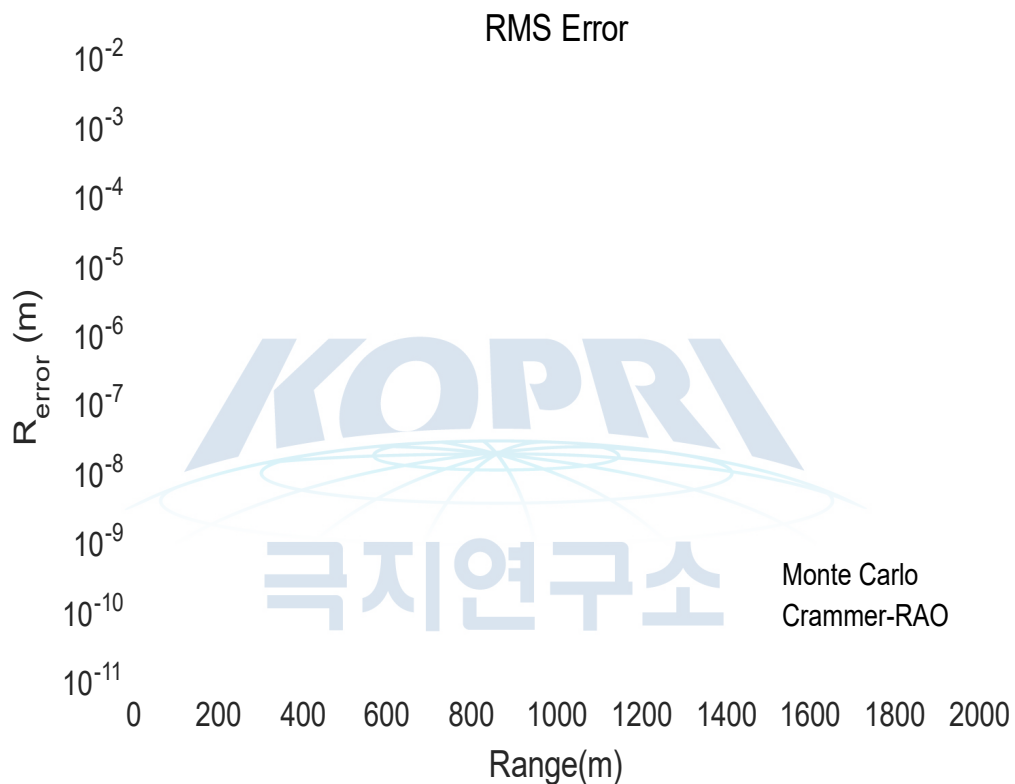


그림 10. 거리에 따른 RMS 거리 오차

제3절 FMICW 레이더 시스템

목표의 거리를 측정하기 위해 FMCW 방식의 시스템을 사용하였다. 하지만 160(dB)가 넘는 동적범위를 가진 시스템은 실제로 구현하기 힘들다. 그러므로 시스템의 동적 범위를 낮추기 위해 FMICW 방식을 제시하고 시뮬레이션을 실행했다. FMICW 방식은 FMCW 방식의 신호를 펄스를 통해 끊어 송신하는 방식으로 일종의 펄스 레이더로 볼 수 있다. FMICW 방식을 아래 그림11과 같이 블록 다이어그램으로 표현했다.

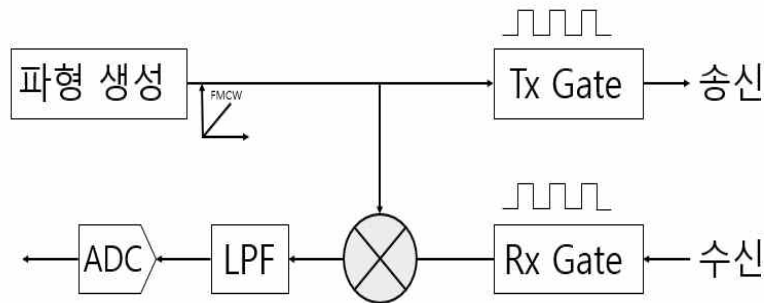


그림 11 FMICW 블록 다이어그램

그림6와 그림11의 차이는 그림12와 같이 송수신 신호의 듀티 사이클을 50%로 사용했다. 송수신 구간을 분리하면, 송신 펄스 길이($T_s/2$)와 표적 거리에 의한 반사 신호의 지연시간(τ)과 일치하는 경우, 송신신호가 모두 수신될 수 있으나 표적거리가 이보다 가깝거나 먼 신호는 수신파워가 줄어들게 된다. 그림12에서 목표물의 거리에 따라 수신되는 신호 주파수들을 색이 다르게 표현했다.

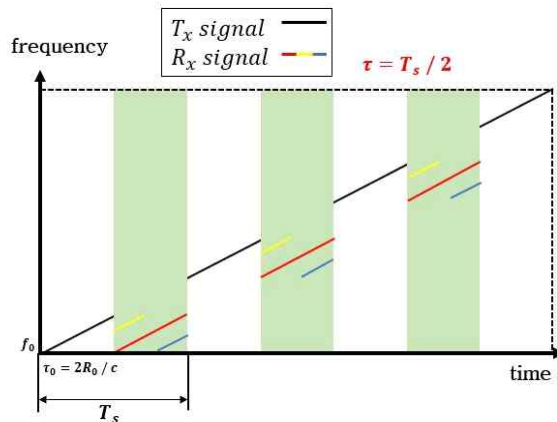


그림 12 FMICW 파형

송신구간과 수신구간을 분리하는 이유는 송수신 신호 간에 누수가 항상 존재하기 때문이다. 때문에 펄스 형태로 송수신 구간을 분리하여 송신 신호에 의한 영향을 줄여 수신 신호의 특성을 개선할 수 있고, 수신 구간을 변경하면, 최소 탐지 거리를 조정할 수 있다. 또한 단거리인 표면 반사 신호와 바닥 층의 반사 신호가 시간 축에서 분리가 되어 동시에 수신되지 않으므로 거리에 따라 이득을 조정하는 STC(Sensitivity Time Control)방식도 적용이 가능하다. 펄스의 길이는 최대 탐지거리에서의 지연시간보다 짧게 선정하여야 단거리에서 반사되는 신호와 수신신호를 분리할 수 있다. 즉,

$$\Delta = \tau_{max} - \frac{T_s}{2} > 0 \quad \text{식 (3.1)}$$

본 연구 과제에서의 최대 탐지거리 2km에서 펄스의 길이는 23.5 usec(2km) 이므로, 펄스 길이를 20.5 usec (1.715km)로 사용하는 경우, 255m(3 usec) 이내의 반사 신호는 2km 의 반사 신호와 분리 수신된다. 펄스의 길이를 조정함으로써 수신 구간을 조정하여 최소 탐지거리를 제한할 수 도 있다.

시뮬레이션에 사용된 FMICW 방식은 주기가 41.6 usec(24KHz), 듀티 사이클 0.5(50%)인 펄스이며, 신호 대 잡음 비(SNR)는 FMICW를 사용했을 때(식 2.17)와 비교하여 아래와 같이 변경된다.

$$SNR = \frac{P_t G_r G_t \rho L \lambda^2}{16\pi R^3} \cdot \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{T}{kT_a F} \quad \text{식 (2.17)}$$

$$SNR_{FMICW} = SNR \times \frac{d_r^2}{d_n} \quad \text{식 (3.2)}$$

여기서, k는 볼츠만 상수, T_a 는 사용하는 시스템의 온도, F는 잡음 지수(Noise Figure), T는 누적측정시간이다. FMICW 방식의 SNR 형태는 식 (3.2)처럼 표현되는데 식 (3.2)의 분모는 d_n 으로 수신 구간의 듀티 사이클을 나타내며 본 연구 과제에서 사용된 50% 즉 0.5 이며, d_r 은 거리에 따른 수신 신호의 듀티 사이클로 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$d_r = \begin{cases} R/3540 & \text{if } 1770 \geq R > 0 \\ 1 - R/3450 & \text{if } 3540 > R > 1770 \end{cases} \quad \text{식 (3.3)}$$

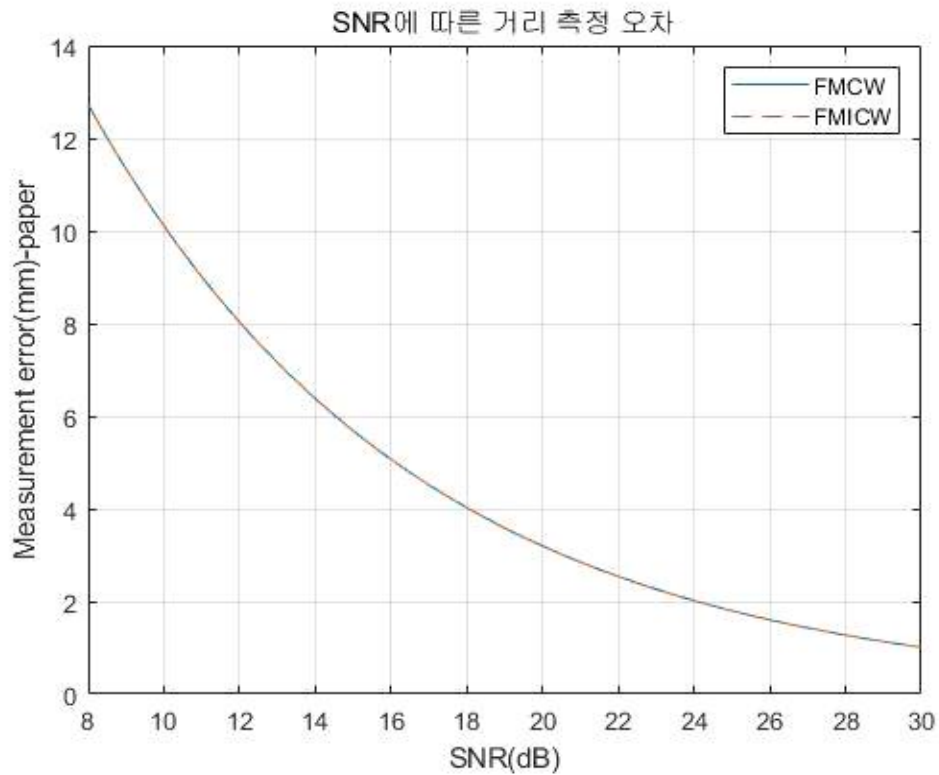


그림 13 SNR에 따른 거리 측정의 오차

식 (2.17)과 식 (3.2)을 이용하여 FMCW 방식과 FMICW 방식의 이론적인 SNR에 따른 거리 측정의 오차를 각각 표현하여 그림13에 표시하였다. FMCW, FMICW 방식과 상관없이 SNR에 따른 거리 측정에서 오차는 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 펄스의 사용으로 인한 단점이 생기는데 가장 큰 단점은 파워 또는 SNR의 감소를 볼 수 있다. FMCW 방식 대신 FMICW 방식을 사용함으로써 생기는 단점은 누적시간 또는 송신 피크 파워의 증가를 통해 보상 가능 하다.

제4절 FMICW를 이용한 시뮬레이션

표적의 거리에 따른 SNR을 FMCW 방식과 FMICW 방식을 비교하여 그림14에 표시하였다. 펄스의 듀티사이클은 그림12와 같이 50%로 설정하였다. FMICW 방식으로는 표적거리가 1770m(펄스길이 20.8 usec)에서의 반사 신호는 모두 수신되어 송신 신호가 줄어든 절반(3dB)만큼의 SNR이 감소하며, 2000m 에서는 0.353(4.56dB) 만큼 감소함을 알 수 있다.

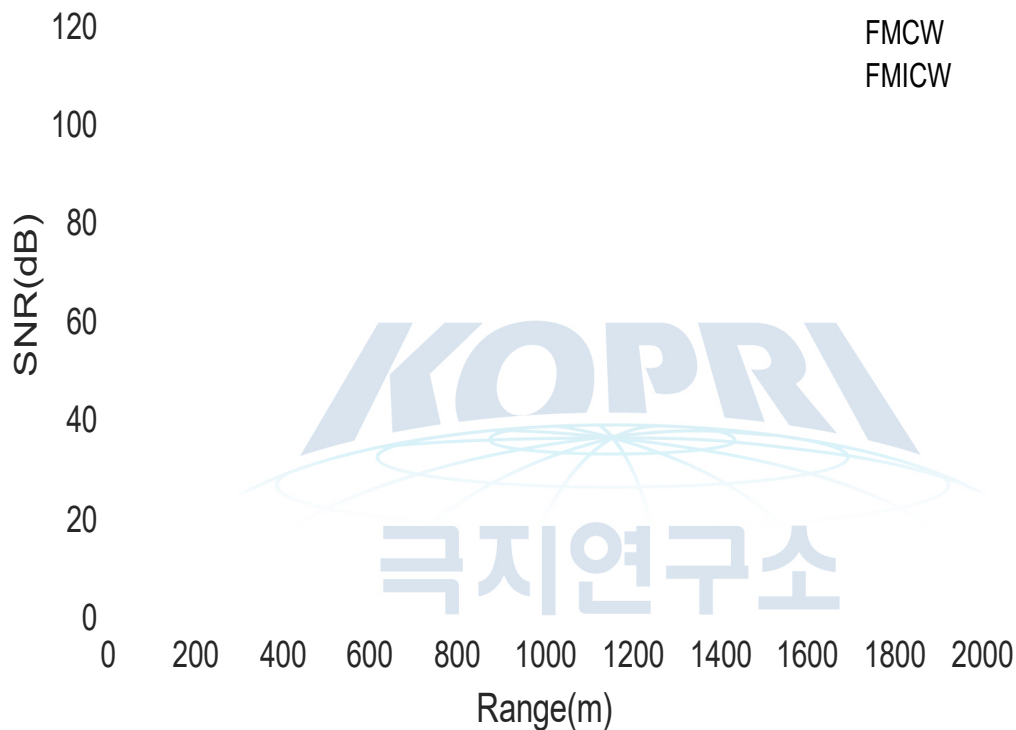


그림 14 표적 거리에 따른 신호 대 잡음비의 비교

2.2절에서와 같이 FMICW 설계된 수신 신호를 그림5의 과정을 통해 반사 신호를 시뮬레이션을 진행하여 거리에 따라 측정 정확도를 몬테카를로 시뮬레이션으로 수행했을 때 결과를 그림15에 나타 내었다. 몬테카를로 시뮬레이션은 각 거리에 대하여 각 1000회 실시하였다.

그림15의 실선은 그림6와 동일한 FMCW 방식을 사용하였을 때의 rms 에러, 점선은 FMICW 방식의 SNR 감소를 반영하여 계산된 rms 에러이다. x표는 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 결과를 표현했다. 이론값과 계산된 값이 일치하는 것을 그림15을 통해 알 수 있다. 펄스방식의 사용으로 SNR이 줄어드는 것을 그림14를 통해 알 수 있으며, SNR의 감소로 정확도의 손실이 나타나는 것을 그림15를 통해 확인하였다. 정확도의 손실은 가까운 거리에서 좀 더 크게 나타나며 먼 거리로 갈수록 손실은 줄어드는 것을 볼 수 있다.

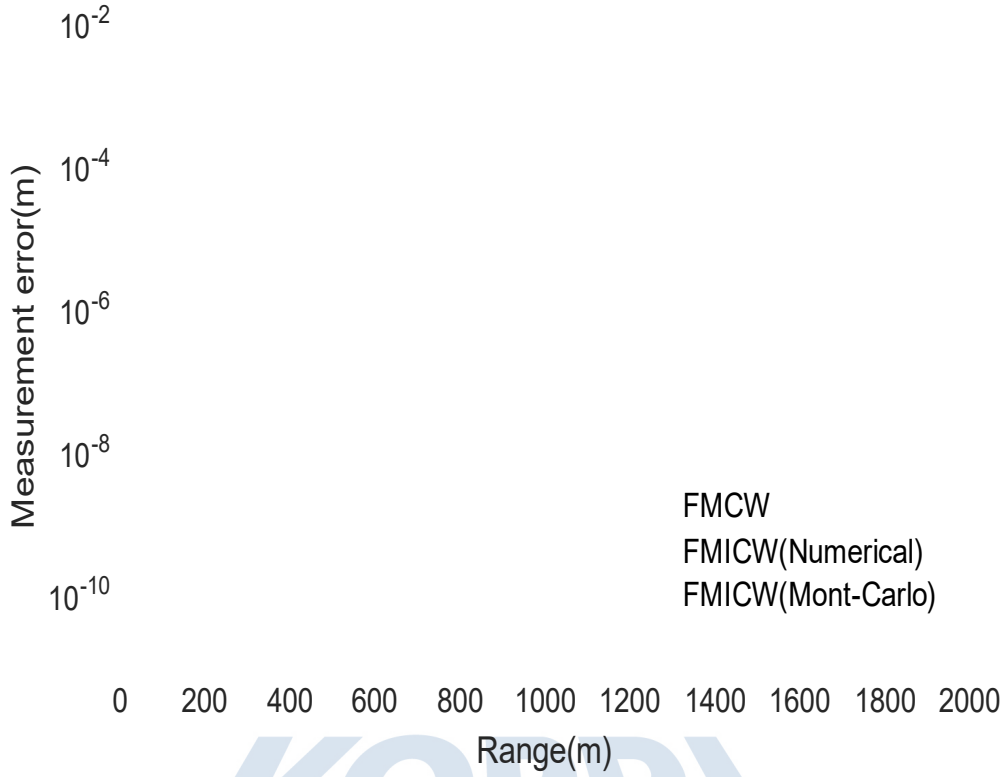


그림 15 거리에 따른 RMS 오차의 비교

그림 (3.6)부터 그림 (3.15)까지 각 목표물의 위치가 300m, 700m, 1000m, 1500m, 2000m의 위치일 때 그림 (3.1)과 같은 FMICW방식으로 설계한 신호를 나타내었다. 복소수 신호로 모의 신호를 만들어 고주파수 성분을 쉽게 처리하여 신호를 살펴보았다. 노이즈가 없는 이상적인 FMICW 방식으로 수신된 신호($Signal_{Rx}$)와 FMCW 방식으로 송신한 신호($Signal_{Tx}$)를 Mixing 한 신호를 Mixing Signal($Signal_{Mix}$)로 표현했으며, 그림 (3.1)의 블록 다이어그램처럼 Mixing 한 신호를 LPF(Low Pass Filter)를 통과시킨 신호를 After LPF Signal로 각각 나타내었다. 2장에서 설명한 수식들과 표(2.1)의 변수들을 사용하여 식 (3.4)부터 식 (3.6)를 사용하여 FMICW 방식의 신호를 만들어 거리를 측정하는 시뮬레이션을 진행하였다.

$$\phi_t(t) = \int \omega_t(t)dt = \omega_c t + \frac{K}{2} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 + \phi_0 \quad \text{식 (2.2)}$$

$$Signal_{Tx} = \exp(j\phi_t(t)) \quad \text{식 (3.4)}$$

$$Signal_{Rx} = \sqrt{2P_r} \times \exp(j\phi_t(t - \tau)) \times pulse_{gate} \quad \text{식 (3.5)}$$

$$Signal_{Mix} = Signal_{Tx} \times conj(Signal_{Rx}) \quad \text{식 (3.6)}$$

LPF는 최소거리에 대한 인덱스를 뽑아내 FFT한 결과에서 Cut off하는 형태로 쉽게 처리하였다. LPF를 통과시킨 신호에 대해서 FFT 결과를 거리와 신호의 파워에 대해 나타내었다. 그림12와 같이 FMICW 방식으로 거리를 측정했을 때 최대 목표 2000M 기준으로 목표의 거리에 따라 수신되는 신호가 강해지는 것을 볼 수 있다.

