

레이더용 다중채널수신기 설계

이기홍*, 김완식*, 김계국^o

The Design of Multi Channel Receiver for Radar Systems

Ki-Hong Lee*, Wan-Sik Kim*, Gye-Kuk Kim^o

● 요약 ●

본 논문에서는 레이더용 다중채널 수신기의 설계 및 제작 그리고 측정 결과를 소개한다. 설계된 다중채널 수신기는 주파수 X-대역에서 8개의 동일 특성을 갖는 신호를 수신 할 수 있으며, 80[dB]이상의 높은 동특성을 갖는다. 또한 직접수신처리를 위해 2개의 디지털복조처리가 내장된 일체형이므로 수신경로의 손실을 최소화하였고, 자체점검 기능을 부여하여 시스템의 안정성을 확보하였다. 다중채널 수신기의 성능으로는 수신이득 14±2[dB], 수신 잡음지수 19[dB], 수신 경로상의 크기와 위상 차이는 각각 ±2[dB], 10°이하를 갖는다.

● ABSTRACT ●

In this paper, The design and implementation of Multi Channel Receiver is described in this paper. This Receiver system operates at X-band with processing received signal, more than 80[dB] dynamic range and wide-band signals at the same time. To process direct received signals, this system has the built-in Digital De-modulators which offer the minimum loss on the receiving signal pass and has high stability by adding Built-In Test (BIT). The performance of Multi Receiver is the following. The gain, noise figure, difference of amplitude and phase on the signal pass is respectively 14±2[dB], 19[dB], ±2[dB], and 10° below.

키워드: Multi Channel Receiver, Dynamic Range, Wide-band Signal

I. 서론

최근 레이더 기술 경향은 기계식, 수동형의 단순 기능을 수행하는 레이더(Mechanically Steering or Passive Radar)에서 전기식, 능동형의 다기능을 갖는 레이더(Electronically Steering or Active Radar)로 진화하고 있다. 이러한 추세의 뒷받침 될 수 있었던 것은 반도체 소자의 성능 향상으로, 시스템의 크기와 무게가 소형, 경량화 될 수 있고, 레이더 기능을 다양화 할 수 있는 장점을 준다. 본 논문에서는 위와 같은 우수한 장점을 갖는 레이더의 RF 시스템에 적합한 다중 채널 수신기를 설계 및 제작하고 측정된 결과를 설명하고, 수신기의 성능에 필요한 시험 항목과 다중 수신 경로상의 신호에 대한 크기와 위상을 보정하는 기능을 언급하도록 하였다. 또한 디지털복조처리를 통해 나온 신호 특성을 분석하여 수신 시스템의 성능을 검증하도록 하였다.

설계 및 제작을 하였다.

다중채널 수신기를 구성하는 모듈은 총 9개로 구성되며 그 내용은 다음과 같다. 내부 전원공급을 담당하는 전원공급기, 이것은 외부로부터 +300V의 DC 전압을 입력받아 +15V, ±5V를 각 모듈에 공급한다.



그림 1. 다중채널 수신기 구성도
Fig. 1. Configuration of multi channel receiver

II. 수신기 시스템 구성

레이더의 RF 시스템에 적합한 다중채널 수신기는 동일 특성의 다중 신호 처리와 각 신호 경로상의 손실을 고려하여 다음과 같이

수신기는 4개로 구성되며, 각 수신기는 2개의 수신채널을 가지며 총 8개의 수신신호를 하향 변환한다. 또한, 8개의 수신신호의

* LIG백스원 연구원, ^o강릉원주대학교 정보통신공학과 교수.

크기와 위상을 제어하는 수신제어기가 있고, 수신신호 하향변환을 위한 국부 신호와 시스템 동기를 맞추기 위한 클럭 신호를 분배하는 신호 분배기로 구성된다. 최종 하향된 신호들은 2개의 디지털 복조처리로 입력되어 동시에 8개의 수신신호를 처리한다.

III. 수신기 시스템 설계

다중채널수신기의 가장 큰 장점은 능동배열 위상 레이더의 RF 시스템에 적합한 다중신호를 동일한 특성으로 수신하여 신호처리가 가능하다는 점이다. 본 수신 시스템에서는 수신에 필요한 이득 및 잡음지수 그리고 수신신호에 대한 크기와 위상을 보정할 수 있는 기능을 가지고 있다.