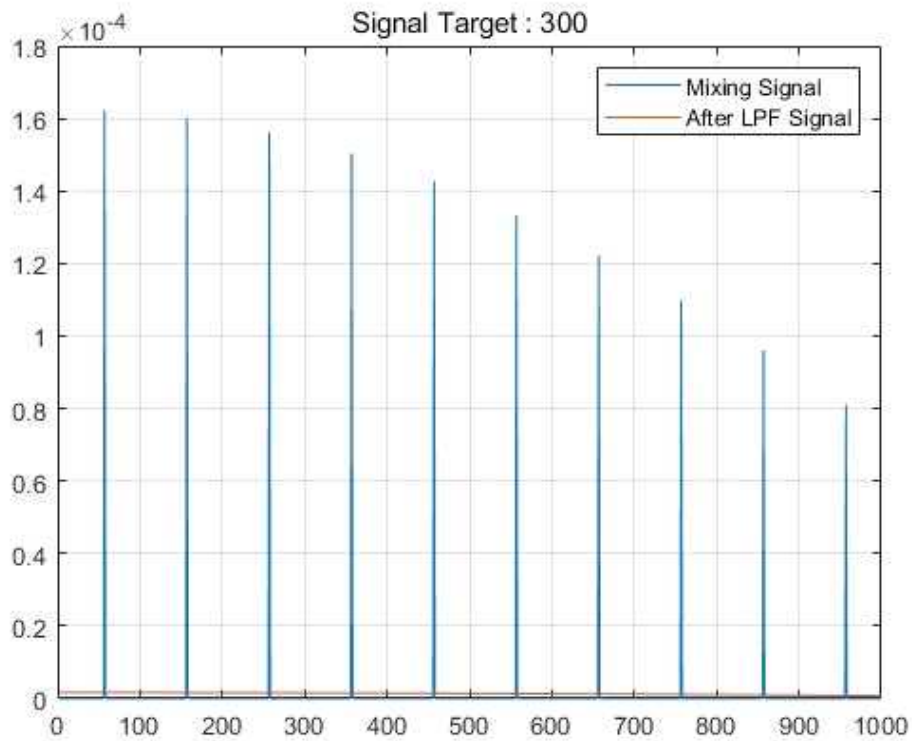


그림 16. 300M표적의 수신 신호

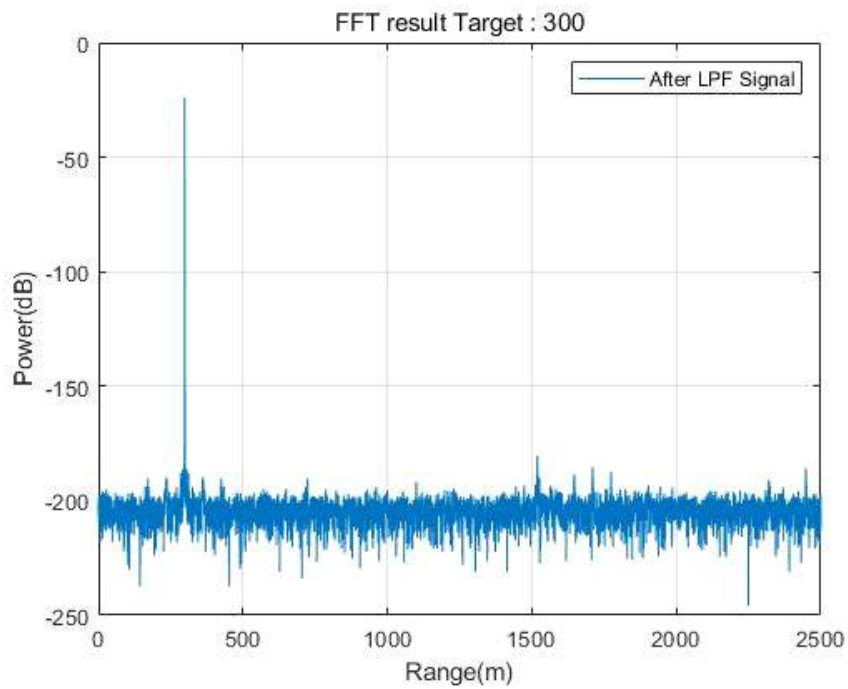


그림 17. 300M표적의 수신 신호 FFT 결과

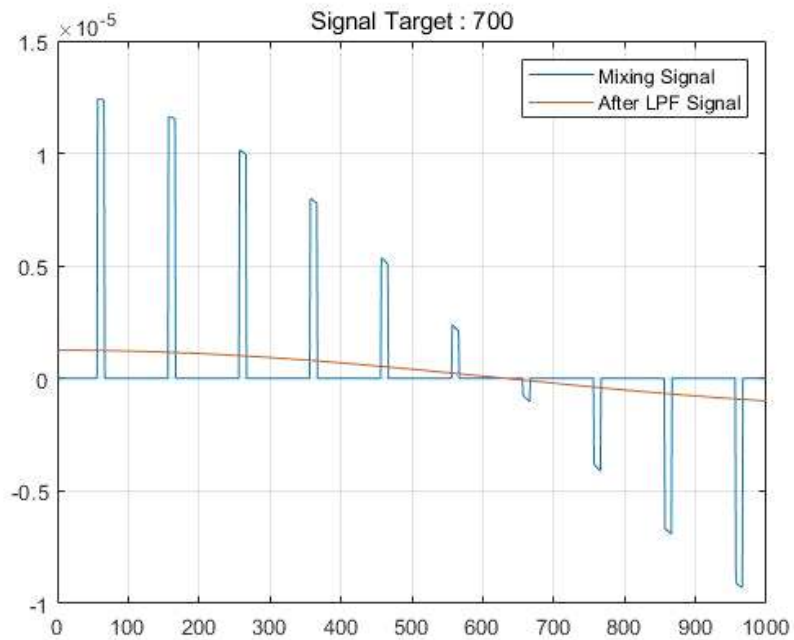


그림 18. 700M표적의 수신 신호

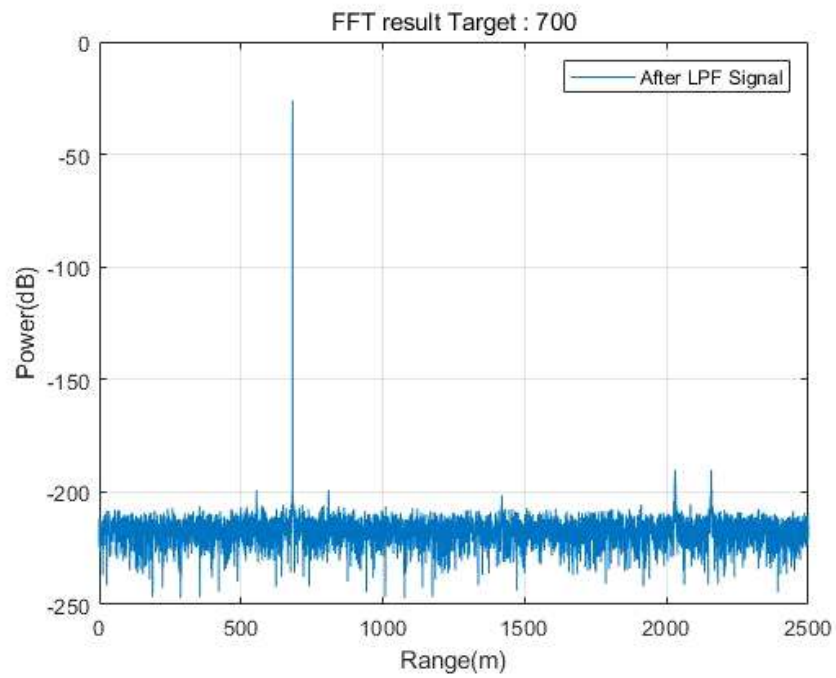


그림 19. 700M표적의 수신 신호 FFT 결과

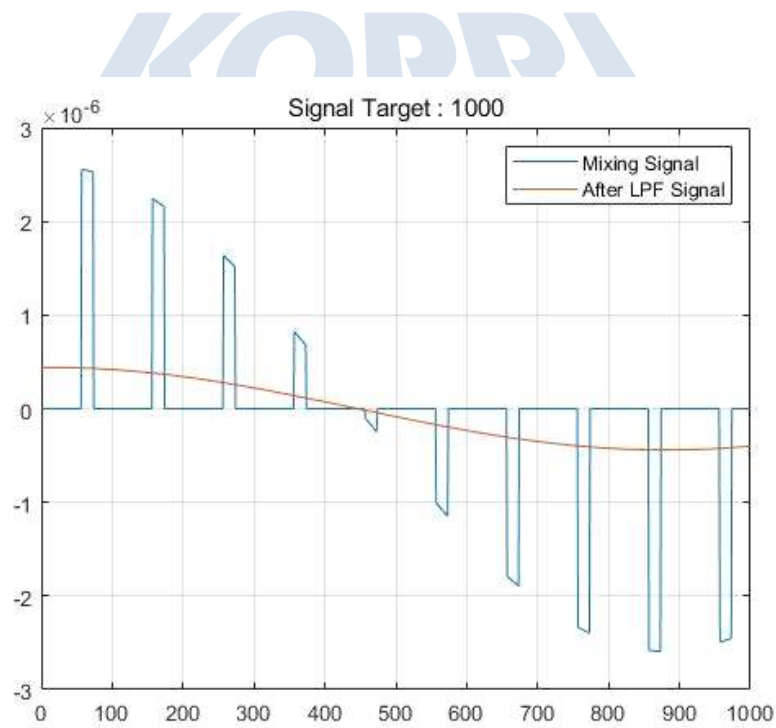


그림 20. 1000M표적의 수신 신호

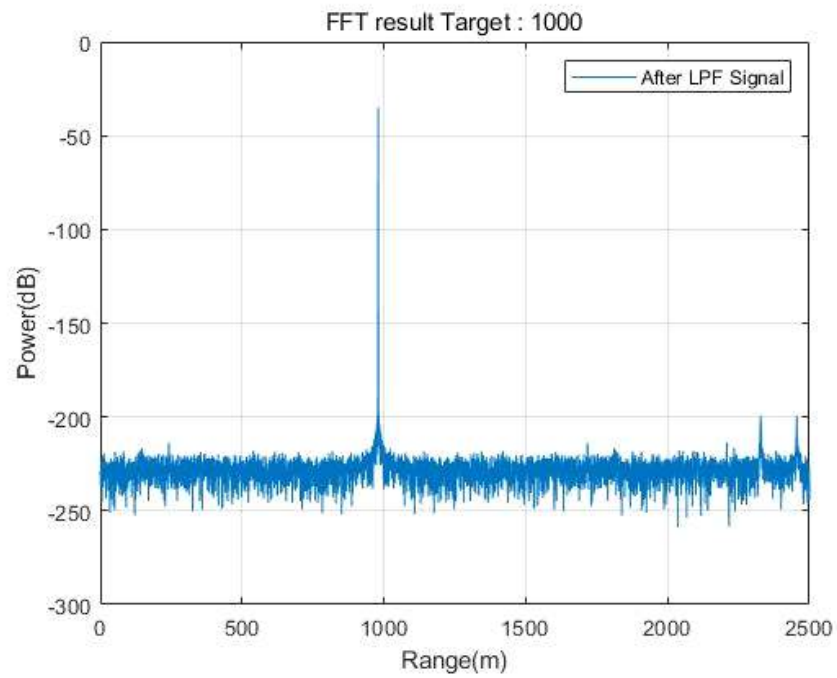


그림 21. 1000M표적의 수신 신호 FFT 결과

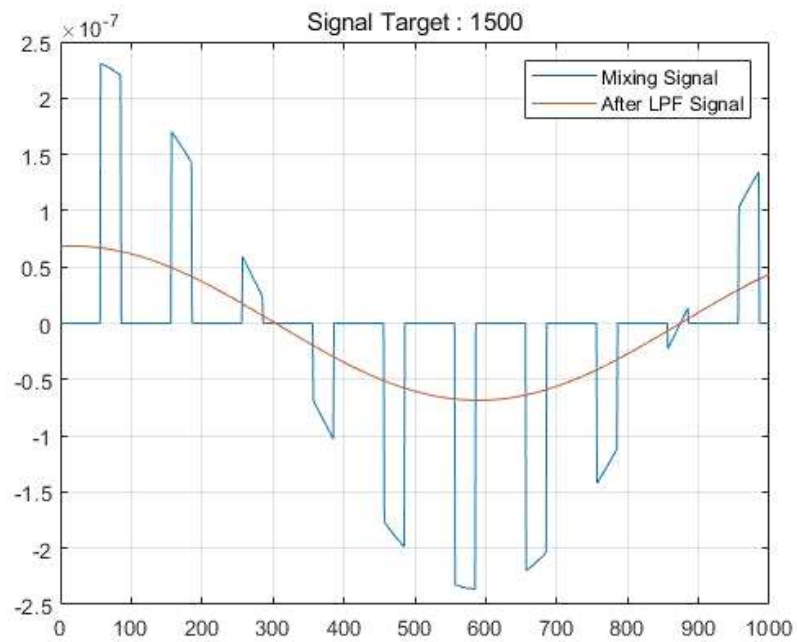


그림 22. 1500M표적의 수신 신호

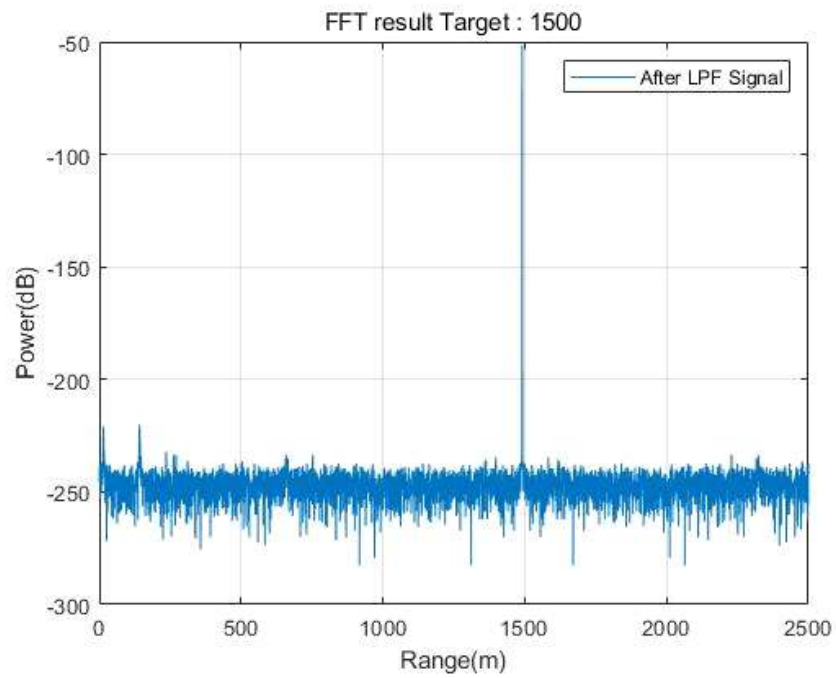


그림 23. 1500M표적의 수신 신호 FFT 결과

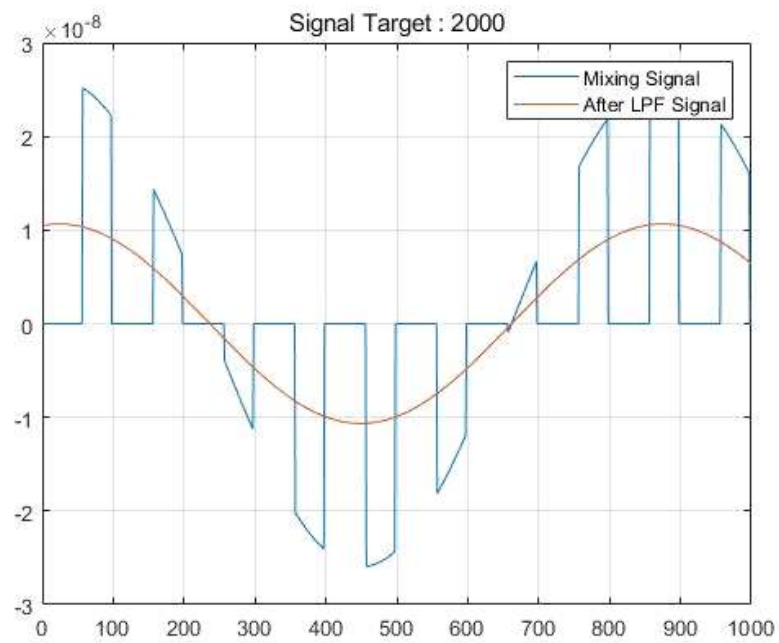


그림 24. 2000M표적의 수신 신호

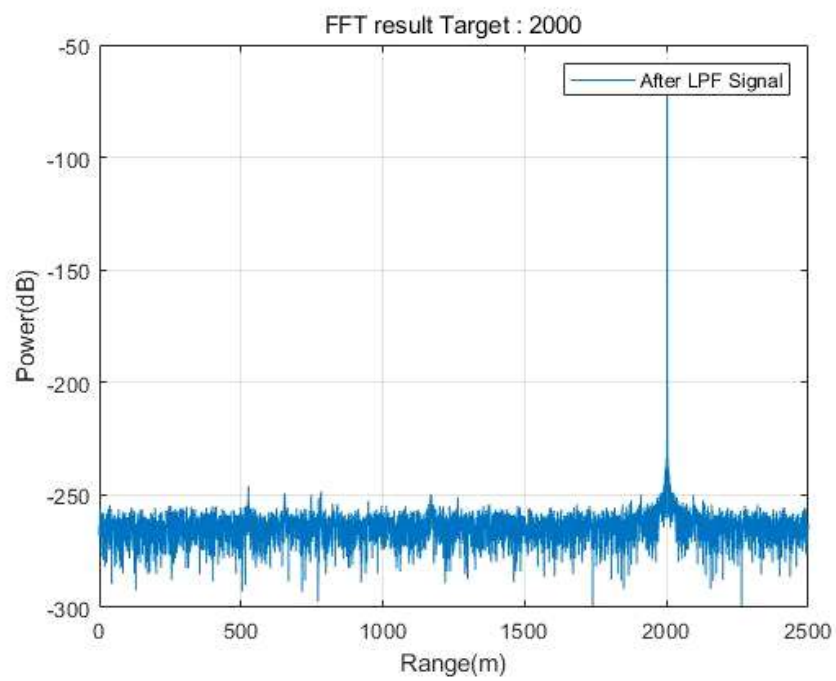


그림 25. 2000M표적의 수신 신호 FFT 결과



제5절 극지 빙하구조 분석 레이더 하드웨어 개발

1. 빙하구조분석레이더 PBS(Product breakdown structure)

극지 빙하구조 분석 레이더의 Hardware 구성은 다음 그림과 같다.

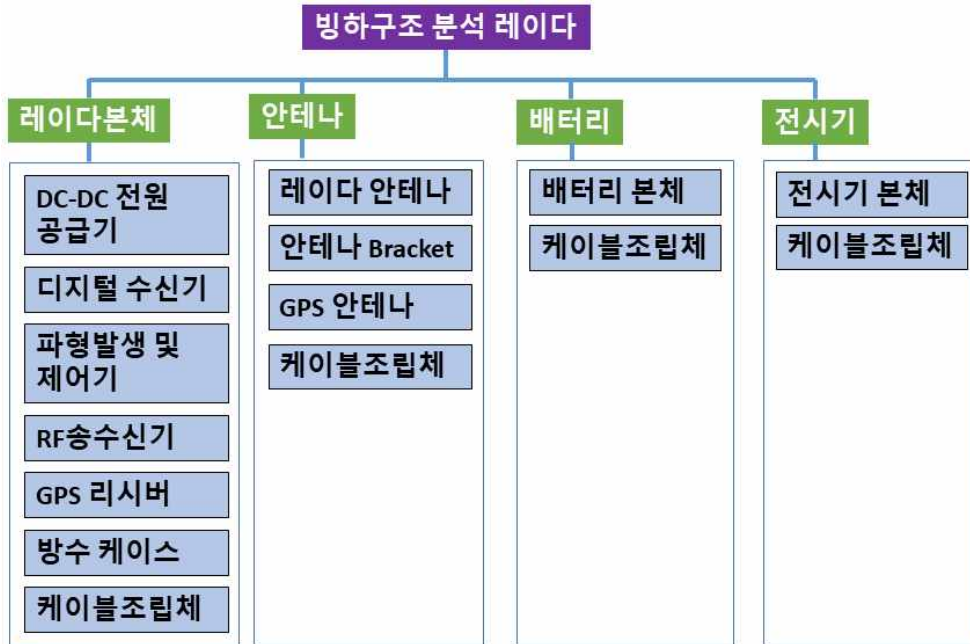


그림 26 빙하구조 분석 레이더 구성

빙하구조분석레이더 본체의 주요구성품은 배터리의 공급전압을 필요전원으로 생성하는 DC-DC전원공급기, LFCW파형을 생성 및 제어를 하는 파형발생 및 제어기, 파형발생기로부터 LFMCW파형을 증폭하여 송신안테나로 전송하고 수신안테나로부터 수신된 신호를 증폭 하향 변환 후 수신기로 수신신호를 보내는 RF송수신기, RF수신기로부터 수신된 신호를 A/D변환하여 처리하는 디지털수신기, GPS안테나로부터 수신신호를 처리하는 GPS리시버로 구성 된다. 안테나의 주요 구성품은 레이더용 송신과 수신을 하는 2개의 안테나와 GPS 안테나로 구성 된다. 레이더의 측정의 편의성을 위하여 안테나 거치대가 포함 된다. 배터리는 사용 환경에 부합되는 배터리본체와 케이블조립체로 구성 된다. 전시기 는 사용 환경에 부합되는 노트북PC이며 전시기 본체, 케이블조립체, 운용 프로그램, 분석 프로그램으로 구성 된다.

2. 빙하구조분석레이다 하드웨어 구성

가. 배터리

극지 빙하구조 분석 레이더용 배터리는 영하 40도~영상60도 사용 가능하고 자체 히팅 기능을 통해 극저온까지 사용 가능 하다. 사용온도가 영상 5도 이하면 배터리 내부의 'Battery Heater Main S/W'를 작동 시킨다.

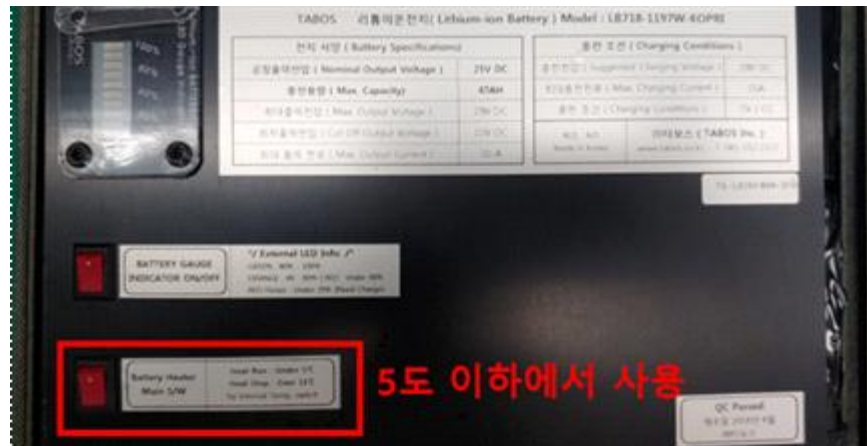


그림 27 Battery Heater Main S/W

배터리의 충전 여부는 배터리 내부의 INDICATOR ON/OFF로 판별하며 정상전압의 측정은 다음 그림과 같이 디지털멀티미터의 프로브 적색을 C핀, 프로브 흑색을 E핀에 접촉 하여 측정 가능 하다.



그림 28 배터리 전압 점검

배터리(용량 1,180Wh) 온도별 사용 부하에 따른 사용 가능 시간

외부 온도 (°C)	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
Case 1 : 사용시간 (평균소비전력 170W 기준)	60%	75%	90%	94%	96%	98%	100%	100%	100%	100%
Case 2 : 사용시간 (평균소비전력 400W 기준)	50%	68%	85%	90%	93%	95%	98%	98%	98%	98%

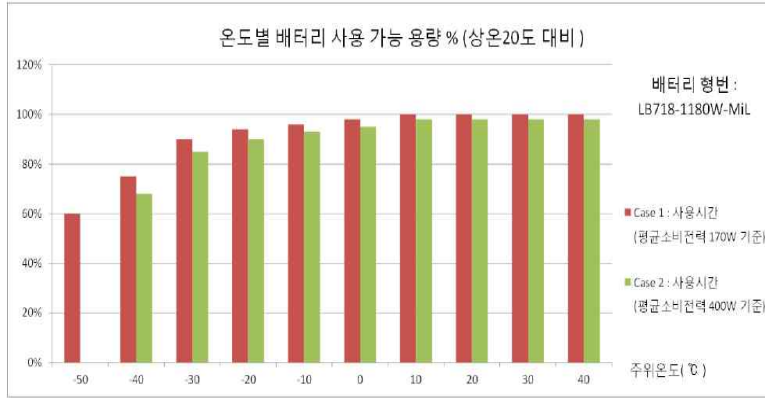


그림 29 온도에 따른 배터리특성

나. 빙하구조분석레이다 본체

(1) DC-DC 전원 공급기

DC-DC 전원 공급기는 +24V의 배터리전원을 +12V, -12V, +5V의 전원으로 변환하며 각부분의 전원으로부터의 노이즈 유입을 억압하기위한 설계가 고려되었다.

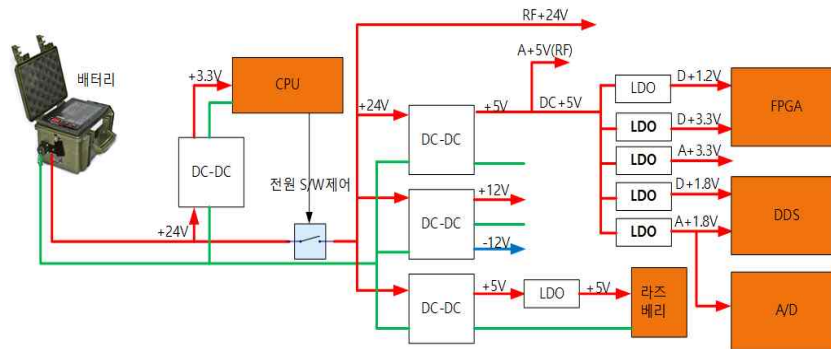


그림 30 DC-DC 전원공급기 블록도

그림과 같이 상시 전원용 +3.3V DC-DC는 CPU에 전원공급이되며 CPU를 통하여 전원제어 신호에 의하여 나머지 DC-DC전원의 입력전원을 공급한다. 다음그림의 a)상시 전원(MCU)는 방수케이스의 전원ON시에 항상 전원이 공급되며 MCU를 항상 전원이 공급된 운용프로그램의 Mode(일반, Sequence)선택에 의하여 CPU제어신호에 의하여 나머지 DC-DC의 입력전원이 공

급된다.

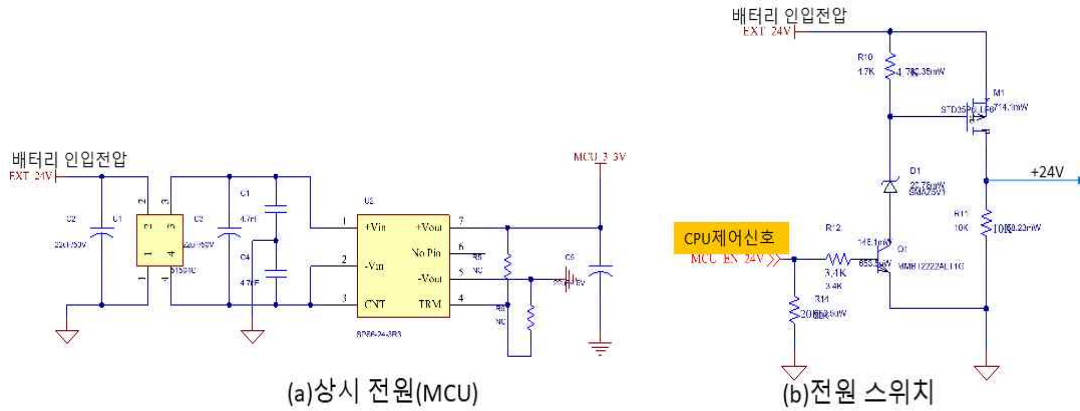


그림 31 상시전원 및 전원스위치 회로도

아래표는 DC-DC전원공급기 제작에 선정된 DC-DC의 규격이다 빙하구조분석레이다 본체의 입력전압범위는 DC+18V에서 DC+36V까지 정상동작 전압으로 사용 할 수 있고 배터리는 DC+24V를 공급 하며 빙하구조분석레이다 본체에 전압감시 회로를 통해 정상 입력 범위를 벗어나면 운용프로그램에서 저전압 알람을 전시한다. (정상 상태 전압 범위 DC+22V 이상)

순번	품번	입력 범위(V)	출력 (V)	최대출력 (A)	비고
1	SPS6-24-3R3	18 - 36	+3.3	1.5	입력기준 누설전류 0.03A
2	SPS6-24-5	18 - 36	+5	1.2	
3	TMX50H48S5	18 - 75	+5	10	
4	TMH40H24D12	18 - 36	±12	1.67	

표 2 DC-DC부품별 사양

빙하구조분석레이다 시스템의 전체 소모전류는 DC-DC전원공급기 +24V 입력기준으로 0.7A를 소모하며 DC-DC부품 순번1,SPS6-24-3R3은 내부타이머 동작을 위한 상시전원 용으로 대기모드에서 DC+24V 입력기준 약 0.03A의 전류가 소모 된다.

DC-DC 전원공급기의 PCB 형상은 다음그림과 같으며 각전원의 노이즈 격리를 위하여 사용

전압별 개별 그라운드를 분리 하였고 PCB는 6층으로 설계/제작 되었다.

전원스위치

SPS6-24-3R3

TMX50H48S5

142mm

TMX40H24D12

SPS6-24-5

187mm

그림 32 DC-DC PCB형상

(2) 파형발생 및 제어기, 디지털 수신기

파형발생 및 제어기는 10MHz TCXO또는 OCXO를 기준 클럭으로 사용 하여 1GHz의 주파수를 생성하고 생성된 1GHz의 주파수를 기준으로 DDS AD9910에서 200MHz~400MHz의 LFM파형을 생성 한다. 제어기능은 전시기와 빙하구조분석레이다 본체와 이더넷 통신으로 제어를 수행한다. 기준신호 10MHz는 TCXO와 OCXO를 선택하여 사용 가능하도록 설계/제작 되었고 TCXO의 상세 사양은 다음과 같다.

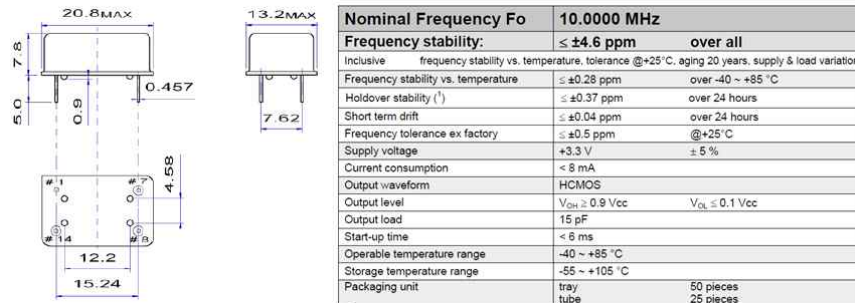


그림 33 TCXO 형상 및 규격

빙하구조분석레이다에서 주요한 TCXO규격은 Frequency stability로 - 40°C 운용조건에서

$\leq \pm 0.28$ ppm로 안정적인 성능을 갖는다. TCXO는 STRATUM-III를 만족 하며 STRATUM-III는 다음과 같다.

STRATUM-III 및 3E 오실레이터 는 3가지 안정성 사양이 충족되어야함.	
FREE RUN	$\pm 4.6\text{ppm}/20\text{년}$
HOLD OVER	STRATUM3 $\pm 0.37\text{ppm}/24\text{시간}$, STRATUM3E $\pm 0.01\text{ppm}/24\text{시간}$
DRIFT	시험실환경STRATUM3 $\pm 0.04\text{ppm}/24\text{시간}$, STRATUM3E $\pm 0.001\text{ppm}/24\text{시간}$

표 3 STRATUM-III 정의
혼용 사용 가능한 OCXO의 사양은 아래와 같다.

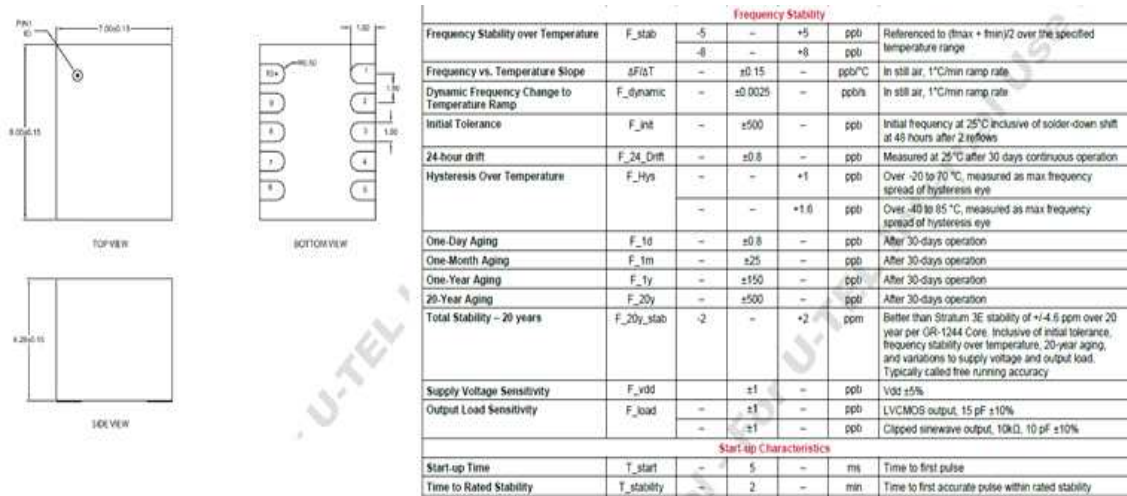


그림 34 OCXO SiT5711AICKW-33E의 형상 및 규격

파형을 발생하기 위한 파형발생부의 블록도는 다음그림과 같으며 10MHz TCXO또는 OCXO를 사용하여 1GHz PLL을 구성하여 DDS AD9910의 입력 클럭으로 구성하고 DDS AD9910는 200~400MHz의 LFM신호를 생성 한다.

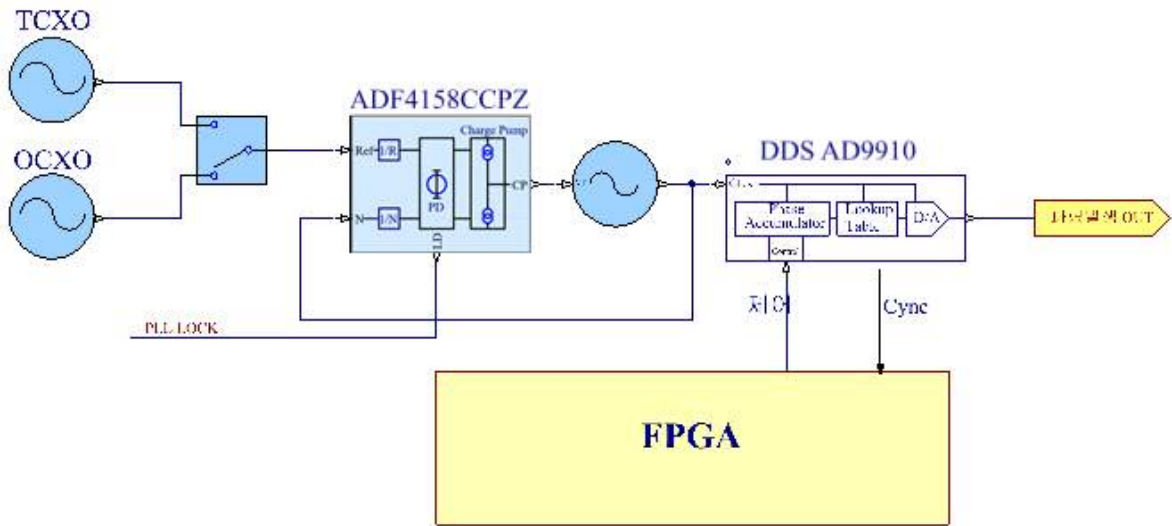


그림 35 파형발생 블록도

자체 생성 되는 불요파 억제를 위하여 AD9910의 내부PLL을 사용 하지 않고 외부에 별도의 PLL 블록을 구성하여 1GHz를 생성 한다.

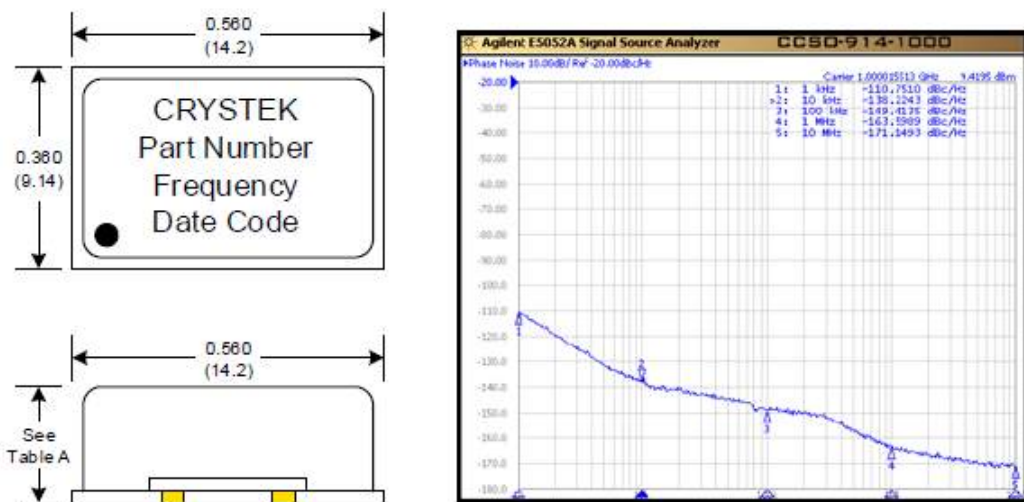


그림 36 SAW오실레이터 CVCSO-914-1000 형상 및 Phase noise

다음그림은 PLL IC(ADF4158CCPZ)를 사용 하였을 때 모의분석 결과 이다. 모의분석결과 약 2.5초에 Phase Error가 0을 갖는다. 제작품을 통한 위상고정속도는 약1.5초에서 2초소요 된다.

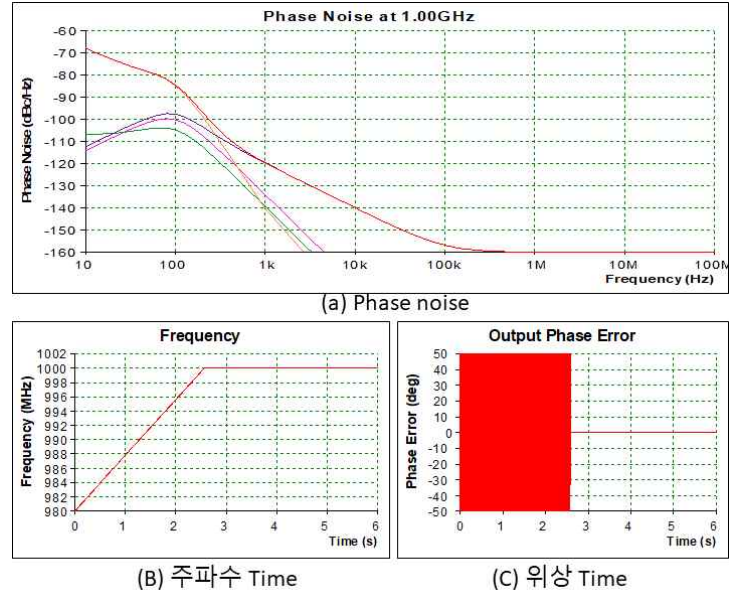


그림 37 1GHz 생성 PLL 시뮬레이션 결과

DDS의 출력 주파수범위는 200MHz~400MHz이고 변조방식은 FMCW이다. 출력 주파수 범위의 f_c/f_s 는 0.2~0.4를 사용하고 SFDR은 다음그림과 같으며 사용 주파수대역의 불요파는 약-50dBc 이다.

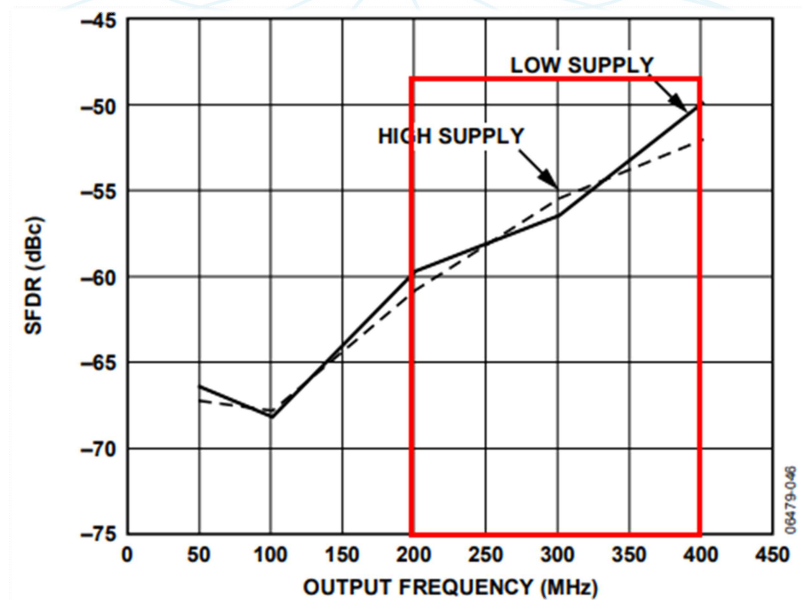


그림 38 1GHz REF사용 시 AD9910의 출력범위의 SFDR

다음그림은 SFDR -50dBc를 기준으로 DDS AD9910의 출력범위에서 불요파의 성분을 100MHz 단위로 분석 하였다. 사용주파수 대역과 근접대역의 주파수 성분은, $2f_{out}$, $f_s - 2f_{out}$, $f_s - 3f_{out}$ 이고, 각 불요파는 다음과 같다.

- 2fOut : DDS AD9910의 출력주파수의 하모닉 성분으로 DDS의 출력주파수 200MHz 일 때 2fOut의 성분은 400MHz이므로 DDS 출력단의 필터가 이 성분을 억압 할 수 없다. DDS의 출력에서는 이성분이 약-50dBc이지만 송신기를 거치면서 증폭기의 영향으로 약-35dB ~ -40dB로 증가한다.
- fs - 2fOut ,: 불요파는 DDS입력Ref-DDS출력 하모닉 성분으로 사용주파수 대역 영역에서는 400~200MHz에서 -52dBc 이다.(ex. 1000-(2*400)=200MHz)
- fs - 3fOut : 불요파는 DDS입력Ref-DDS출력의 Third 성분으로 사용주파수 대역 영역에서는 400~200MHz에서 -52dBc 이다.(ex. 1000-(3*260)=220MHz)

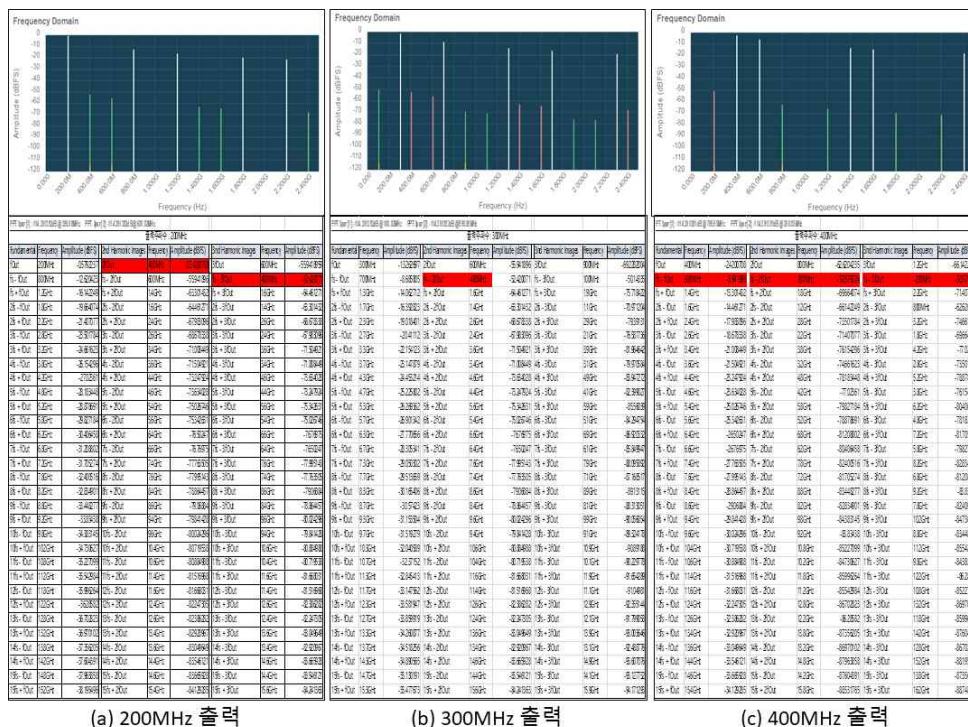


그림 39 DDS AD9910 출력 불요파 분석

파형발생 및 제어기는 디지털 수신기의 A/D 변환기용 샘플링 클럭을 생성한다. 생성과정은 다음그림과 같다.

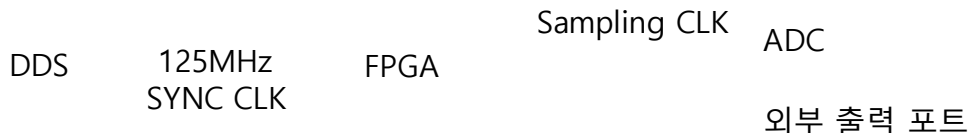


그림 40 A/D 변환기용 Sampling 클럭을 생성

다음 그림은 제어기의 회로구성이다. FPGA 클럭 생성, DDS PLL 제어, SWEEP 타이밍, SPI DATA 송수신, A/D DATA 획득부로 구성된다.

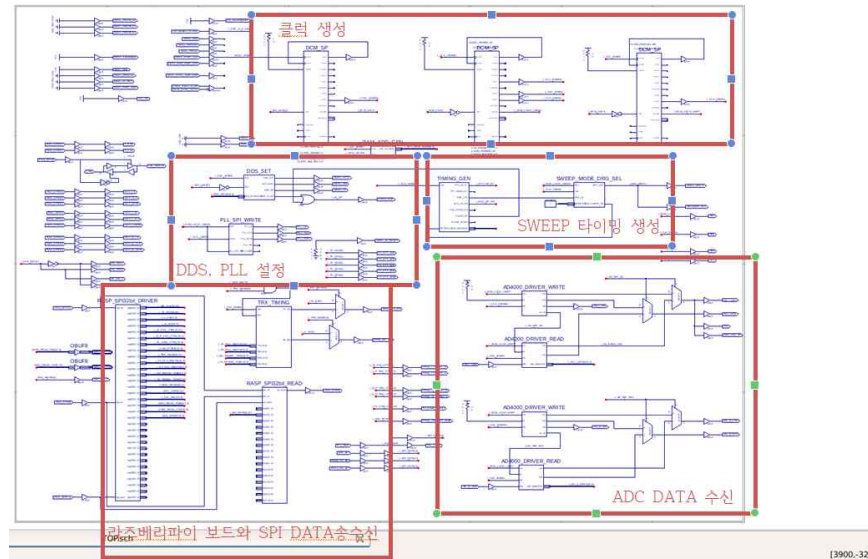


그림 41 FPGA 블록1

다음 그림은 제어기의 RAM 및 UART통신부 이다.

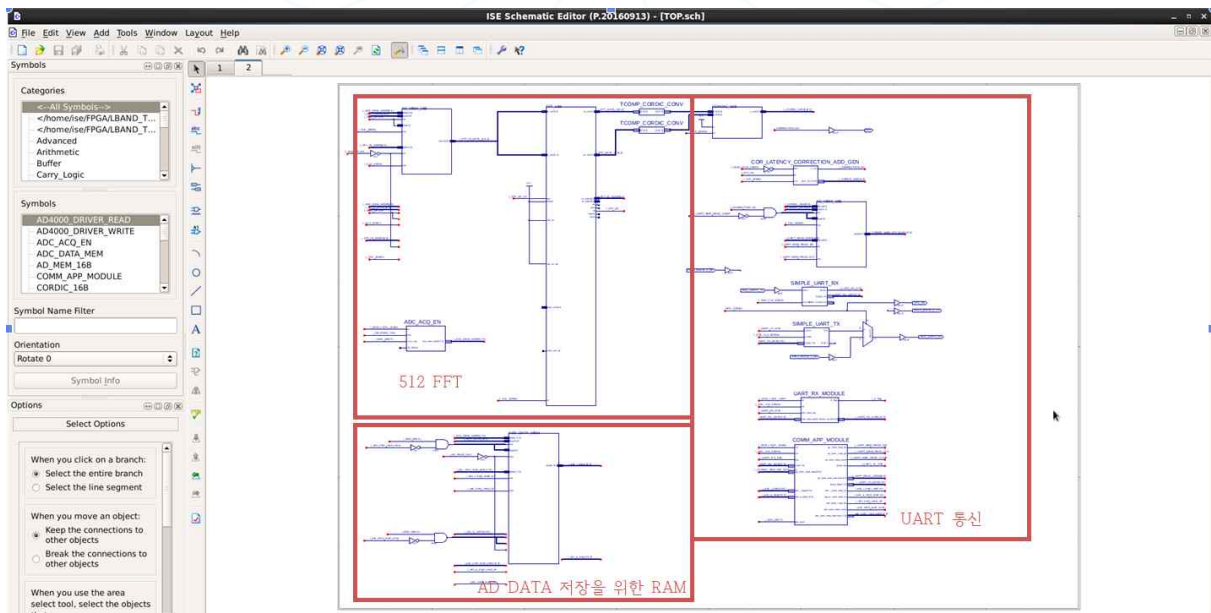


그림 42 FPGA 블록2

다음 그림은 파형발생 및 제어 디지털 수신부 PCB 형상 이다. DDS로 공급되는 전원들은 LDO를 통하여 분리, 아날로그 GND와 디지털 GND 또한 분리 설계 하였다. PCB는 6층으

로 설계/제작 되었다.