3.1 수신 잡음지수 와 이득

수신기 설계 시 수신 감도를 높이기 위한 요소 중 하나는 수신 잡음지수이다. 이는 레이더 시스템에서 MDS (Minimum Detectable Signal)를 탐지하기 위한 중요한 요소로 작용한다. 수신기의 감도(e , Sensitivity)를 계산하는 공식은 다음과 같다.

$$e [V] = \sqrt{kTBF_T(S/N)_OR} \quad (1)$$

- k = 볼츠만 상수, 1.38×10^{-23} [J/K]
- T = 온도 [K], T[K] = T[°C]+273.15
- B = 잡음 대역폭 [Hz]
- FT = 수신 잡음 요소 [Linear]
- (S/N)O = 요구되는 수신 신호 대 잡음비 [Linear]
- R = 저항 [Ω]

상기 식에서 알 수 있듯이 수신기의 감도특성을 저하시키지 않게 하기 위해서는 수신 잡음 요소 (FT)를 최소화하는 방향으로 설계를 해야 한다. 여기서 말하는 수신 잡음요소는 수신 잡음지수를 일컫는다. 다음은 수신 경로 전체에 대한 Budget 분석을 하였다. 레이더 시스템의 전체 수신 경로는 수신전단기에서 다중채널수신기까지의 경로로, 전체 수신 경로와 다중채널 수신기의 수신 잡음지수는 각각 4.8[dB], 19[dB]이다.

다중채널 수신기의 잡음지수는 시스템 Budget 분석 Tool 인 에질런트사의 GENESYS를 이용하여 분석하였다.

다중채널 수신기의 잡음지수와 이득은 각각 20[dB], 23[dB] 정도 나오고 있는데, 잡음지수의 경우 1[dB] 가량 나빠지는데 이것은 경로 상에 있는 수동소자의 삽입손실 설정 문제로 최적화하여 개선 할 수 있다.

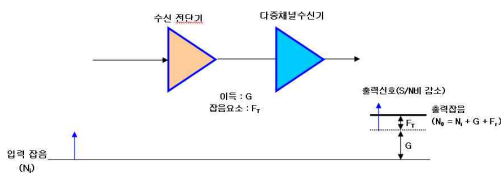


그림 2. 전체 수신 잡음 지수의 개념도
Fig. 2. Concept of total noise figure

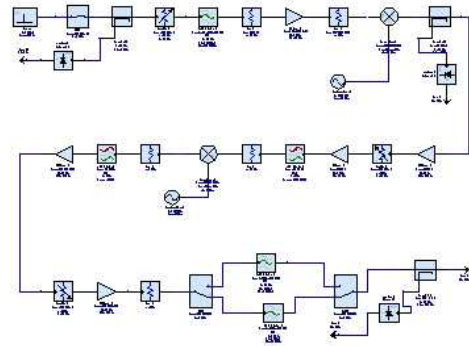


그림 3. 다중채널수신기의 경로도
Fig. 3. Pass block of multi channel receiver



그림 4. 수신 잡음지수 특성
Fig. 4. Noise figure Characteristics

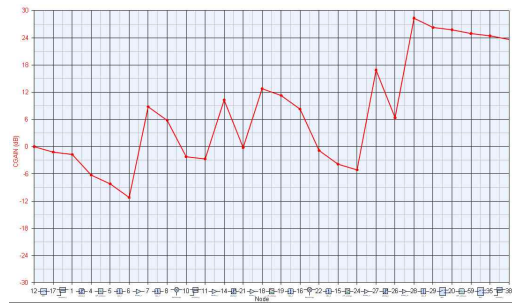


그림 5. 수신 이득 특성
Fig. 5. Gain Characteristics

3.2 수신 채널 간 이득 및 위상 보정

레이더 수신 시스템에서 중요한 요소 중 하나는 다중 경로상의 신호에 대한 동일특성을 보장해 주어야 한다. 여기서 동일특성이란 각 수신 경로상의 신호에 대한 크기와 위상이 동일해야 한다는 것이다. 본 시스템에서는 각 수신기에 크기와 위상을 조절할 수 있는 DCA(Digital Control Attenuation)와 위상 변위기(Phase Shifter)를 두어 수신제어기를 통해 조절하여 경로상의 동일한 신호 특성을 확보토록 하였다. 크기를 보정하기 위해 감쇠 영역은 31.5 ± 0.5 [dB]이고, 위상을 보정하기 위해 6bit 디지털 제어방식을 적용하여 스텝 5.625° 간격으로 360° 가변하도록 설정 하였다.