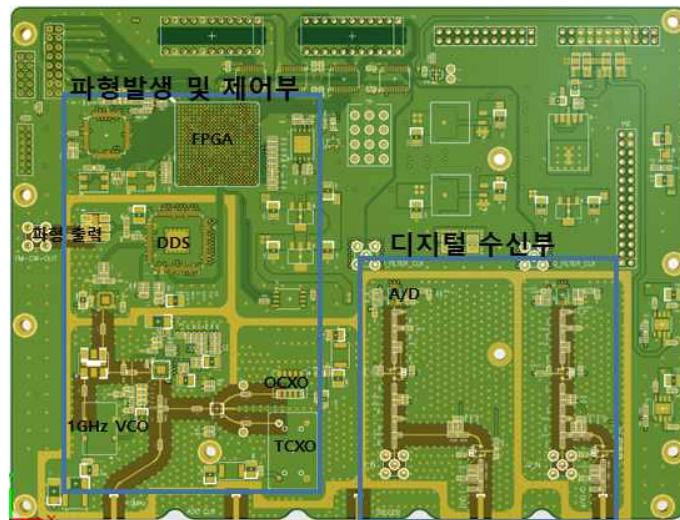


그림 43 파형발생 및 제어 디지털 수신부 PCB 형상

(3) RF 송신부

RF송수신기는 파형발생기로부터 200MHz~400MHz의 FMCW파형을 증폭하여 송신안테나로 전송하고 수신안테나로부터 수신된 신호를 증폭과 0Hz~10KHz로 Bit 주파수로 하향변환한 후 디지털 수신기로 수신 신호를 보낸다. 다음그림은 송신부의 블록도 이다. 그림에서와 같이 파형발생기로부터 200MHz~400MHz의 FMCW파형을 대역통과여파기를 거쳐서 드라이브 증폭기, 가변감쇠기, 최종 증폭기를 거쳐서 안테나로 송신 한다.

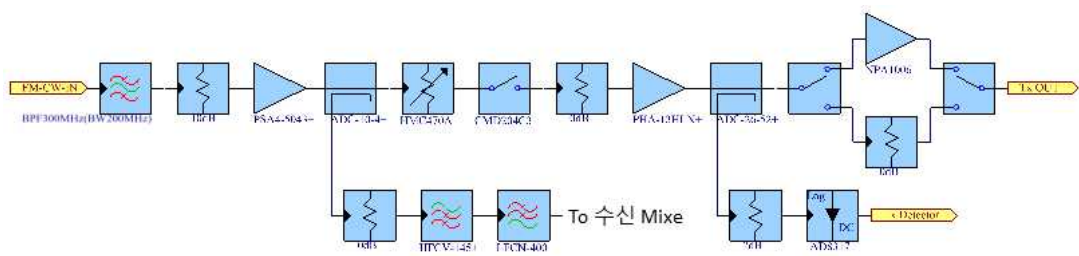


그림 44 송신 블록도

파형발생 및 제어부로부터 발생되는 불요파로인해 RF 송신의 초단은 대역통과여파기를 사용하여 하며 대역통과여파기의 성능은 다음 다음그림과 같다.

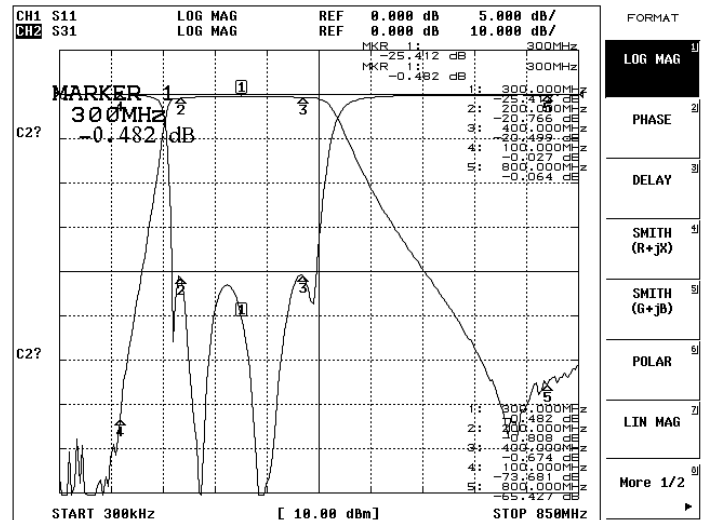
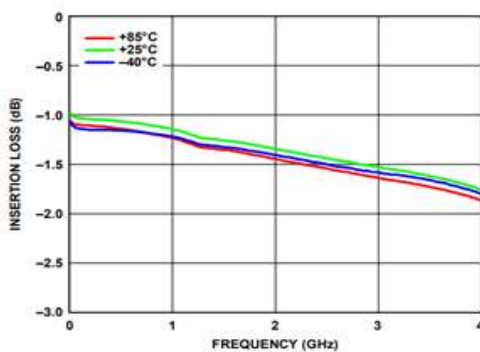


그림 45 대역통과여파기 RL300 B200 PN 2D 성능

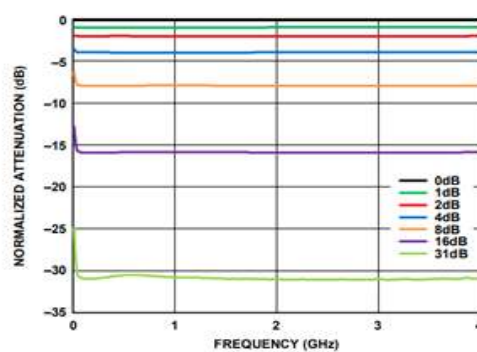
디지털 가변 Attenuation(HMC470A)는 출력의 High Gain, Low Gain 증폭기의 선택에 따라 증폭기의 입력 레벨을 조정한다. 다음그림은 디지털 가변 Attenuation의 진리표와 사양이다.

Table 5. P4 to P0 Truth Table					
Digital Control Input ¹					Attenuation State (dB)
V1	V2	V3	V4	V5	
High	High	High	High	High	0 dB (reference)
High	High	High	High	Low	1 dB
High	High	High	Low	High	2 dB
High	High	Low	High	High	4 dB
High	Low	High	High	High	8 dB
Low	High	High	High	High	16 dB
Low	Low	Low	Low	Low	31 dB

(a) Attenuation Table



(b) Insertion Loss



(c) Normalized Attenuation

그림 46 가변 Attenuation HMC470A

다음그림은 종단 증폭 회로 이다 High Gain (+40dBm) Low Gain(+20dBm)을 RF SPDT 스위치를 통하여 선택할 수 있으며 High Gain 증폭기는 NPA1006을 선정하여 설계 되었고 NPA1006의 동작은 바이어스 시퀀스 회로와 함께 동작하며 바이어스 시퀀스는 표6과 같다.

NPA1006 Bias Sequencing	
Turning the device ON	Turning the device OFF
1. Set VGS to the pinch-off (VP), typically -5 V.	1. Turn the RF power off.
2. Turn on VDS to nominal voltage (28 V).	2. Decrease VGS down to VP
3. Increase VGS until the IDS current is reached.	3. Decrease VDS down to 0 V.
4. Apply RF power to desired level.	4. Turn off VGS.

표 4 NPA1006 Bias Sequencing

위의 NPA1006의 네거티브 전원의 제어를 쉽기 위하여 LTC1261L Switched Capacitor Regulated Voltage Inverter IC를 VGS제어용으로 사용 한다.



High Gain OUT

Low Gain OUT

그림 47 RF 송신 최종단화로

다음그림은 RF 송신기의 Budget 모의분석 그래프이다. High Gain (+40dBm) Low Gain(+20dBm)의 드라이빙 레벨은 디지털 가변 Attenuation HMC470A를 사용하여 High Gain 과 Low Gain의 입력 레벨을 조정 하도록 설계 된다.



그림 48. High Gain Budget 설계



그림 49. Low Gain Budget 설계

(4) RF 수신부

안테나로부터 수신 신호를 수신하여 LNA, 증폭기를 거쳐 하향변환 Mixer를 통하여 주파수를 Bit 주파수 영역인 0Hz~10kHz의 영역으로 변환하여 필터 및 증폭처리를 하여 A/D 변환 가능한 레벨로 변환하여 디지털 수신기로 전송한다.

그림 50 RF 수신 블록도

RF 수신기의 주요구성은 과 입력으로부터 수신 채널을 보호하는 리미터, LNA, 이미지 제거용 대역통과여파기(송신용 대역통과여파기와 동일), Gated FMCW를 상태 운용을 위한 RF 스위치, 하향변환 Mixer, 근거리 제거용 고역통과여파기(OP AMP), 저역통과여파기(OP AMP), Analog to Digital IC 입력 레벨조절용 가변 OP AMP로 구성 된다. 다음그림과 같이 Gated FMCW용 RF 스위치 CMD204C3는 제어 신호가 음 전원 제어를 하므로 제너다이오드와 음 전원 전압이 조합된 LDO와 제어회로가 적용 되었다.

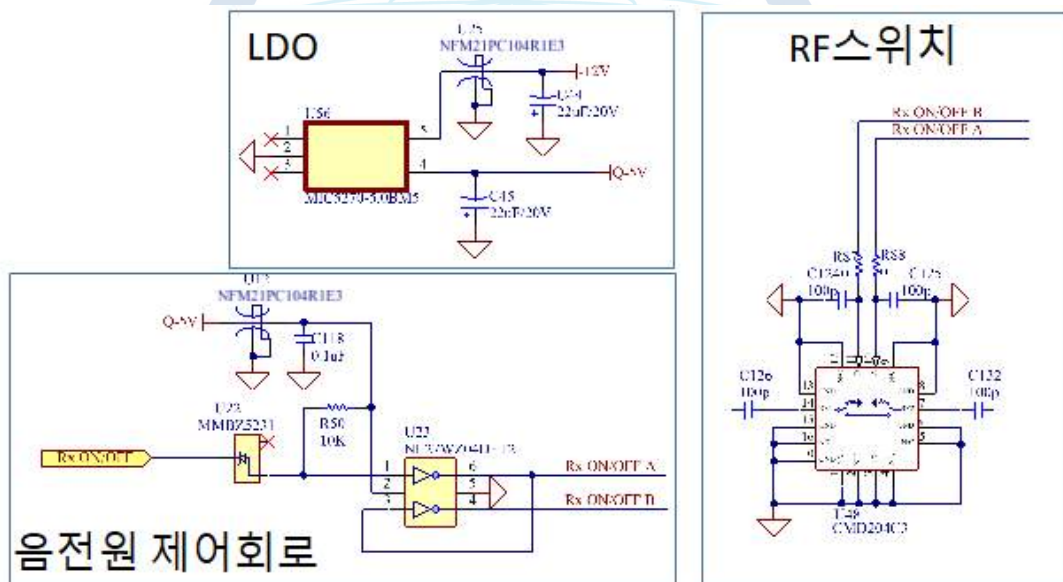
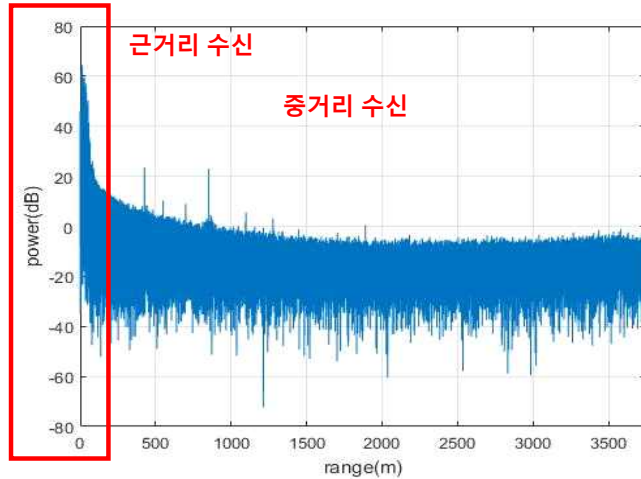


그림 51 Gated FMCW RF 스위치 회로

다음그림과 같이 근거리의 낮은 주파수와 높은 수신 레벨로 인하여 수신영역과 A/D 포화 때문에 탐지영역 악화하는 문제를 개선하고자 FMICW모드와 FMCW모드 사용 시 수신 레벨의 조정 Mixer의 주파수 하향 변환 Bit 주파수에서의 저주파 대역 포화신호 제거를 위해 OPAMP를 적용한다.



변수	설명
B	sweep bandwidth
R	range to a target
T	pulse duration
c	speed of light
ϵ_r	dielectric constant
ΔR	range resolution
fd	비트주파수

2000m 일 때: 비트주파수는 약 4695Hz
 1000m 일 때: 비트주파수는 약 2347Hz
 100m 일 때: 비트주파수는 약 234Hz
 50m 일 때: 비트주파수는 약 117Hz
 25m 일 때: 비트주파수는 약 58Hz
 10m 일 때: 비트주파수는 약 23Hz

그림 52 시험결과 및 Bit 주파수 계산

Mixer 이후의 고역통과여파기는 50Hz 미만의 주파수에서 0dB Gain을 가지며 최대 Gain은 5kHz에서 80dB로 설계. (40dB/decde), 사용되는 OP AMP의 Open-loop을 고려하여 이득은 1 이고, 40dB/decde의 대역 억제 특성을 갖도록 설계/제작 되었다. 다음그림은 모의분석 결과 이다.

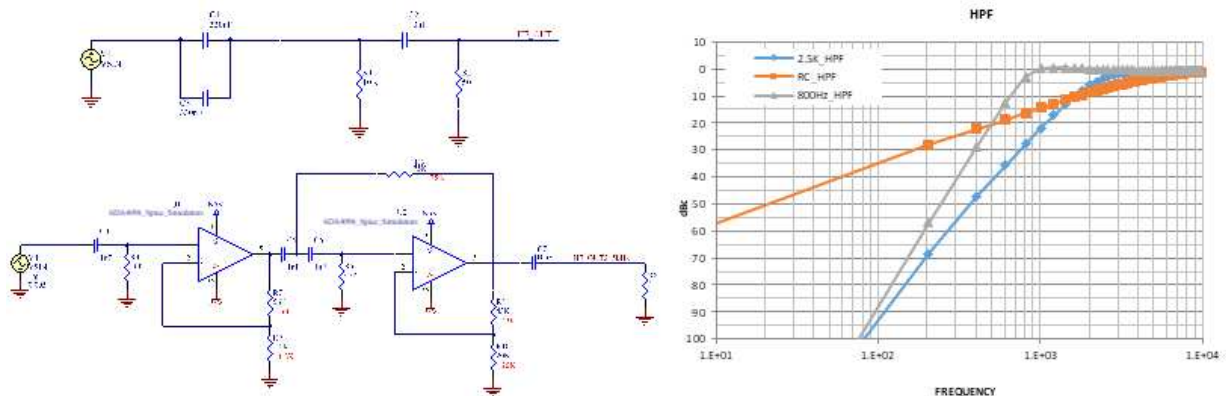


그림 53 고역통과여파기 시뮬레이션 결과

다음 그림은 RF 수신기의 Budget 설계이다.

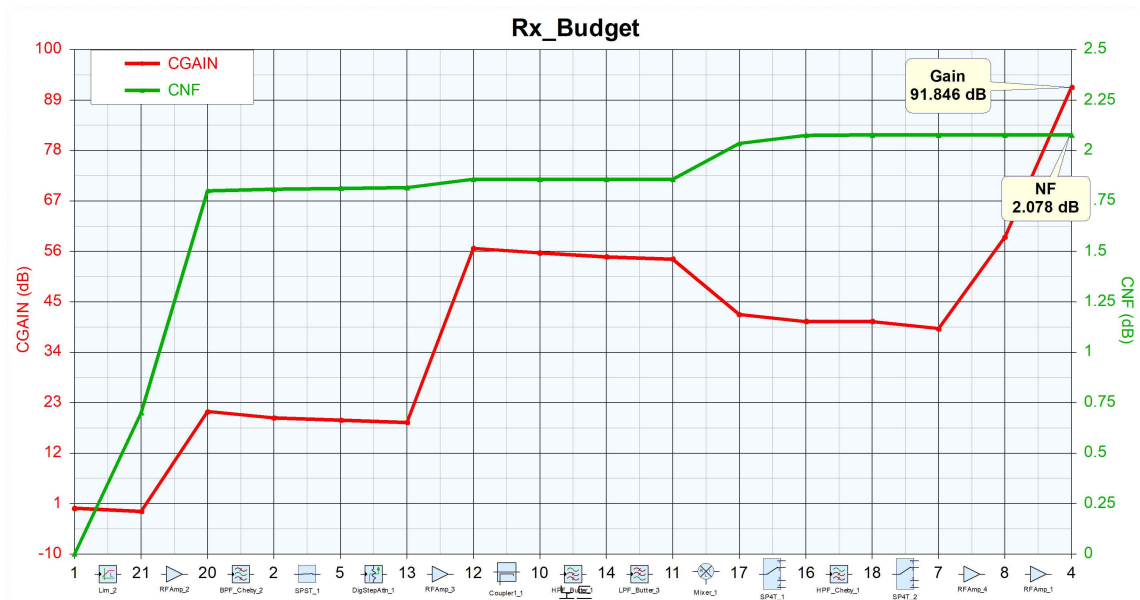


그림 54 RF 수신 Budget 설계

다음 그림은 RF 송수신기 PCB 형상임 RF출력 파워 및 주파수를 고려하여 내부 차단벽등을 설계에 반영 하여 제작 하였다.

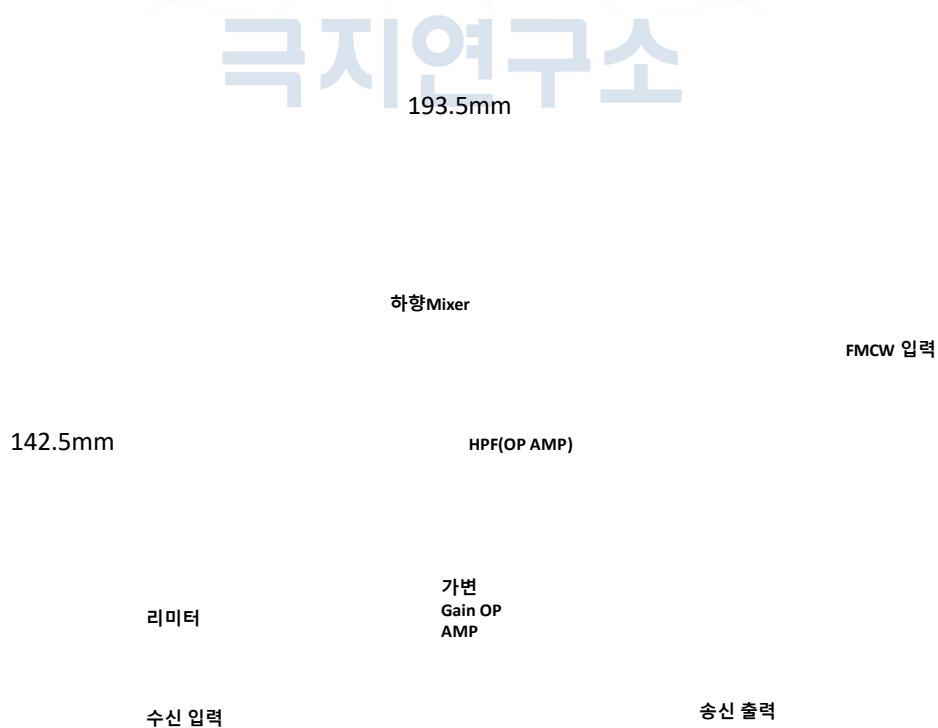


그림 55 RF 송수신기 PCB 형상

RF송수신기 PCB의 적층구조는 4층으로 구성 되어 있으며 다음 그림과 같다.