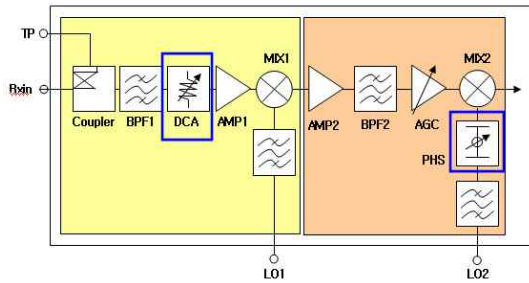


그림 6. DCA와 위상변위기를 적용한 수신 시스템
Fig. 6. Receiver system using DCA & PS

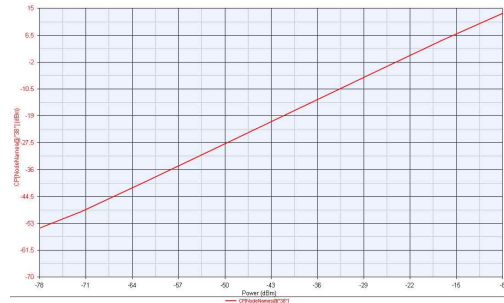


그림 8. 다중채널 수신기의 동 특성
Fig. 8. Dynamic range of multi channel receiver

3.3 수신 동특성 및 ADC 설계

수신 동 특성은 레이더 수신 시스템의 최소 입력 신호인 잡음전력(Noise Power)를 최소 신호로 하고 수신기의 신호 포화레벨인 1dB 압축점을 최대 입력신호로 규정하면 그 차이를 수신기의 입력 동 특성이라 할 수 있다.

본 수신시스템의 동특성은 다음과 같다. 수신 대역폭이 5[MHz] 이고 다중채널수신기의 잡음지수가 19[dB]라 하면 수신경로의 잡음 레벨은 식(2)에 의해 구해진다.

$$\text{Noise Power} = k \cdot T_0 \cdot B_n \cdot NF \quad (2)$$

k = 볼츠만 상수, 1.38×10^{-23} [J/K]
 T_0 = 온도 [K], $T[K] = T[^\circ\text{C}] + 273.15$
 B_n = 잡음 대역폭 [Hz]
 NF = Noise Figure

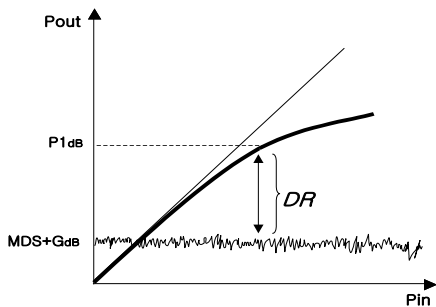


그림 7. 수신기 입력 동 특성
Fig. 7. Input dynamic range in receiver

식(2)에 대입하면, 수신경로의 잡음 레벨은 -88[dBm]가 된다. 이 값으로부터 수신 동특성 80[dB]이상을 만족하기 위해서는 입력되는 최대 신호는 -8[dBm] 이상이 된다. 다음 그림은 동 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 보이고 있다. 입력 전력 -8[dBm]까지 선형성을 유지하는 것을 볼 수 있다.

또한 ADC에 의해 수신단의 출력 동 특성이 결정되는데, ADC의 최소 및 최대 신호레벨은 아래와 같다. 여기서는 16bit ADC를 사용하였다.

ADC 최소 입력 신호 파워 레벨 계산 :

$$\begin{aligned} P_{3LSB} &= 10 \log \left[\frac{(2 V_{AD}/2^n)^2}{2R_L/P_{mW}} \right] \\ &= 10 \log \left[\frac{(2 \times 5 \times 1/2^{16})^2}{100} \right] + 30 \quad (3) \\ &= -70.77 \text{ dBm} \end{aligned}$$

ADC 최대 입력 신호 파워 레벨 계산 :

$$\begin{aligned} FSR_{dBm} &= 10 \log \frac{V_s^2}{R} + 30 \text{ dB} \\ &= 10 \log \left[\frac{(1/2\sqrt{2} \times V_{P-P})^2}{50} \right] + 30 \quad (4) \\ &= 10 \text{ dBm} \end{aligned}$$

상기 식으로부터 ADC의 입력 동적 범위는 -70.77[dBm]에서 +10[dBm]이다. 결국 수신기시스템의 동 특성과 매칭이 되어야 하므로 20[dB]의 이득이 요구되며, 반면 최대입력 신호레벨은 18[dB]의 이득만 필요로 하므로 가변 감쇠기를 두어 조정하면 된다.