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01mm	3.5	
1	TOP		Signal	Toz	0.036mm		
	Dielectric 1	FR-4	Core		0.4mm	4.6	
2	GND		Signal	Toz	0.036mm		
	Dielectric 3		Prepreg		0.2mm	4.2	
3	POWER		Signal	Toz	0.036mm		
	Dielectric 4	FR-4	Core		0.4mm	4.2	
4	BOTTOM		Signal	Toz	0.036mm		
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01mm	3.5	
	Bottom Overlay		Overlay				



그림 56 PCB 적층 구조 및 50Ω 라인 계산

다. 빙하구조분석레이다용 안테나

(1) 기계적 사양

항 목	사 양
크기	● 길이 700mm, 폭 700mm, 높이 370.mm (허용공차±3mm) ● Gain확장을 위한 부반사판 포함 시 길이 700mm, 폭 1030mm, 높이 370.mm, (허용공차±3mm)

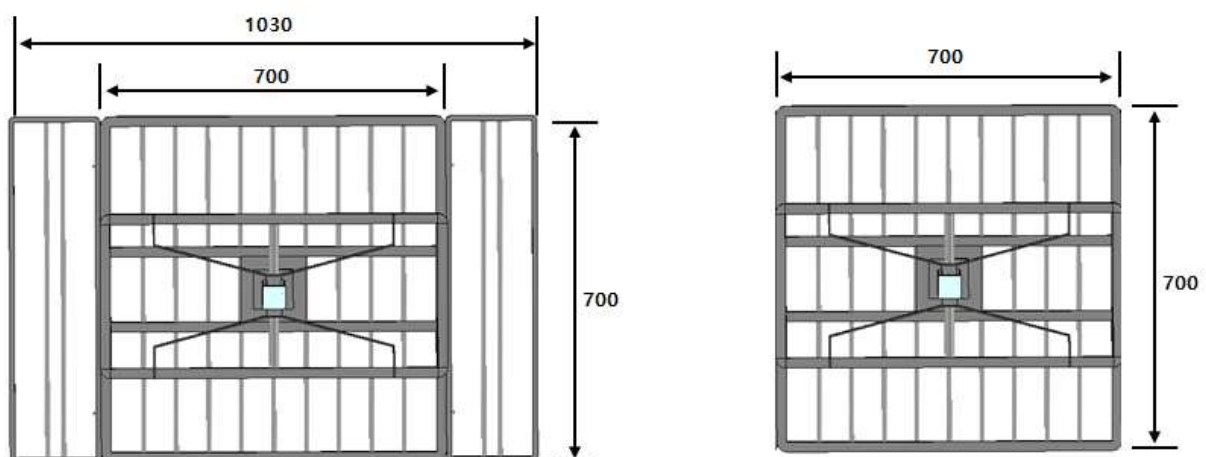
(2) 전기적 사양

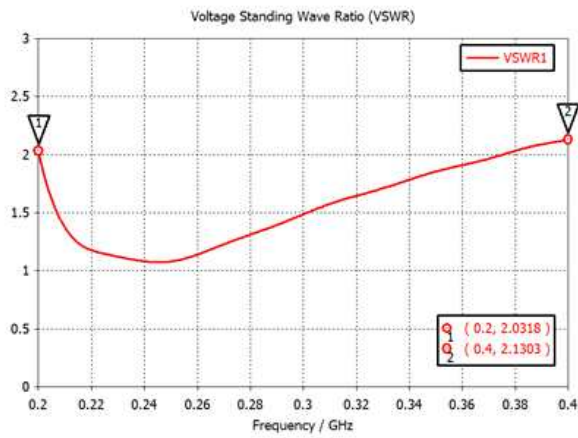
항 목	사 양
주파수	200MHz ~ 400MHz
이득	7.0dBi 이상
정재파비	1: 2.3이하

(3) 인터페이스

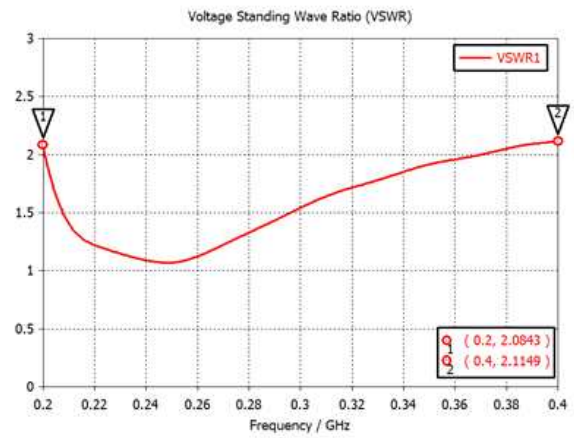
항 목	사 양
연결기	N Type

(4) 안테나 모의 분석





■ Reflector size [700mm] max 2.13:1



■ Reflector size [1030mm] max 2.11:1

그림 58 반사판 크기에 따른 정재파비 변화 모의 분석

No	Freq[MHz]	Reflector size[mm]		비고
		700	1030	
1	200	8.02	8.04	
2	210	8.7	9.13	
3	220	8.76	9.43	
4	225	8.68	9.38	
5	250	8.7	9.02	
6	275	8.65	9.23	
7	300	8.71	9.06	
8	350	8.47	8.89	
9	375	8.37	8.7	
10	400	8.14	8.85	

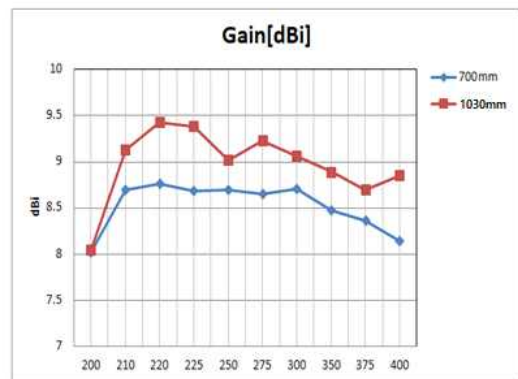


그림 59 반사판 크기에 따른 안테나 이득 변화 모의 분석

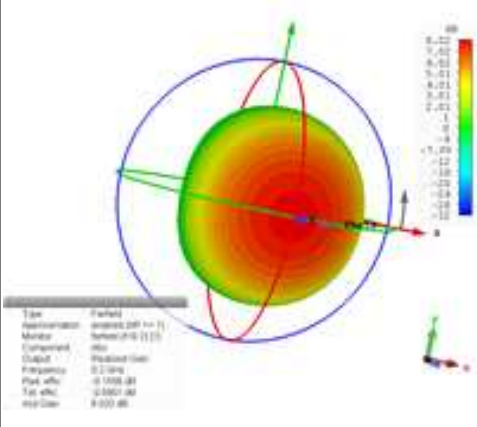
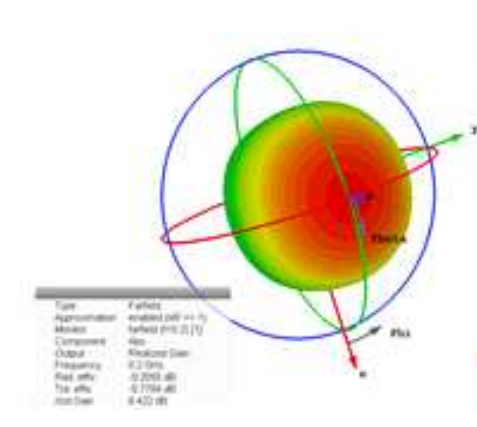
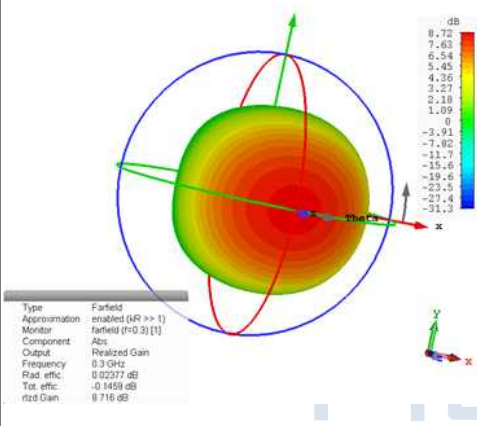
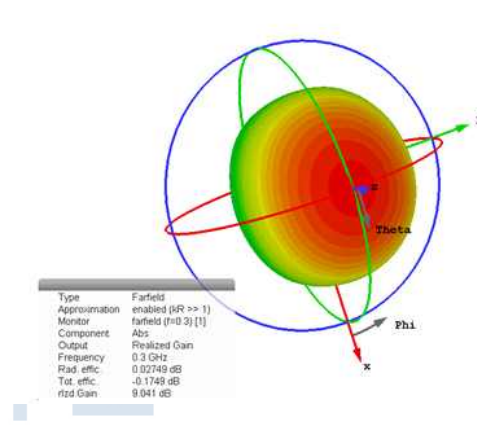
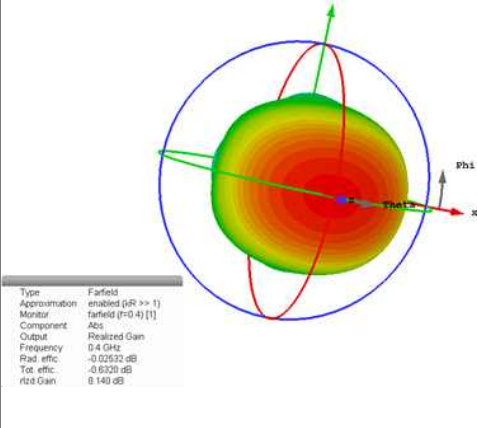
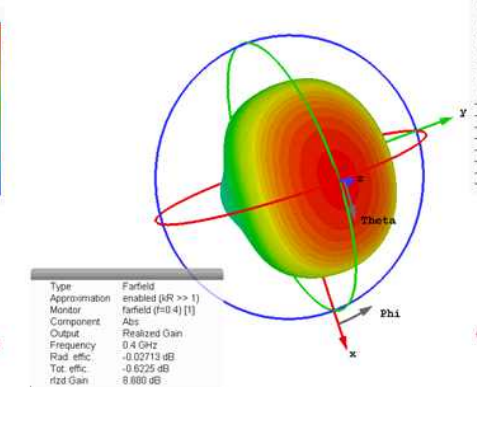
주파수	Reflector size 700mm	Reflector size 1030mm
200 [MHZ]	 Type: Farfield Approximation: enabled (R >> 1) Monitor: farfield (r=0.3) [1] Component: Abs Output: Realized Gain Frequency: 0.2 GHz Rad. eff.: 0.1088 dB Tot. eff.: 0.0001 dB rtd Gain: 8.00 dB	 Type: Farfield Approximation: enabled (R >> 1) Monitor: farfield (r=0.3) [1] Component: Abs Output: Realized Gain Frequency: 0.2 GHz Rad. eff.: 0.2093 dB Tot. eff.: 0.1794 dB rtd Gain: 8.42 dB
300 [MHZ]	 Type: Farfield Approximation: enabled (R >> 1) Monitor: farfield (r=0.3) [1] Component: Abs Output: Realized Gain Frequency: 0.3 GHz Rad. eff.: 0.0277 dB Tot. eff.: 0.1459 dB rtd Gain: 8.72 dB	 Type: Farfield Approximation: enabled (R >> 1) Monitor: farfield (r=0.3) [1] Component: Abs Output: Realized Gain Frequency: 0.3 GHz Rad. eff.: 0.02749 dB Tot. eff.: 0.1749 dB rtd Gain: 9.04 dB
400 [MHZ]	 Type: Farfield Approximation: enabled (R >> 1) Monitor: farfield (r=0.4) [1] Component: Abs Output: Realized Gain Frequency: 0.4 GHz Rad. eff.: -0.02632 dB Tot. eff.: 0.140 dB	 Type: Farfield Approximation: enabled (R >> 1) Monitor: farfield (r=0.4) [1] Component: Abs Output: Realized Gain Frequency: 0.4 GHz Rad. eff.: -0.02713 dB Tot. eff.: 0.6225 dB rtd Gain: 8.68 dB

표 6 반사판 크기에 따른 안테나 빔포밍 패턴 모의 분석

(5) 안테나 설계 및 제작

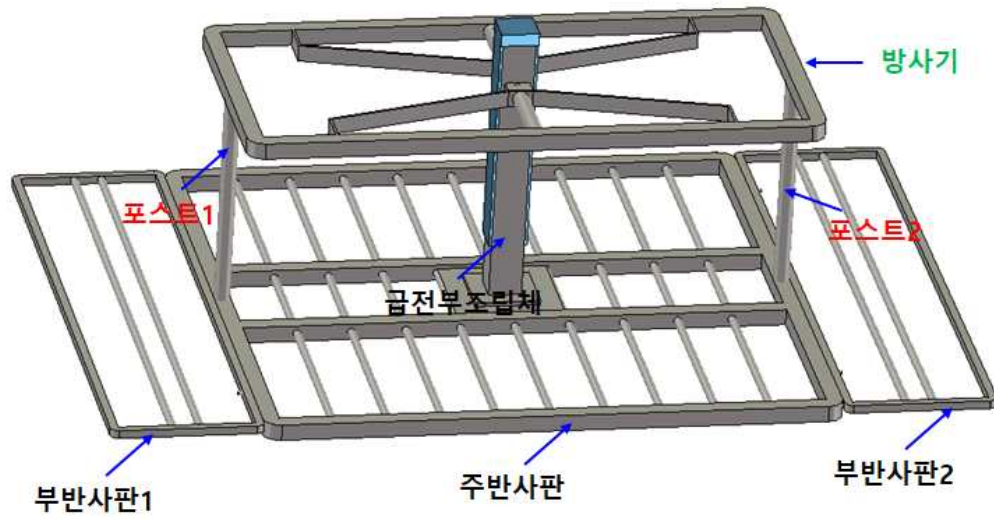


그림 63 3D 설계형상



그림 64 안테나 제작 형상, 아랫면



그림 65 안테나 제작 형상, 윗면

라. 빙하구조분석레이다 전시기 및 외부 인터페이스

(1) 운용 및 운용프로그램

극지 빙하구조분석레이다 설치 후 ON/OFF 스위치의 커버를 열고 스위치를 ON, 이후 약 3초에서 5초 후에 ON/OFF 스위치의 LED가 점등됨, LED의 점등은 송수신기의 PLL이 LOCK가 완료된 상태임. LNA 통신 케이블이 전시기(PC)에 연결된 상태에서 IP 주소 설정은 다음 그림과 같다.

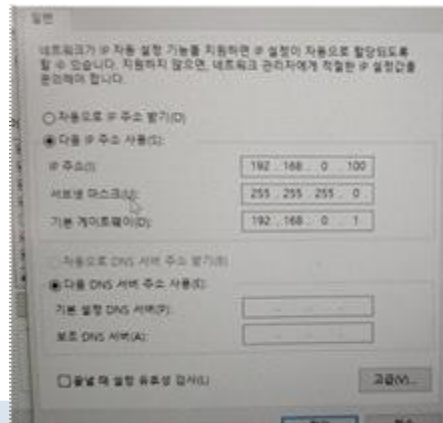


그림 66 IP 주소 설정

ON/OFF 스위치 ON 이후 약 1분 대기후 운용 프로그램을 실행시킨다(운용프로그램의 위치는 바탕화면의 IPR_UTEL\GUNLBAND_TEST_191025.exe를 실행시킨다) 운용프로그램은 다음 그림과 같다.

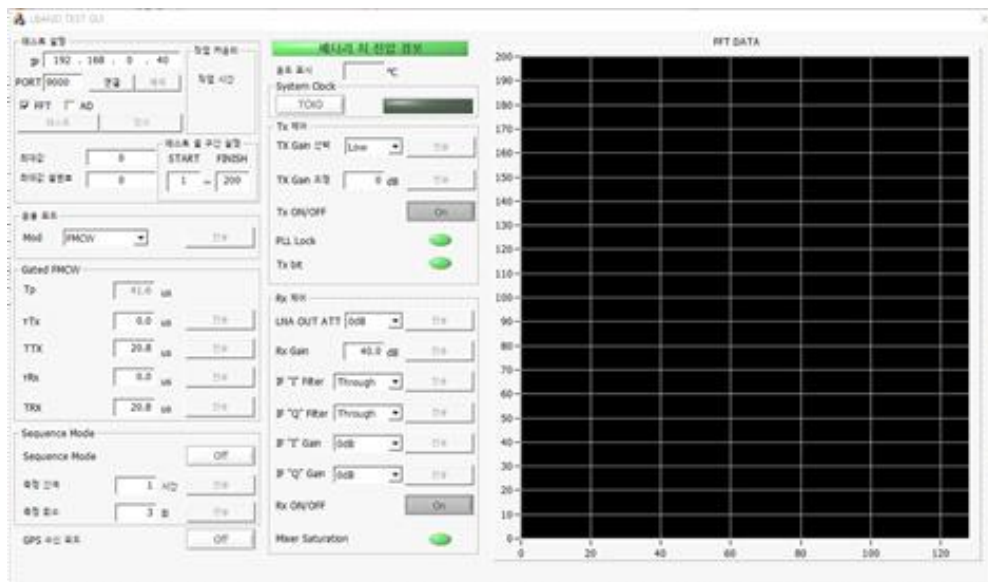


그림 67 실행 운용프로그램

(가) 운용프로그램 동작 설명

① 테스트 설정

빙하구조분석레이다 현장 설치 후 외부 ON/OFF 스위치 덮개를 열고 스위치를 눌러 ON 상태로 진입 한다. 1분경과 후 운용프로그램의 좌측 상단 연결 버튼을 클릭한다, 클릭 후 운용프로그램의 모든 모듈이 활성화 된다. 서버 접속 실패 창이 열리면 LAN 통신 케이블 연결을 확인하고 ON/OFF 스위치 ON 이후에 1분경과 되었는지를 확인 한다. 운용프로그램 세팅이 후 10초간의 수신 DATA를 확인하려면 다음 그림과 같이 AD 박스 체크 설정 하고 테스트 버튼을 클릭한다, 클릭 후 1분 동안 운용프로그램은 활성화되지 않는다. (10초 방사 후 획득된 raw data가 전시기(PC)에 CSV 파일 형태로 저장될 때까지의 소요시간 1분). 측정된 DATA는 \IPR_UTEL\GUI\ RawData 에 Raw_Data_AD_xxxxxxxxxxxxxx. CSV의 형식으로 저장 된다.



그림 68 AD 선택 테스트

② 운용 모드

운용 모드는 FMCW, FMICW(Gated FMCW) 및 CW를 사용할 수 있으며 운용 상태선택 후 전송을 클릭하여야 한다. FMICW(Gated FMCW)선택 시 송수신 타이밍은 선택은 다음 그림과 같으며 모든 선택 항목은 선택 후 전송을 클릭하여야 한다.

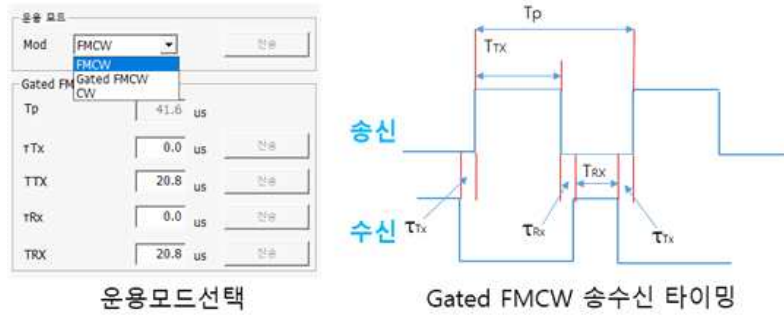


그림 69 운용모드 선택

③ Sequence Mode

Sequence Mode 사용은 측정 간격과 측정 횟수를 지정할 수 있다. 측정회수는 10초의 측정 단위를 1회로 하며 1회의 측정 DAT를 SD카드에 저장되는 시간은 1분이다, Sequence Mode의 세팅 순서는 다음과 같다.

‘모든 운용프로그램 변수를 선택 →측정 횟수 선택 후 전송 클릭→측정 횟수 선택(1시간 단위로만 선택) 후 전송 클릭→Sequence Mode ON 클릭→10초 대기 후 극지 빙하구조분석레이다 본체의 ON/OFF 스위치를 OFF 후 다시 ON→레이다 본체의 ON/OFF 스위치에 LED 점등 확인→LAN 통신 케이블 분리’

Sequence Mode의 사용 시의 타이밍은 다음 그림과 같다.

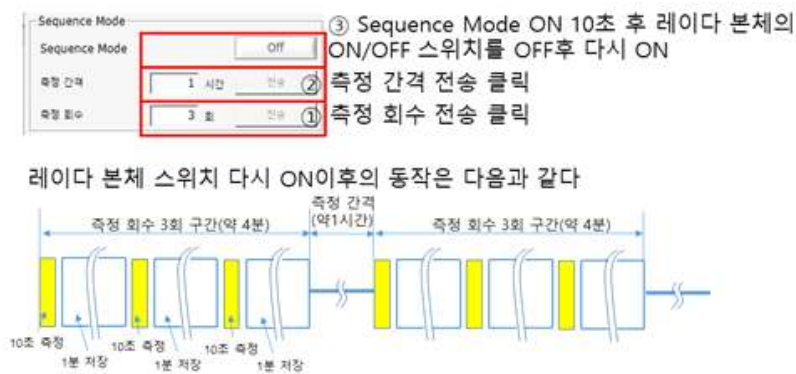


그림 70 Sequence Mode의 사용

Sequence Mode 사용 후 측정 DATA의 회수는 다음과 같다.

‘LAN 통신 케이블을 레이다 본체의 LAN(PC)에 연결한다.→레이다 본체의 ON/OFF 스위치

를 OFF 후 다시 ON 한다.→ LBAND_TEST_191025.exe를 실행시킨다. 1분 후 운용프로그램의 테스트 설정의 연결을 클릭 한다.→Sequence Mode를 OFF 시킨다.→ 바탕화면 \IPR_UTEL\WinSCP-5.9.6-Portable\WinSCP.exe를 실행→ WinSCP의 오른쪽 창의 측정 DATA를 전시기(PC)로 복사'



그림 71 WinSCP.exe 실행

④ System Clock

극지 빙하구조분석레이다의 System Clock은 TCXO와 OCXO를 선택하여 사용할 수 있으며 OCXO 선택 시 Warm-UP 시간이 2분 소요되고 OCXO의 안정도는 $\pm 5\text{ppb}$ 이다.

⑤ Tx 제어

극지 빙하구조분석레이다 Tx 제어는 다음 그림과 같다

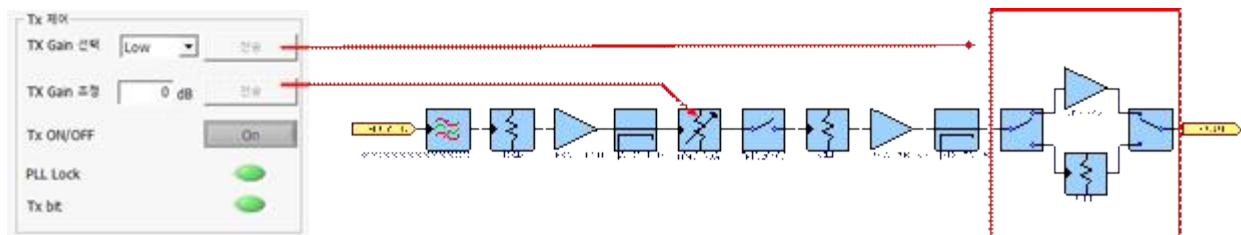


그림 72 Tx제어

TX Gain은 Low와 High를 선택할 수 있으며, TX Gain 선택 Low는 TX Gain 조정 -18dB~+6dB(+2dBm~+26dBm, 기본0dB는 +20dBm출력), TX Gain 선택 High는 TX Gain 조정 -18dB~+5dB(+17dBm~+40dBm, 기본0dB는 +35dBm출력)를 조정할 수 있다

⑥ Rx 제어

극지 빙하구조분석레이다 Tx 제어는 다음 그림과 같다. LNA OUT ATT는 +20dB Gain의 LNA 출력단에 -15dB를 감쇠할 수 있고 Rx Gain은 가변 Gain Amp를 조정하여 8dB~40dB을

조정할 수 있다. IF I Filter의 선택은 Through, RC Filter, 2.5KHz, 800Hz 의 고역 통과 필터를 선택할 수 있다, 2.5KHz, 800Hz 고역 통과 필터는 OP AMP 필터이다. IF Gain은 가변 Gain OPAMP로 구성 된다.

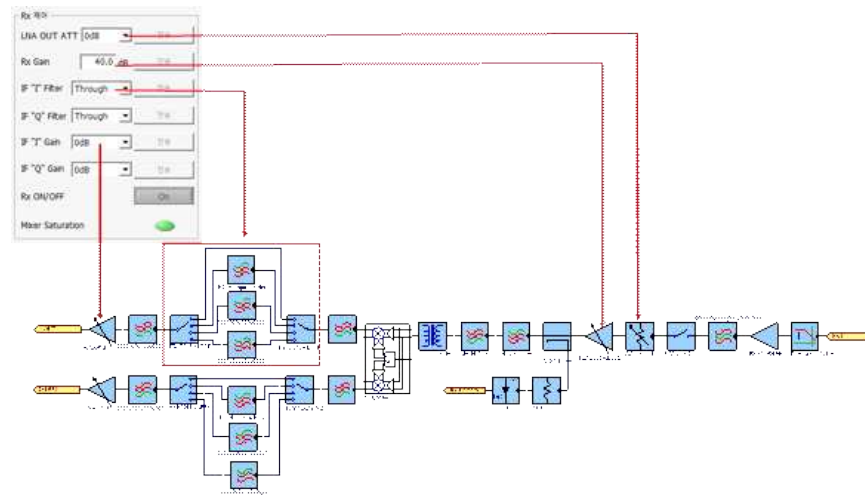


그림 73 Rx제어

(2) 송수신기 외부 연결기 구성



그림 74 연결기의 위치 및 연결순서

- ① LAN(PC): LAN 통신 케이블 OS-2881-002를 사용 하여 전시기(PC)와 연결한다.
- ② GPS: GPS Antenna 케이블을 사용하여 GPS Antenna(AKA350)에 연결한다. GPS는 필요에 따라 GPS를 사용할 때만 연결한다.
- ③ Tx: Antenna 케이블 PL800-NMNM-6M를 사용하여 Skeleton Slot Antenna와 연결한다.
- ④ Rx: Antenna 케이블 PL800-NMNM-6M를 사용하여 Skeleton Slot Antenna와 연결한다.
- ⑤ Battery IN : 배터리 케이블 OS-2881-004를 사용하여 배터리(군용 리튬이온전지팩) LB718-1180W-MIL에 연결한다. 상용주의사항 3.2 배터리 및 전원 관련의 내용과 같이 케이블의 커넥터를 구분하여 연결할 것.
- ⑥ 기타 포트: 기타 포트는 수신 최종 출력되는 “I”, “Q”, 1초 액티브 LOW TRIGGER 출력, 24kHz CLK 출력, 10MHz 출력을 필요에 따라 DAQ 등에 연결할 수 있다.