IV. 성능 결과 및 분석

다중채널 수신기의 성능을 검증하기 위해 다음과 같이 측정 시스템을 구성하였다.

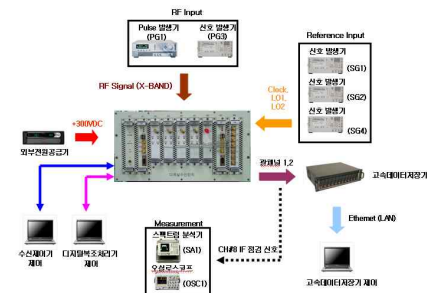


그림 9. 다중채널 수신기 측정 구성도
Fig. 9. Test system of multi channel receiver

4.1 수신 잡음지수와 이득

8개의 수신기에 대한 잡음지수와 이득 측정 그래프는 다음과 같다. 수신 잡음지수는 전 채널 별로 19[dB] 이하이며, 수신 이득은 14 ± 2 [dB] 특성을 갖는다. 여기서 각 채널 이득을 동일하게 유지하기 위해 10[dB] 감쇠를 전 수신기(채널)에 적용하였다. 즉, 이득과 감쇠량을 더하면 전체 수신이득임을 알 수 있다.



그림 10. 수신기(채널) 별 잡음 지수
Fig. 10. Noise Figure at each channel

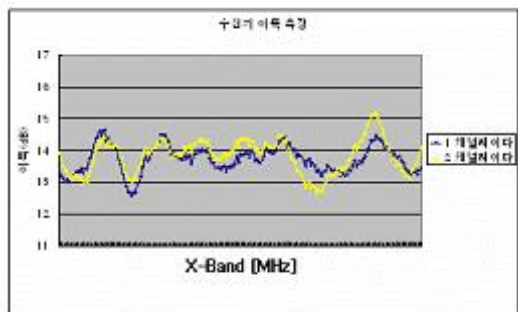


그림 11. 수신채널 #1 및 #2의 수신이득
Fig. 11. Gain at channel #1 and #2

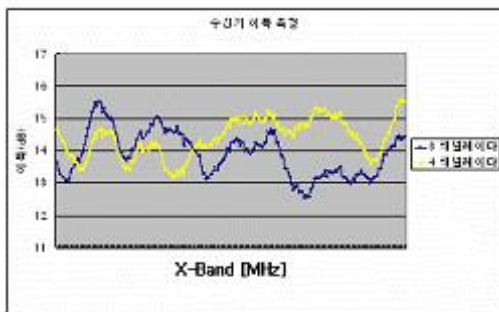


그림 12. 수신채널 #3 및 #4의 수신이득
Fig. 12. Gain at channel #3 and #4

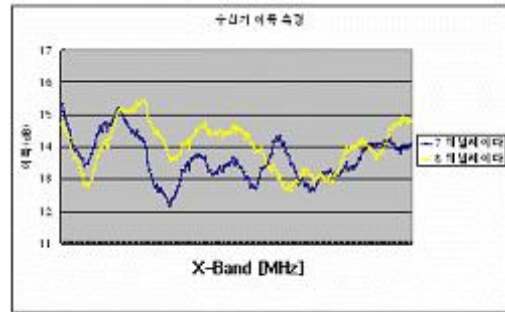


그림 13. 수신채널 #7 및 #8의 수신이득
Fig. 13. Gain at channel #5 and #6

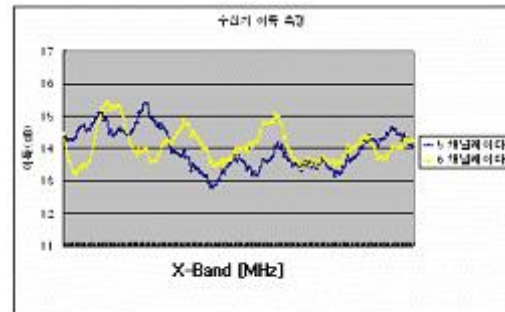


그림 14. 수신채널 #5 및 #6의 수신이득
Fig. 14. Gain at channel #7 and #8

4.2 수신채널 간 이득 및 위상 보정

수신기(채널)의 출력 신호의 크기와 위상 특성에 대한 보정 전후는 다음과 같다. 아래 그림과 같이 수신 출력 신호의 크기와 위상 보정 후의 편차는 이득은 2.753[dB], 위상은 2.35°로 요구 조건에 만족하며 전체 수신기(채널)의 동일성을 보이고 있다.

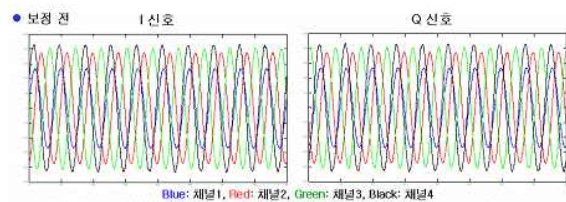


그림 15. 수신 출력신호의 크기와 위상 보정 전
Fig. 15. Before calibration of amplitude and phase in output signal

4.3 수신 동 특성

다중채널 수신기의 수신 동 특성은 다음 그림과 같다. 최대 입력 전력은 -8[dBm]까지 포화되지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 디지털복조처리를 거쳐 나온 값이므로 ADC특성에 대한 보다 구체적인 데이터를 제공한다.

● 보정 후 - DCA, Phase Shifter 조절

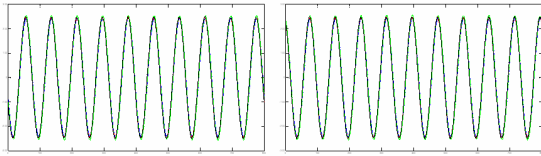
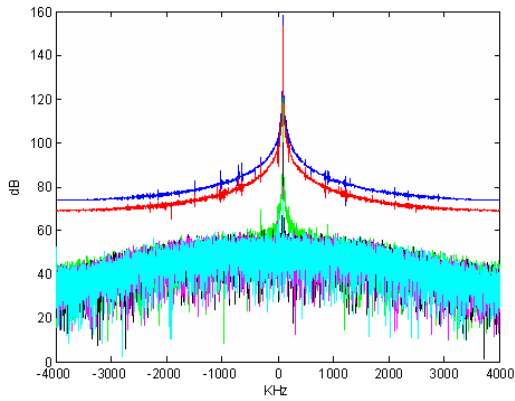


그림 16. 수신 출력 신호의 크기와 위상 보정 후
Fig. 16. After calibration of amplitude and phase in output signal



Blue: 0dBm, Red: -5dBm, Green: -38dBm
Black: -58dBm, Pink: -78dBm, Cyan: -85dBm

그림 17. 입력 신호 대비 출력 스펙트럼
Fig. 17. Spectrum of Input vs, output signal

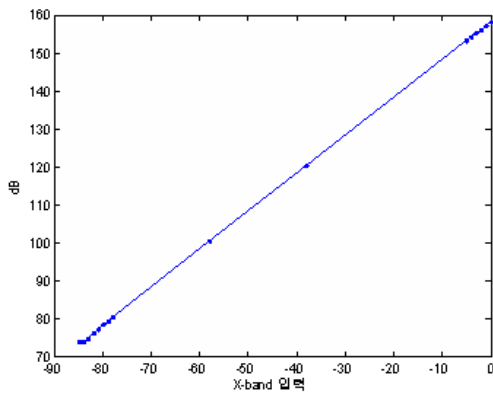


그림 18. 수신 동 특성
Fig. 18. Characteristics of dynamic range

V. 결론

본 논문에서는 레이더에 적합한 다중채널 수신기를 설계 및 제작하고 그것에 대한 성능검증을 하였다. 수신 시스템의 주요 성능 파라미터인 잡음지수, 이득 및 동 특성을 시뮬레이션을 통해 예측하였고, 시험을 통해 요구 규격에 만족하였다. 또한 각 수신기(채널) 경로상의 신호 특성을 동일하게 유지하기 위해 크기와 위상을 보정할 수 있는 DCA와 위상변위기를 적용하였다. 마지막으로 디지털복조처리를 이용한 동 특성을 통해 ADC 성능까지도 검증할 수 있었다.

참고문헌

- [1] T.W.Jeffrey, "Phase-Array Radar Design," Schitech,2009.
- [2] Kevin MoClaning Tom vito, "Radio Receiver Design." Noble Publishing.
- [3] Robert J.Mailloux, Phase Array Antenna Handbook, Second Edition, Artech House.
- [4] 한국전자과학회(레이다 연구회), "2009 레이더 워크샵 및 단기강좌," 7월, 2009년