(3) 케이블 및 연결기 체결 주의 사항

극지 빙하구조분석레이다 본체 및 배터리의 연결기 덮개는 물기 및 눈/얼음에 오염되지 않도록 관리 되어야 하며 이더넷용 케이블의 연결기가 빙하구조분석레이다 본체 연결기와 연결 시 다음 그림과 같이 적색의 띠가 보이지 않고 올바르게 체결 되도록 하여야 한다.



그림 75 LAN 통신 커넥터 체결

극지 빙하구조분석레이다 본체의 GPS 안테나 연결기는 +3.3V 전압이 출력되므로 그라운드와 물리적 쇼트가 나지 않도록 주의 하여야 한다. 운용 중에는 케이스 내부에 있는 GPS 수신기를 꺼내어 연결기에 연결 한다.

극지연구소

제5절 빙하구조분석레이다 시험장치설계 및 제작

1. 기계적 사양

항 목	사양
크기	482.6 x 265.9 x 500 [mm]

2. 전기적 요구 사양

항 목	요구사양
입출력	입력 주파수 0.3±0.2[GHz] 입력 레벨 +20[dBm], +40[dBm] 출력 이득 평탄도 ±1 [dB]
시스템 손실 모의 기능	최대 -93[dB] 수동 감쇄제어 (고정 감쇄기 포함 -173[dB])
시스템 손실 모의 기능	원거리 1km, 3km 신호 지연 경로 제공 최대 32종의 신호지연 모사 조정 가능

3. 빙하구조분석레이다 설계 및 제작

가. 시험장치 개념 블록도

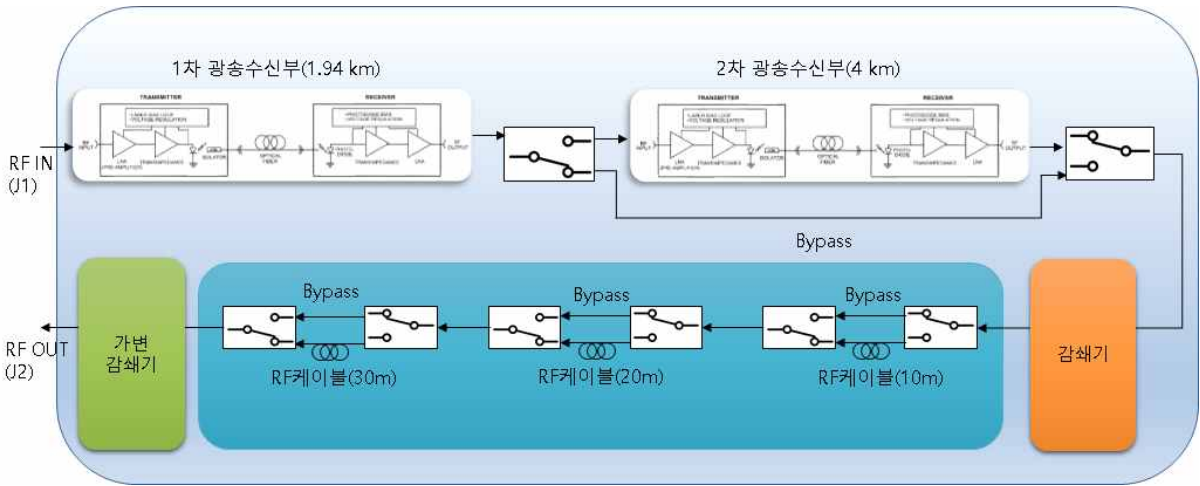


그림 76 빙하구조분석레이다 시험장치 구성도

나. 빙하구조분석레이다 시험장치 시스템 버짓도

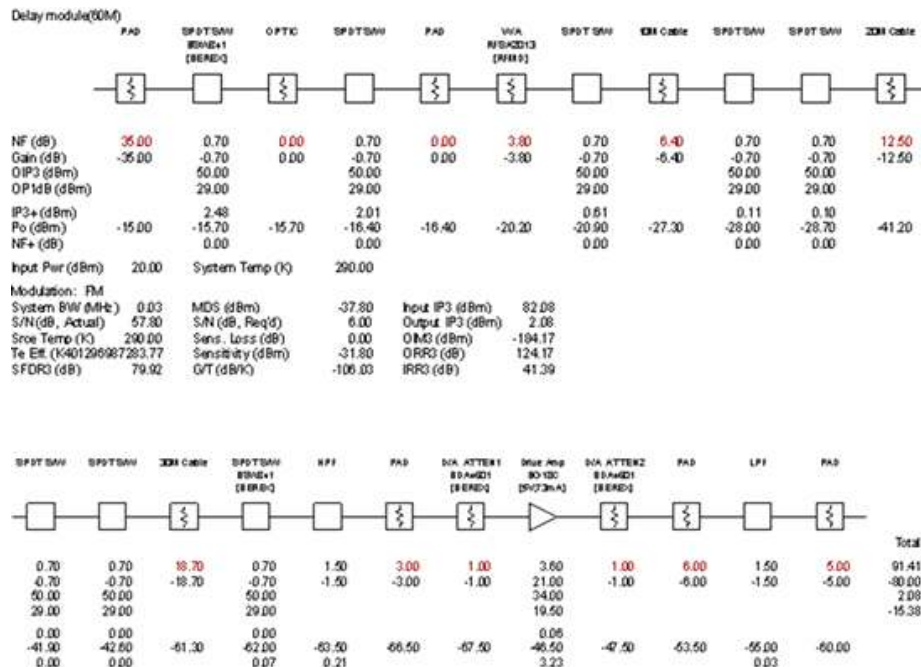


그림 77. 시험장치 시스템 버짓도

다. 빙하구조분석레이다 시험장치 신호지연 모사

파라미터	값(단위)
자유공간 빛의 속도	299792458 [m/s]
빙하 매질 유전율(Er)	3.3 [-]
매질 전파속도	165030317 [m/s]
주파수	300 [MHz]
주파수 대역폭	200 [MHz]
대역폭 변조 시간	1[ms]

표 7 빙하에서의 Beat주파수 계산을 위한 파라미터

타겟 거리[M]	왕복 이동 거리[M]	걸린 시간[nS]	Beat Frequency[KHz]
100	200	1,212	0.24
200	400	2,424	0.48
300	600	3,636	0.73
400	800	4,848	0.97
500	1000	6,059	1.21
600	1200	7,271	1.45
700	1400	8,483	1.70
900	1800	10,907	2.18
970	1940	11,755	2.35
975	1950	11,816	2.36
985	1970	11,937	2.39
1000	2000	12,119	2.42
1100	2200	13,331	2.67
1200	2400	14,543	2.91
1300	2600	15,755	3.15
1400	2800	16,967	3.39
1500	3000	18,178	3.64
1600	3200	19,390	3.88
1700	3400	20,602	4.12
1800	3600	21,814	4.36
1900	3800	23,026	4.61
2000	4000	24,238	4.85
2100	4200	25,450	5.09
2200	4400	26,662	5.33
2300	4600	27,874	5.57
2400	4800	29,086	5.82
2500	5000	30,297	6.06
2600	5200	31,509	6.30
2700	5400	32,721	6.54
2800	5600	33,933	6.79
2900	5800	35,145	7.03
3000	6000	36,357	7.27
3100	6200	37,569	7.51
3200	6400	38,781	7.76
3300	6600	39,993	8.00
3400	6800	41,205	8.24
3500	7000	42,416	8.48
3600	7200	43,628	8.73
3700	7400	44,840	8.97
3800	7600	46,052	9.21
3900	7800	47,264	9.45
4000	8000	48,476	9.70

표 8. 빙하유전율을 고려한 전파 이동 시간과 Beat 주파수

시간	자유공간 전파이동거리	케이블 전기적 환산길이	케이블 타입
61[ns]	10 [m]	12.63 [M]	테프론 RF케이블
121[ns]	20 [m]	25.25 [M]	테프론 RF케이블
182[ns]	30 [m]	37.88 [M]	테프론 RF케이블
11755[ns]	1,940 [m]	2,403 [M]	광케이블
24238[ns]	4,000 [m]	4,940 [M]	광케이블

표 9. 케이블을 이용한 전파 지연 모사

라. 빙하구조분석레이다 시험장치 형상

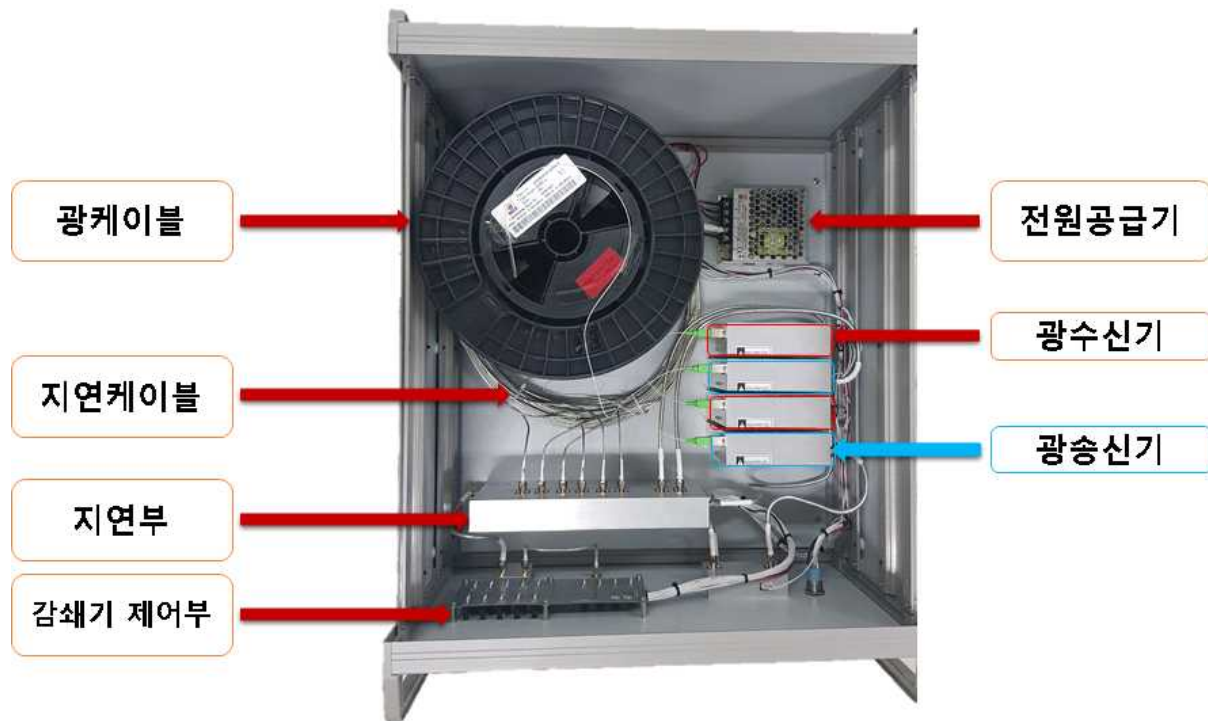


그림 78 시험장치 내부 제작 형상



그림 79 시험장치 외부 제작 형상

4. 빙하구조분석레이다 시험장치 전기적 성능 측정

No	요구사항	규격 값		측정값
1	입출력 주파수	200MHz ~ 400MHz		200 ~ 400MHz
2	출력 레벨	dBm		-58.32
3	평탄도	±1dB		0.83
4	감쇄기 정확도	감쇄기_1 + 감쇄기_2 조합	5dB	-5.06
			10dB	-10.16
			15dB	-15.08
			20dB	-20.2
			25dB	-25.21
			30dB	-30.22
			35dB	-35.34
			40dB	-40.64
			45dB	-45.66

			50dB	-50.84
			55dB	-55.75
			60dB	-60.74
		감쇄기_1 + 감쇄기_3 조합	5dB	-5.06
			10dB	-10.16
			15dB	-15.08
			20dB	-20.2
			25dB	-25.21
			30dB	-30.22
			35dB	-35.2
			40dB	-40.54
			45dB	-45.58
			50dB	-50.91
			55dB	-55.74
			60dB	-61.46
5	지연시간 측정	OPTIC_1(1.94km)	us	13.56
		OPTIC_1(1.94km) +10m(1.95km)		13.621
		OPTIC_1(1.94km) +20m(1.96km)		13.679
		OPTIC_1(1.94km) +30m(1.97km)		13.739
		OPTIC_1(1.94km) +10m+30m(1.98km)		13.8
		OPTIC_1(1.94km) +20m+30m(1.99km)		13.858
		OPTIC_1(1.94km) +10m+20m+30m(2km)		13.919
		OPTIC_1(1.94km) +10m+20m+30m(2km)+OP TIC_2(4km) 6km		39.119

표 10 시험장치 전기적 성능 측정 결과

5. 빙하구조분석레이다 시험장치 운용방법



그림 80 시험기구 형상

1 입력 감쇄기



1. 입력레벨이 +30dBm 이하 일때 **30dB**로 설정한다.
2. 입력레벨이 +40 ~ +31dBm 일때는 **50dB**로 설정한다.

그림 81 입력감쇄기

2 전원



1. 빙하레이다 시험장치 전원 ON/OFF 스위치다.
2. 푸쉬 방식이며 ON시 파란색으로 점등된다.

그림 82 전원

3 RF입력



1. RF입력 PORT이다.
2. 입력 주파수는 200MHz ~ 400MHz이다.
3. 입력 레벨은 +20dBm ~ +40dBm이다.

그림 83 RF 입력

4 RF출력



1. RF출력 PORT이다.
2. 출력 주파수는 200MHz ~ 400MHz이다.
3. 출력 레벨은 -60dBm ~ -120dBm이다.

그림 84 RF 출력

5 지연부



1. OPTIC_2 스위치는 추가로 4km를 시간지연할때 사용한다.
(기본 1.94km 시간지연, 전체 ON시 6km시간지연 가능)
2. 10M 스위치는 10m를 시간지연할때 사용한다.
3. 20M 스위치는 20m를 시간지연할때 사용한다.
4. 30M 스위치는 30m를 시간지연할때 사용한다.

* 스위치 ON시 녹색불 점등

그림 85 지연부

6 출력 감쇄기_1



1. 출력레벨을 감쇄할때 사용한다.
2. 1dB STEP으로 감쇄가 가능하다.
3. 총 31dB 감쇄가 가능하다.

* 스위치 ON시 녹색불 점등

그림 86 출력 감쇄기1

6 출력 감쇄기_2



1. 출력레벨을 감쇄할때 사용한다.
 2. 1dB STEP으로 감쇄가 가능하다.
 3. 총 31dB 감쇄가 가능하다.
- * 스위치 ON시 녹색불 점등

그림 87 출력 감쇄기2

7 출력 감쇄기_3



1. 출력레벨을 감쇄할때 사용한다.
 2. 1dB STEP으로 감쇄가 가능하다.
 3. 총 31dB 감쇄가 가능하다.
- * 스위치 ON시 녹색불 점등

그림 88 출력 감쇄기3

9 AC 220V



1. AC 220V 입력 PORT이다.
2. 입력범위는 85 ~ 264VAC이다.

그림 89 AC220V

6. 극지 현장 시험 및 결과

빙하구조분석 레이더 극지 현장 시험계획

- 활동지역 : (남극장보고과학기지 주변 Campbell Glacier)
- Campbell 빙하 지역에서 기존 레이더 탐사 측선(파란색 라인)에서 레이더 탐사
- 기간 : 2018.10.30.~2018.11.06 / 2019.11.01.~2019.11.10

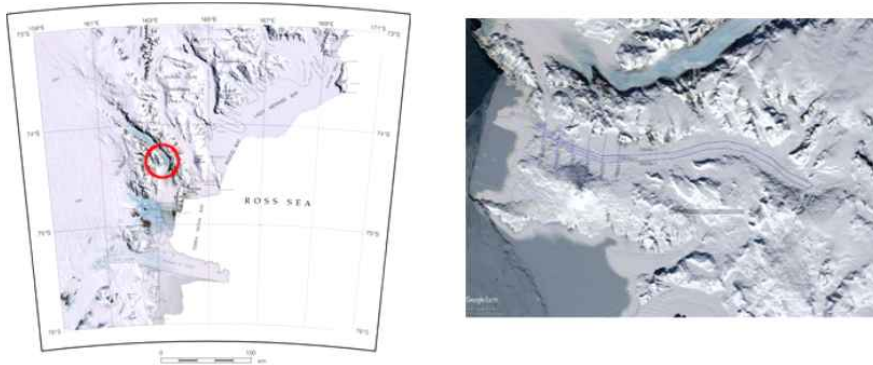


그림 90 남극 연구 활동 지역



그림 91 남극 1차,2차 현지 시험 수행

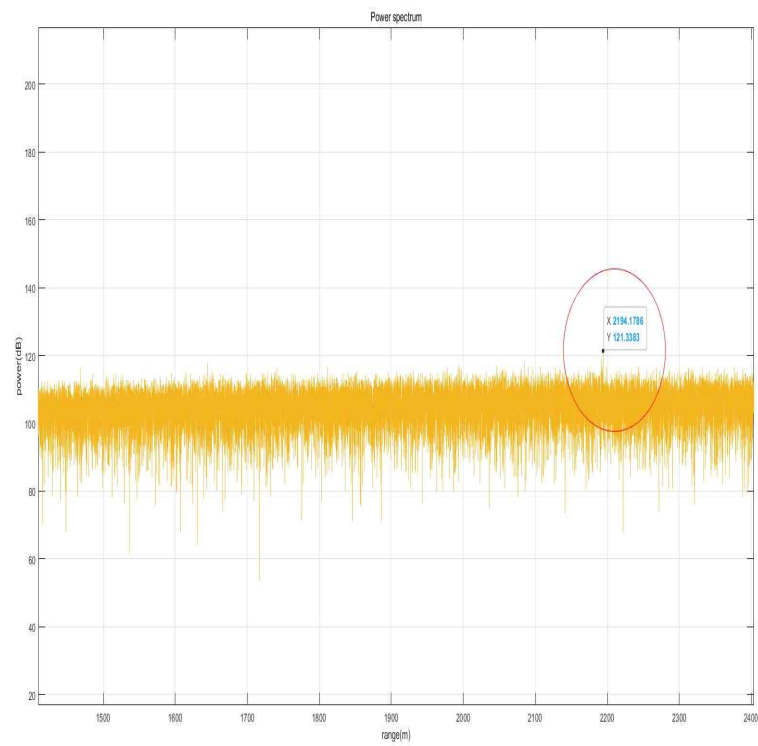
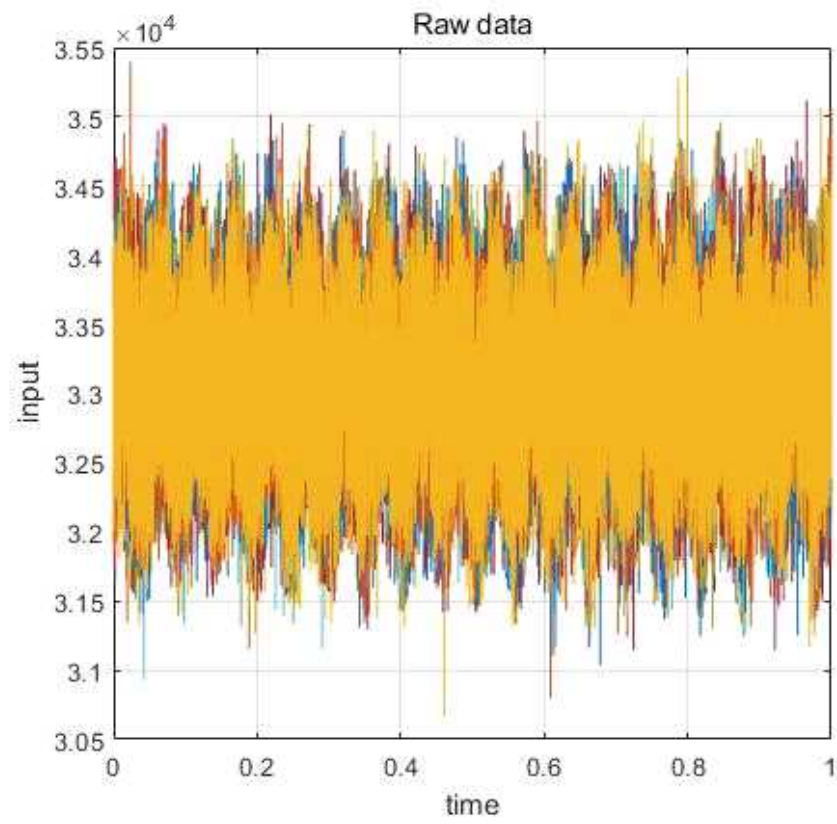


그림 92 남극 2km 지점 타겟 신호 검출 결과.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 최종목표

1. 최종목표

가. 빙하구조 탐사 레이더 개발

나. 레이더 신호수집 및 빙하구조 분석 소프트웨어 개발

다. End Product

(1) FMCW 지반탐사 레이더 HW(본체 및 안테나)

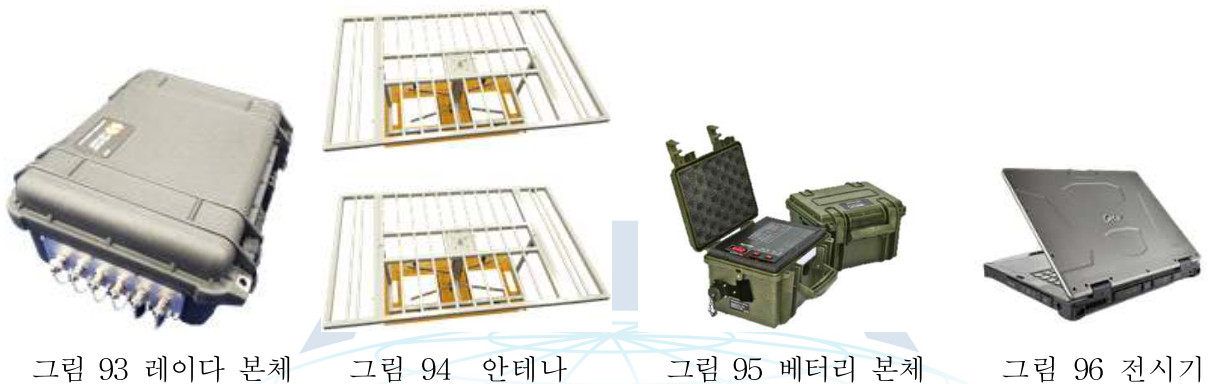


그림 93 레이더 본체

그림 94 안테나

그림 95 배터리 본체

그림 96 전시기

(2) 지반탐사 레이더 신호수집 SW(탐재형SW)

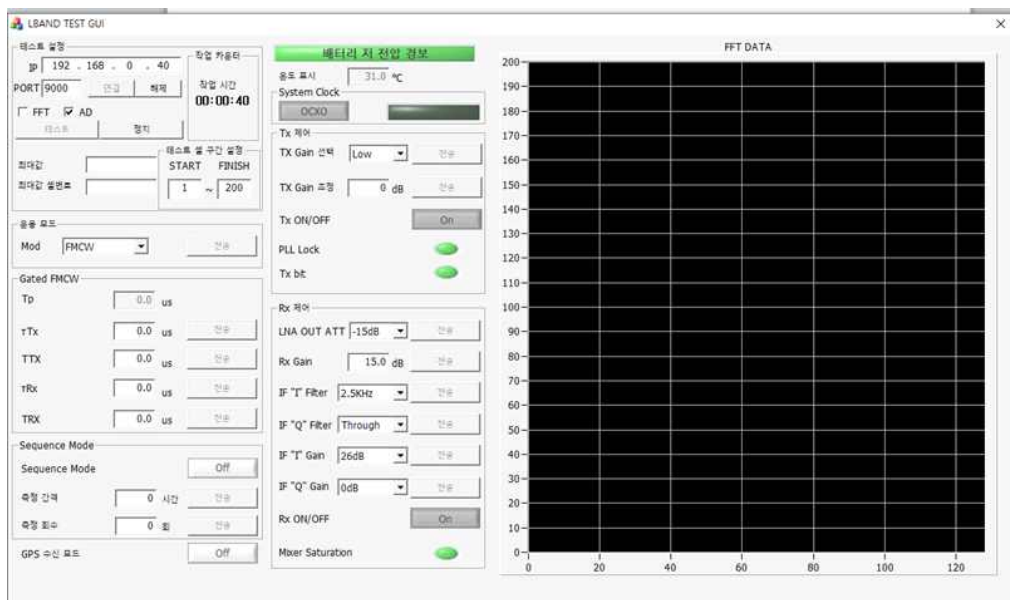


그림 97. 운용 프로그램, 신호수집 SW(탐재형SW)

(3) 지반구조 분석 알고리즘 SW

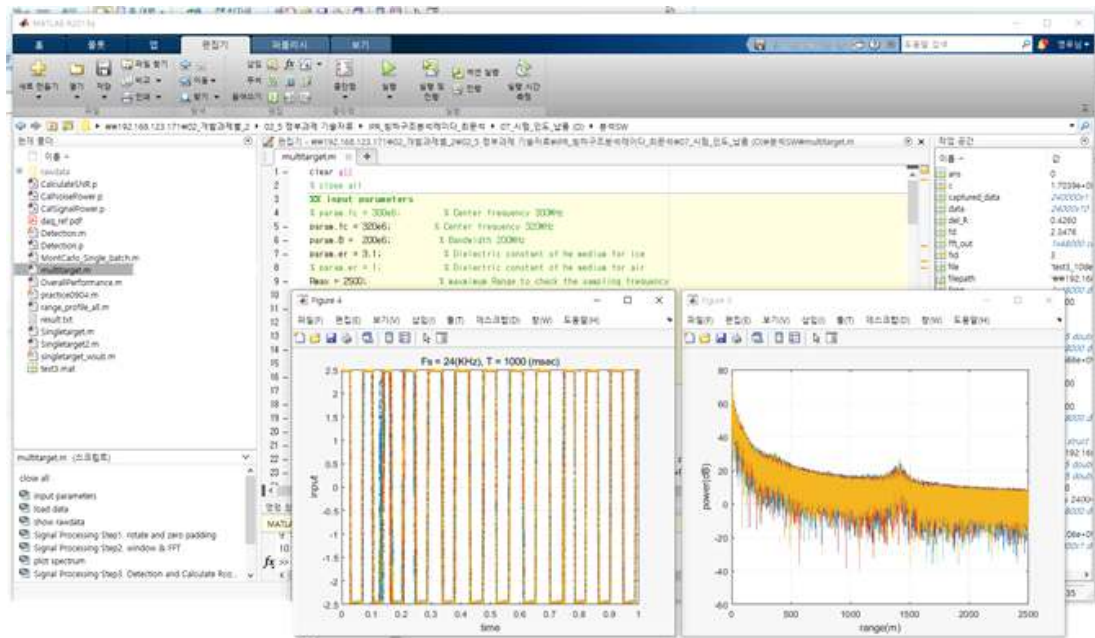


그림 98 구조 분석 알고리즘 SW

2. 핵심 기술

- 가. 저 전력 FMCW 레이다 송수신장치 설계/제작 기술
- 나. 안테나 설계/제작 기술
- 다. 파형설계 및 신호분석 기술

3. 적용범위(또는 서비스)

- 가. 빙하구조 탐사
- 나. 지반구조 탐사

4. 세부목표

- 가. 주요 기능(또는 규격)
 - (1) 주·야간 운용이 가능한 레이다 신호 수집 기능
 - (2) 출력레벨 변환 기능 (20dBm/40dBm)

5. 목표 성능

항 목	목표 성능	개발 결과	비고
송신대역폭 및 송신시간	대역폭 : 200~400 MHz 송신시간(펄스주기) : up to 1(sec)	대역폭 : 200~400 MHz 송신시간(펄스주기) : up to 1(sec) with FMICW	
출력레벨	20dBm/40dBm 가변운용	21dBm/41.3dBm 가변운용	
최대송달 탐지거리	Up to 4km (at 40dBm)	3.27km(at 20dBm)	시험장비최대측정 조건
잡음지수	6dB이하 (at 20dBm / 40 dBm)	4.7dB	
안테나 이득	10dBi 이상	7.5dBi이상	안테나 크기와 극지 헬기 운송 용 이성 고려하여 7dBi이상으로 개발 (운용자 협의)
신호수집률	95 % 이상 (@2km depth)	100 % (@2km depth)	
가동 온도범위	- 40℃ ~ + 85℃	- 40℃ ~ + 85℃	
보호등급	IP67 이상	IP67 이상	
현장 운영안정성	MTBF 5000H 이상	MTBF 201,480H	
외부 인터페이스	GPS 데이터 동기화를 위한 외부 인터페이스 (LAN, 직 렬통신 외)	GPS 데이터 동기화를 위한 외부 인터페이스 (LAN, 직 렬통신 외)	
전원	자체 전원 보유(배터리 및 충전기)	자체 전원 보유(배터리 및 충전기)	

표 11 목표 성능

제2절 평가의 착안점 및 기준

1. 연구개발성과 및 평가 방법

가. 송신대역폭 및 송신 시간

주파수 300MHz, 대역폭 0.2GHz를 만족 유무 확인을 위해 실험실 계측장비를 통한 분석을 수행 하였다. 레이더 본체의 송신기 출력 단자에 감쇄기와 방향성 커플러 적용 후 RF케이블을 통해 방향성 커플러 출력단자는 신호분석기로 방향성 커플러의 커플링 단자는 오실로 스코프 로 연결 한다. 전원공급기 출력전압을 DC +24V로 설정하고 레이더 본체와 연결 한다. 전원공급기 ON후 레이더 본체를 동작 시키고 신호분석기에 측정된 결과가 주파수 300MHz, 대역폭 0.2GHz를 만족 하는지 확인. 오실로스코프에서 송신 변조시간이 1s를 만족 하는지 확인 한다.

수행한 결과는 신호분석기를 통해 중심주파수 300MHz기준 대역폭 0.2GHz을 만족함을 확인 하였고, 오실로스코프를 통해 송신시간 1s 만족함을 확인 하였다.

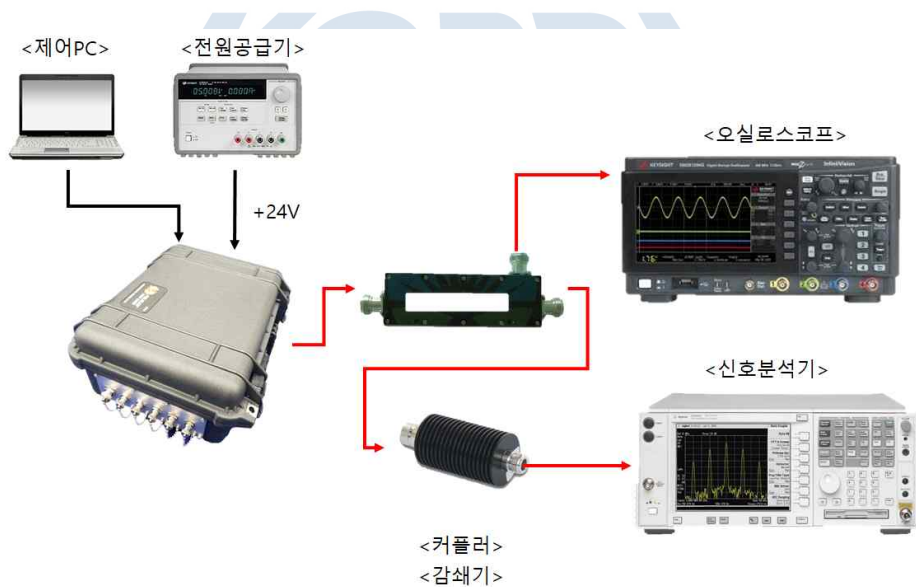


그림 99 송신대역폭 및 송신시간 시험 구성도

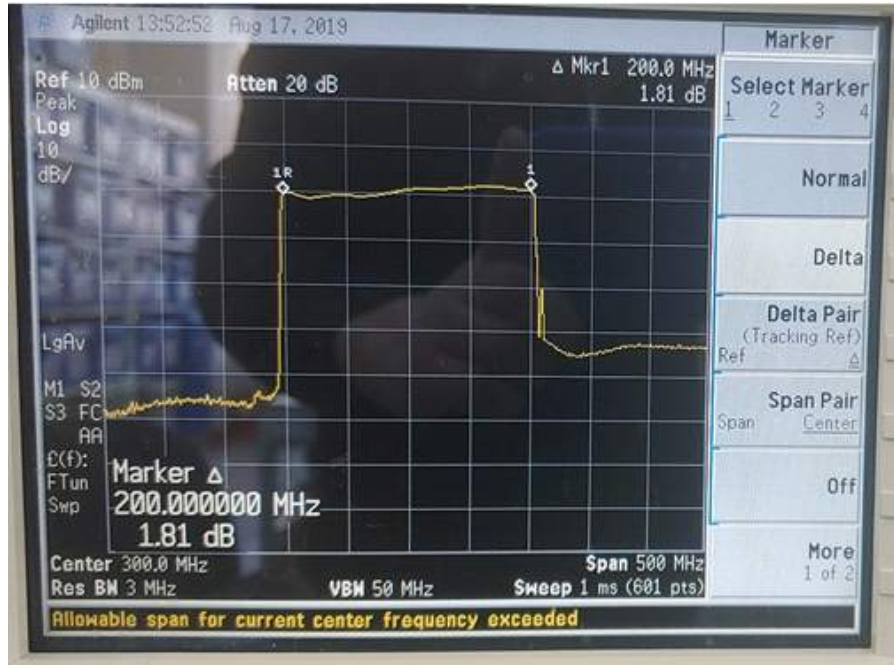


그림 100. 송신 출력 대역폭 측정 결과



그림 101 송신 시간 측정 결과

나. 출력레벨

RF 계측장비 파워미터를 이용하여 빙하구조분석레이다 송신기의 출력레벨이 +20dBm/+40dBm을 만족 하는지 분석 하였다. 레이다 본체의 송신기 출력 단자에 감쇄기와 방향성 커플러 적용 후 RF케이블을 통해 방향성 커플러 출력단자는 신호분석기로 연결 하여 모

니터링용으로 활용 한다. 방향성 커플러의 커플링 단자는 파워미터로 연결 한다. 전원공급기 출력전압을 DC +24V로 설정하고 레이다 본체와 연결 한다. 전원공급기 ON후 레이다 본체를 동작 시키고 파워미터에 측정된 Low Gain모드의 침투전력레벨이 + 20dBm 이상을 만족 하는 지 확인 한다. High Gain모드로 변환 후 침투전력레벨이 + 40dBm 이상을 만족 하는지 확인 한다.

수행한 결과는 파워미터를 이용하여 빙하구조분석레이다 송신기의 출력레벨이 +20dBm/+40dBm을 만족함을 확인 하였다.



그림 102 출력레벨 시험구성도

그림 103. Low Gain +20dBm 침투전력 측정 결과

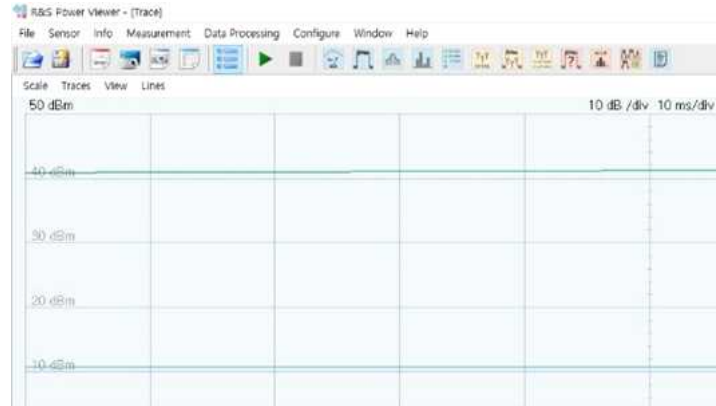


그림 104. High Gain +40dBm 침투전력 측정 결과

다. 최대송달 탐지거리

RF 계측장비 신호발생기를 이용하여 4km에 근접한 타겟 수신신호를 모사하여 레이더에 입력하고 레이더 수신기가 4km에 근접한 타겟 수신신호를 올바르게 출력 하는지 신호분석기를 통해 확인 한다.

빙하구조분석레이더 시험 장치를 이용하여 물리적 길이 3km를 모사하고 루프백 시험을 수행하여 물리적 길이 3km의 수신신호가 올바르게 수집되고, raw data로 저장 하는지 2차 분석 한다.

레이더 본체의 수신 IF 모니터링 단자를 RF케이블을 통해 신호분석기로 연결 한다. 빙하구조분석레이더 본체의 수신기 입력 단자에 RF케이블을 이용하여 신호발생기를 연결 한다. 전원 공급기 출력전압을 DC +24V로 설정하고 레이더 본체와 연결 한다. 전원공급기 ON후 레이더 본체를 동작 시킨다. 송신 주파수의 10kHz 오프셋 주파수를 신호발생기를 통해 수신기 입력 단자에 입력 한다. 신호분석기에 출력 되는 IF 주파수가 4km에 근접한 타겟 수신신호인지 확인 한다.

수행한 결과는 빙하구조분석레이더 수신기가 4km에 근접한 타겟의 수신신호를 올바르게 출력 하는 것을 확인 하였다.

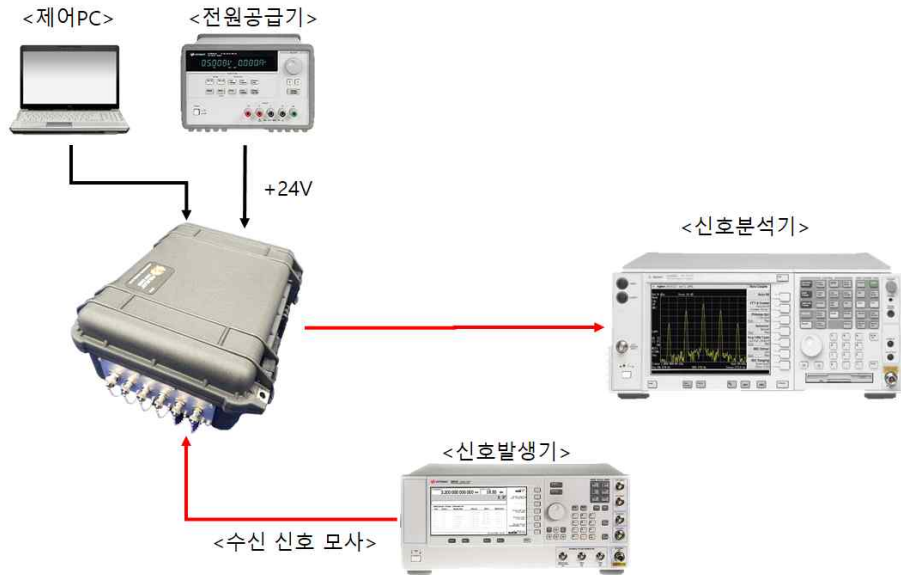


그림 105 최대송달 탐지거리 시험구성도1



그림 106. 최대송달거리 Beat 주파수 시험 결과

레이다 본체의 송신단자와 수신단자를 빙하구조분석레이다 시험 장치에 연결한다. 빙하구조 분석레이다 시험 장치의 전원을 켜고 모사 가능 최대거리(3.273km)를 설정한다. 전원공급기 출력전압을 DC +24V로 설정하고 레이다 본체와 연결 한다. 전원공급기 ON후 레이다 본체를 동작 시킨다. 루프백 시험을 수행 하여 수신신호가 올바르게 수집되고, raw data로 저장 하는지 2차 분석 한다.

수행한 결과는 빙하구조분석레이다 수신기가 3.273km 타겟의 수신신호를 올바르게 출력 하는 것을 확인 하였다.

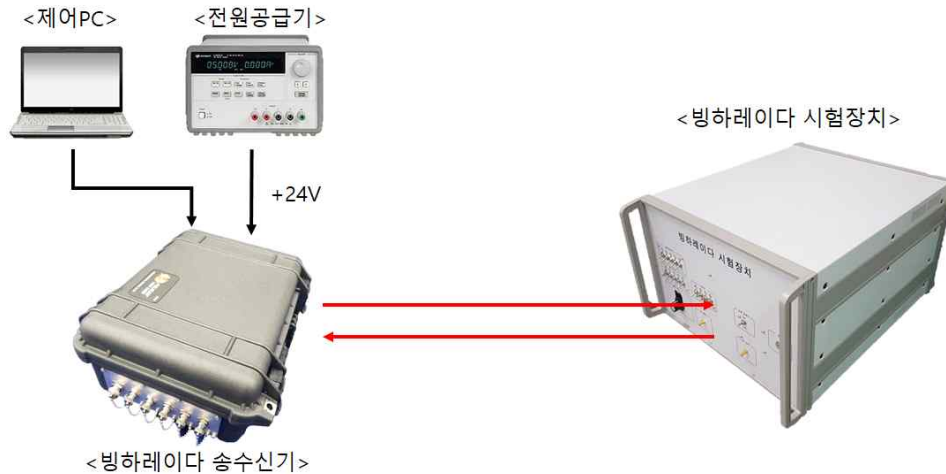


그림 107. 최대송달 탐지거리 시험구성도2



그림 108. 시험장치를 이용한 최대송달 탐지거리 시험 결과

라. 잡음지수

RF 계측장비 신호분석기를 이용하여 수신 IF출력의 이득과 노이즈레벨을 측정 하여 잡음 지수를 분석 한다. 레이더 본체의 수신 IF 모니터링 단자를 RF케이블을 통해 신호분석기로 연결 한다. 빙하구조분석레이더 본체의 수신기 입력 단자에 RF케이블을 이용하여 신호발생기를 연결 한다. 전원공급기 출력전압을 DC +24V로 설정하고 레이더 본체와 연결 한다. 전원공급기 ON후 레이더 본체를 동작 시킨다. 윗셋 주파수를 신호발생기를 통해 수신기 입력 단자에 입력 한다. 신호분석기에 출력 되는 IF 출력의 이득과 노이즈레벨을 측정 하여 잡음지수를 산출 하고 6dB 이하인지 확인 한다. ($NF = \text{Noise Power(dBm/Hz)} - \text{Gain(dB)} - 10\log BW + 174$)

수행한 결과 빙하구조분석레이더 송수신기는 잡음지수 성능이 6dB이하 만족함을 확인 하였다.



그림 109 잡음지수 시험 구성도.



그림 110. 잡음지수 파라미터 측정결과, 잡음 지수 4.71dB(-91.83-77.46-0+174)

마. 안테나이득

방사 시험을 통해 안테나의 이득이 7dBi 이상인지 시험 한다. 수행한 결과 빙하구조분 석레이다 안테나는 이득이 7dBi 이상 만족함을 확인 하였다.



그림 111. 성능시험 결과



그림 112. 성능시험 사진

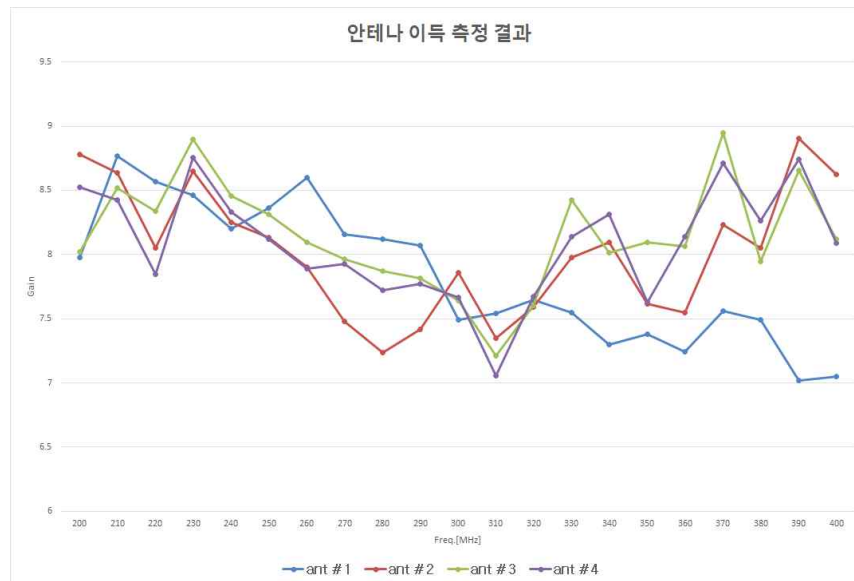


그림 113 안테나별 이득 측정 결과 그래프

바. 신호수집률

빙하구조분석레이더 송수신기와 빙하구조분석레이더 시험 장치를 연동 하여 raw data를 획득 하고 raw data의 beat 주파수 신호수집률이 95%이상인지 시험 한다.

레이더 본체의 송신단자와 수신단자를 빙하구조분석레이더 시험 장치에 연결한다. 빙하구조 분석레이더시험장치의 전원을 켜고 모사 거리를 설정 한다. 전원공급기 출력전압을 DC +24V 로 설정하고 레이더 본체와 연결 한다. 전원공급기 ON후 레이더 본체를 동작 시킨다. 루프백 시험을 수행 하여 수집된 raw data의 beat 주파수 신호수집률을 분석하고 95%이상인지 확인 한다.

수행한 결과는 빙하구조분석레이다 신호수집률 95% 이상을 확인 하였다.

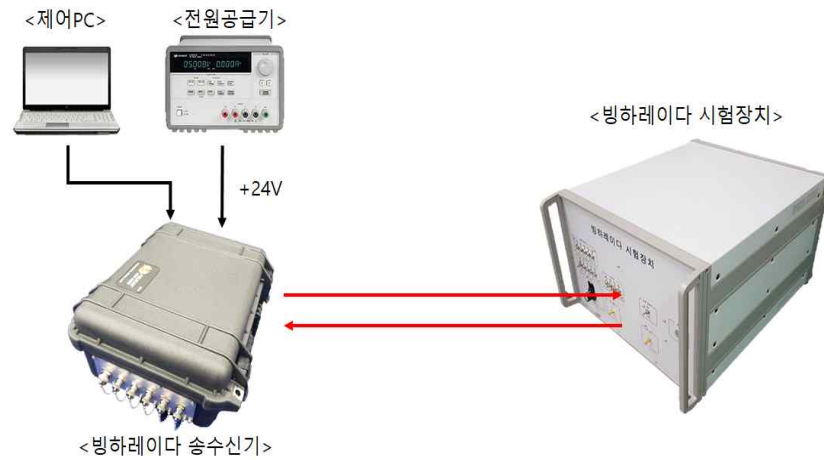


그림 114 신호수집률 시험 구성

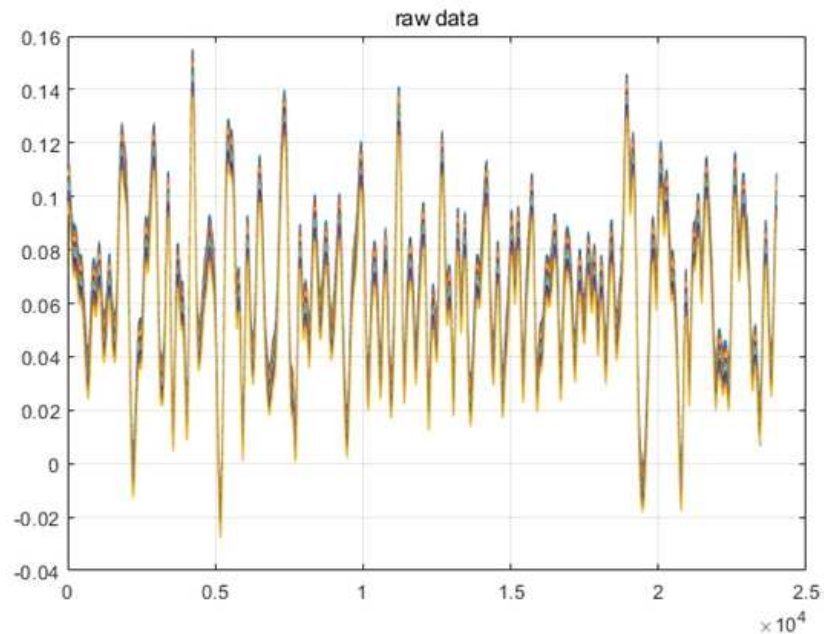
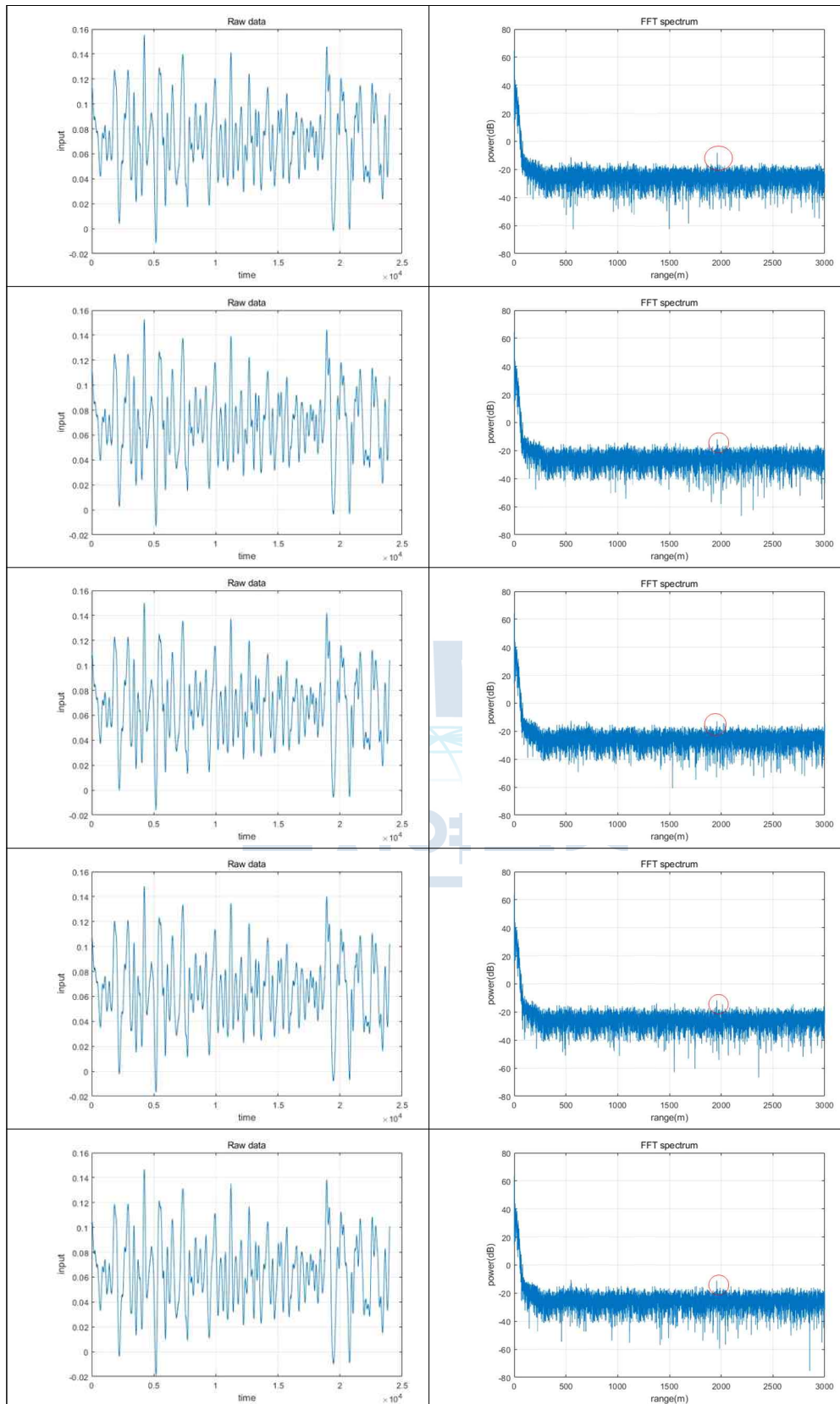


그림 115 raw data 10회 누적 그래프, 데이터 수집율 100%

각각의 데이터에서 FFT시 동일한 위치에서 타겟이 신호 검출 되었다.



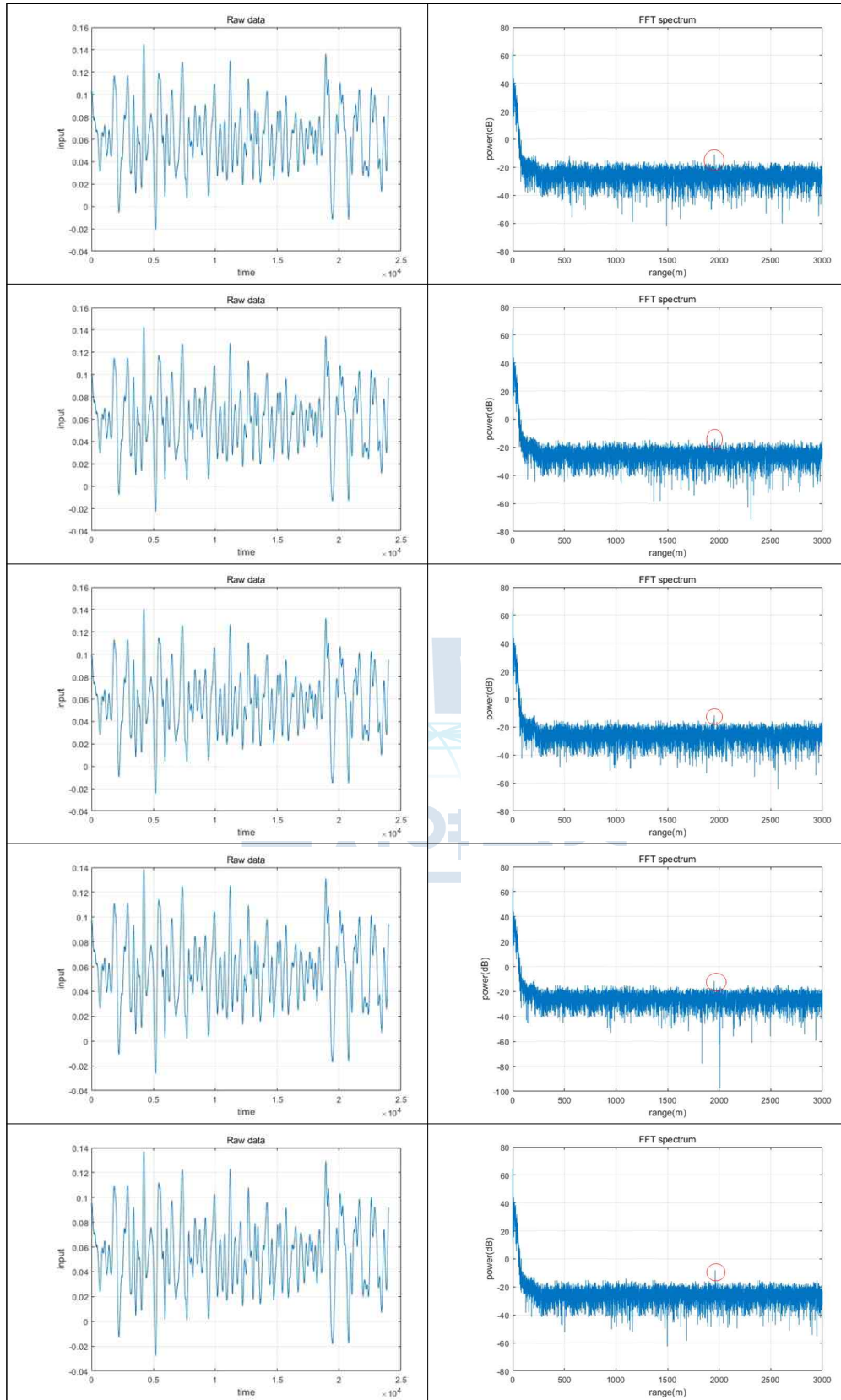


표 12. 수집을 분석 결과

사. 가동온도범위

빙하구조분석레이다 송수신기 설계 시 적용된 주요부품의 온도사양이 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ 를 만족함을 제시하고, 남극의 실제 저온 온도 환경을 온도챔버를 통해 구성하고 빙하레이다 시험장치를 통하여 송수신기 정상동작 상태를 beat 주파수 출력 유무로 판단 한다.

순 번	품명	품번	저장 온도	운용 온도
1	Amplifier	NPA1006	-65°C to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
2	IQ Demodulator	LTC5584	-65°C to 150°C	-40°C to $+105^{\circ}\text{C}$
3	Dual Inverter	NL27WZ04DFT2	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$
4	RF Switch	VSW2-33-10W+	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
5	Digital Attenuator	HMC470A	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
6	Amplifier	PSA4-5043+	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
7	Log Detector	AD8317	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
8	Regulators	MMBZ5231	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-55°C to $+150^{\circ}\text{C}$
9	MOSFET	FDD4141	-55°C to $+150^{\circ}\text{C}$	-55°C to $+150^{\circ}\text{C}$
10	Inverter	LTC1261L	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
11	Amplifier	MMBT3904LT1G	-55°C to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
12	Amplifier	PHA-13HLN+	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+95^{\circ}\text{C}$
13	SP4T SWITCH	HMC345ALP3E	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
14	SPSTSwitch	CMD204C3	-55°C to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
15	AMPLIFIER	HMC681ALP5E	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
16	Regulator	MIC5270-5.0BM5	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
17	Amplifiers	ADA4096-2ARMZ	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
18	Amplifier	MAX9939	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
19	Regulator	LM1117imp $\times$ -ADJ	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
20	DDS	AD9910	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
21	Amplifiers	ADA4807-1ARJZ	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
22	16-Bit ADC	AD4000BRMZ	-65 to $+150^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
23	DC-DC	TMX50H48S5	-55 to $+125^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
24	DC-DC	TMH40H24D12	-55 to $+125^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
25	DC-DC	SPS6-24-3R3	-40°C to $+105^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
26	DC-DC	SPS6-24-5	-40°C to $+105^{\circ}\text{C}$	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$

표 13 주요부품 가동온도 범위



그림 136. 레이더본체 온도시험, 왼쪽 저온-40도 1시간 유지/오른쪽 저온-40도 5시간유지

아. 보호등급

빙하구조분석레이더 송수신기 본체의 보호등급 사양이 IP67을 만족 하는지 제시 한다. IP67 등급의 방수 케이스를 적용 하였고, 습도 시험 후 정상동작 함을 확인 하였다.



그림 137 습도 시험 수행

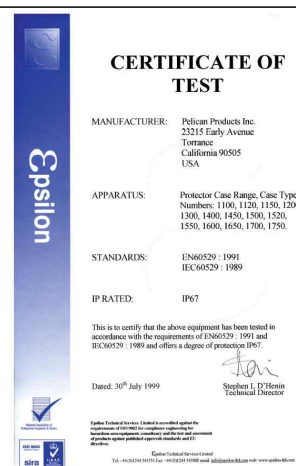


그림 138. 케이스 방수 등급 인증서

자. 현장운용안정성

빙하구조분석레이다 송수신기 설계에 적용된 주요부품의 MTBF가 5000H 이상인지를 분석프로그램을 통해 결과를 도출 하고 이를 제시 한다.

미국 국방성(Department of Defense)에서 제정한 MIL-HDBK-217에 명기된 해당부품 고장률 및 사용된 부품수로 예측 공식에 의거하여 산출하였고 온도, Stress(Derating), 정격(Rating Value)등을 고려한 고장률의 예측은 MIL-HDBK-217의 부품 Stress, 해석법을 이용하여 산출하였다. MIL-HDBK-217 규격서에 명기되지 않은 전자, 기계, 기계류 부품 및 어셈블리는 미국 RAC이 제공하는 NPRD95 데이터베이스 및 제조사에서 제공하는 시험데이터를 활용 하였다.

동작 조건은 극지 환경을 고려하여 동작 온도조건을 ‘-40℃’로 가정하였다. 설치 환경은 극지 지면으로 판단되어 Ground,Benign 로 가정하였다. 구성하는 부품은 적용규격에 완전히 준하여 구입된 경우로 ‘MIL-Spec’로 가정하였다. 전기적 스트레스는 고장률에 영향을 미치지 않는 조건으로 ‘50%’로 가정하였다. 가동률은 ‘100%’로 가정하였다.

MTBF 분석은 ALD MTBF Calculator로 산출 하였다.

분석 결과 약 MTBF는 약 23.88[Year]로 추정 되고, 5000H가 만족됨을 확인 하였다.



차. 외부인터페이스

빙하구조분석레이다 송수신기 외부인터페이스에 대하여 제시 한다.

명칭	연결기 타입	용도
GPS	SMA	GPS 수신 신호 입력 단자
LAN(PC)	RJ-45	PC와 통신 및 제어 단자
Battery IN	Circular	전원 연결 단자
Iout	BNC	수신 IF I 신호 모니터링 단자
Qout	BNC	수신 IF Q 신호 모니터링 단자
CLK OUT	BNC	클럭 외부 출력 단자
TRIGGER OUT	BNC	타이밍 신호 출력 단자
10MHz OUT	BNC	기준신호 출력 단자
TX OUT	N	송신기 출력 단자
RX IN	N	수신기 입력 단자

표 14. 외부 인터페이스

카. 전원

자체 전원에 적용된 배터리 및 충전기 사양을 제시 한다.

항목	사양	비고
크기	255 x 215 x 162 [mm]	
무게	7.5 [kg]	
온도 범위	- 40℃ ~ + 60℃	자체 히팅 기능 보유 극저온 온도운용 가능
공칭 전압	25.2 [V]	
용량	1,100 ~ 1,200 [Wh]	
충전 시간	약 4 [Hr]	
최대 충전/방전 전류	15 [A]/18 [A]	
방수	IP65	

표 15. 배터리 사양표



그림 139. 극저온 환경(-50°C) 부하 시험(카다로그 발췌)

2. 정량적 목표

구분	국외논문(편)				국내논문(편)				특허출원(건)	
	SCI		SCIE		SCI		SCIE		국외	국내
	주저 자	공저 자	주저 자	공저 자	주저 자	공저 자	주저 자	공저 자		
1차년도										
2차년도				1			1			1

2018년도 한국전자과학기술 학회 논문집 Vol. 6, No. 1 2018. 8. 23-25 위상검출 FMCW 레이더 신호처리 및 클럭 불안정성이 성능에 미치는 영향에 관한 연구 전봉준, 이영재* 김준희 서울대학교, 국방과학기술대학 및 전자공학 연구실 1. 서론 일반적인 주파수 변조 방식의 레이더 신호처리 기술은 주파수 대역폭에 의해 결정되는 range resolution의 한계를 극복하기 위하여 대역폭을 늘리는 다양한 방법을 제시하고 있다. 그러나 이러한 방법은 대역폭을 늘리는 데 한계가 있다. 또한, 대역폭을 늘리는 데 한계가 있다. 또한, 대역폭을 늘리는 데 한계가 있다. 2. 본론 위상검출 FMCW 레이더의 신호처리 기술은 주파수 대역폭에 의해 결정되는 range resolution의 한계를 극복하기 위하여 대역폭을 늘리는 다양한 방법을 제시하고 있다. 그러나 이러한 방법은 대역폭을 늘리는 데 한계가 있다. 또한, 대역폭을 늘리는 데 한계가 있다. 그림 1 위상 검출 FMCW 레이더 신호처리 블록도 그림 2 위상 검출 FMCW 레이더 신호처리 블록도 그림 3 위상 검출 FMCW 레이더 신호처리 블록도	THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE 0000-0000-0000-0000 http://dx.doi.org/10.5515/KIEEES.0000000.0000 ISSN 1229-2322 (Print) / ISSN 1229-2324 (Online) FMICW 방식의 레이더를 이용한 빙붕 깊이 측정 High-precision measurement of ice-shelf thickness by FMICW 이영재*, 신승하*, 김준희* Young-Jae Lee*, Seung-Ha Shin**, Eun-Hye Kim* 요약 최근 지구 온난화로 인한 빙하의 감소는 기후 변화의 중요한 지표로 여겨지고 있다. 빙하의 감소는 기후 변화의 중요한 지표로 여겨지고 있다. 빙하의 감소는 기후 변화의 중요한 지표로 여겨지고 있다. Abstract Recently, as a method of predicting global warming, a radar system has been developed to measure the ice shelf thickness. It uses FMCW waveform and a phase sensitive method so called range like process, which measures the target range by adding the fine range from the phase information to the range range from the frequency. However, the continuous wave requires a large dynamic range of the receiver since a short range reflection signal and a long range reflection signal are received simultaneously. In order to improve this, we propose FMICW method using probe and show the performance through simulation. Through the proposed method reduces SNR, based on the same peak power, the gain can be adjusted according to the range and also the maximum detection range can be extended. Key Words : FMICW, Phase Sensitive Detection, Depth measurement 1. 서론 최근 지구 온난화로 인한 빙하의 감소는 기후 변화의 중요한 지표로 여겨지고 있다. 빙하의 감소는 기후 변화의 중요한 지표로 여겨지고 있다. 빙하의 감소는 기후 변화의 중요한 지표로 여겨지고 있다.
위상검출 FMCW 레이더 신호처리 및 클럭 불안정성이 성능에 미치는 영향에 관한 연구, 한국전자과학회	FMICW 방식의 레이더를 이용한 빙붕 깊이 측정, 한국전자과학회

* 특허출원 예정중.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제1절 활용방안

- 극지에서의 빙하구조 분석에 활용
- 수입에 의존해온 빙하구조 분석 레이더를 국산화하여 수입대체 효과를 갖음.
- 기존의 고전력 GPR에서 최신 트렌드인 FMCW 방식의 빙하구조 분석 레이더로 대체
- 효과적이고 장기간에 걸친 빙하구조 분석이 가능해짐으로써 극지환경 분석에 도움이 됨.
- 빙하 밑 유속을 측정할 수 있는 장비로 응용 개발

제2절 연구 종료후 성과창출 계획

구분	주요내용	의의(시사점)	비고
지적 재산권	1년 이내 특허출원 1건	지재권 확보	
	1년 이내 국내/외 논문게재 1건	개발성과 발표	
기타	극지에서 다양한 형태의 레이더 센서 응용개발 사업으로 확장	극지환경 분석능력 향상	

제 6 장 참고문헌

- [1] H. Hyangsun, et al. "Changes in a Giant Iceberg Created from the Collapse of Larsen C Ice Shelf, Antarctic Peninsula, Derived from Sentinel-1 and CryoSat-2 Data", *Remote Sensing*, vol. 11, no. 4, p.404, (2019).
- [2] H. F. Corr, A. Jenkins, K. W. Nicholls, C. S. M. Doake, "Precise measurement of changes in ice-shelf thickness by phase-sensitive radar to determine basal melt rates", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, no. 8, p.1232, (2002)
- [3] P. V. Brennan, L. B. Lok, K. Nicholls, and H. Corr, "Phase-sensitive FMCW radar system for high-precision Antarctic ice shelf profile monitoring", *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 8, no. 7, pp.776-786, (2013).
- [4] S. Rahman, "FMCW Radar Signal Processing for Antarctic Ice Shelf Profiling and Imaging", PhD Thesis University College London, (2016).
- [5] Q. Guoqing. "High accuracy range estimation of FMCW level radar based on the phase of the zero-padded FFT." in *Signal Processing, 2004. Proceedings. ICSP'04. 2004 7th International Conference on*, vol. 3, pp.2078-2081, (2004)
- [6] 이재환, 장종훈, 노진입, 유경주, 최재현, "FMCW 전파고도계의 재밍 탐지 및 회피 알고리즘", *한국전자과학회연구 과제지*, 27(2), pp.147-155, 2016.
- [7] 황지환, 김승희, 강기묵, 김덕진, "다중 대역폭을 갖는 FMCW 레이더 송수신기 설계 및 제작", *한국전자과학회연구 과제지*, 27(4), pp.377-387, 2016.
- [8] 최재현, 장종훈, 이재환, 노진입, "FMCW 전파고도계의 신호처리 알고리즘 구현", *한국전자과학회연구 과제지*, 26(6), pp.555-563, 2016.
- [9] 현유진, 오우진, 이종훈. (2010). "차량 충돌방지용 FMCW 레이더의 주파수 Sweep 선형성 개선을 위한 간단한 기법", *한국전자과학회연구 과제지*, 21(10), pp. 1109-1115, 2010.

[10] Mahafza, *Radar systems analysis and design using MATLAB*, CRC press, 2002.

[11] *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO)



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 PIP사업 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 PIP 사업으로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

