

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.3.109>

JIIBC 2024-3-16

모노펄스 레이다용 다채널 집적 수신기의 수신 채널 보정

Receiving Channel Calibration of Multi-Channel Integrated Receiver for Monopulse Radar

박진성*

Jinsung Park*

요약 모노펄스 레이다용 다채널 집적 수신기 내에 존재하는 채널 간 간섭은 최근 수신기의 소형화 추세에 따라 그 영향성이 늘어날 것으로 예상된다. 따라서, 본 논문에서는 모노펄스 레이다에 적용되는 다채널 집적 수신기의 수신 채널 간 간섭을 보정하여, 표적 각도 검출 성능 왜곡을 배제할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위하여 스위치, 방향성 결합기, 정합 부하, ADC(Analog to Digital Converter), 채널 보정 신호원 등을 이용하여 보정 하드웨어 구성을 제안하였다. 또한, 스위치와 보정 신호원을 제어하여 총 9개의 산란 파라미터를 획득하고, 안테나로부터 출력되는 모노펄스 신호와 채널 간 간섭이 존재하는 상태에서의 다채널 수신기를 통과한 모노펄스 신호 간의 수학적 관계를 이용하여 왜곡되지 않는 모노펄스 신호를 복원하는 방법을 제안하였다.

Abstract The effect of inter-channel coupling in multi-channel monopulse receiver is expected to increase by miniaturization trend of receiver. Therefore, in this paper, calibration method is proposed to compensation for inter-channel coupling in receiver of monopulse radar. And it can prevent distortion of angle information of target. Hardware configuration that consists of switch, directional coupler, matched load, ADC(Analog to Digital Converter), signal source of calibration is proposed to calibration. Total nine scattering parameters are obtained by controlling the switch and signal source of calibration. After that, method for restoring the undistorted signal is proposed using the mathematical relationship between the monopulse signal output from the antenna and the monopulse signal passing through the multi-channel receiver in the presence of inter-channel coupling.

Key Words : Calibration, Inter-channel coupling, Monopulse radar, Multi-channel receiver

1. 서 론

최근, 다양한 플랫폼의 필요에 의해서 소형 레이다의 개발이 진행되고 있으며, 이와 관련된 레이다 구성품도 활발히 개발되고 있다.^[1-5] 소형 레이다의 작동 방식 중, 모노펄스(Monopulse) 레이다는 단일 빔으로 빔 내 표적

의 각도를 탐지하는 방식으로 표적의 방위각, 고각 정보를 탐지하기 위하여 최소한 3채널 이상의 수신 채널이 필요하다. 이 때, 합채널(Sum Channel)과 2개의 차채널(Delta Channel)인 총 3개의 수신 채널은 안테나로부터 수신한 신호를 왜곡없이 신호처리로 전달하기 위하여 이론적으로는 무한대의 수신 채널 간 격리도와 정확

*정회원, 국방과학연구소

접수일자 2024년 5월 22일, 수정완료 2024년 5월 30일

계재확정일자 2024년 6월 7일

Received: 22 May, 2024 / Revised: 30 May, 2024 /

Accepted: 7 June, 2024

*Corresponding Author: funfish1@add.re.kr

Agency for Defense Development, Korea

하게 동일한 전기적 입출력 특성을 갖는 것으로 모델링되며, 이 경우 이상적인 모노펄스 레이더용 수신기의 특징을 갖는다. 하지만 당연하게도 이와 같은 2가지 이상적인 모노펄스용 다채널 수신기에 요구되는 조건은 실제 구현되는 다채널 수신기에 완벽하게 구현될 수 없으며, 이는 크게 아래와 같은 3가지 요소에 의해서 구현성이 제한된다.

첫째는 회로 패턴 및 접점의 물리적인 제작 공차로 인해서 신호 경로의 전기적 길이가차가 나타나게 되고, 이로 인한 수신 채널 간 전기적 신호의 불균형으로 나타난다. 둘째는 각 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits) 등의 동일 소자 간 제작 특성 편차로 인한 전기적 특성의 편차 발생으로 수신 채널 간 전기적 신호의 불균형이 발생한다. 셋째는 채널 간 전기적 결합(Coupling)에 의한 간섭으로 수신 채널 간 전기적 신호의 불균형이 발생한다.

수신 채널 간 불균형을 유발하는 위 3가지 원인 중 첫째와 둘째 원인은 동크기, 동위상으로 각 수신 채널로 급전되는 보정 신호와 각 수신 채널당 1개의 ADC를 이용하는 방법^[6] 등으로 보정이 가능하다. 하지만 셋째 원인인 수신 채널 간 전기적 결합에 의한 간섭은 기존에 제안된 보정 방식으로는 보정이 불가능하다. 따라서 기존의 소형 모노펄스 레이더에서는 이에 대응하기 위하여 수신 채널 간 물리적인 격벽과 허용 공간 내 수신 채널 간 최대 거리가 되도록 형상을 설계하여 전기적 결합 그 자체를 줄이는 방식으로 설계되었다.^[7-9] 하지만 최근에는 수신기의 크기를 극단적으로 줄여 MMIC 내에 다채널 수신기를 집적하는 단계까지^[10-12] 발전하고 있으며 MMIC 내부는 격벽을 세울 수 없을 뿐 아니라, 면적도 기존 대비 극단적으로 작으므로 채널 간 전기적 결합 문제가 기존보다 더 악화할 여지가 있다.

본 논문에서는 위와 같이 수신 채널 간 결합을 제거할 수 없는 상황에서 동작하는 모노펄스 레이더용 다채널 수신기의 수신 채널 보정 방법을 제시한다. 또한, 이상적인 안테나 패턴으로부터 계산되는 시선각 오차(BSE, BoreSight Error)에 수신 채널 간 전기적 결합이 존재할 때, 보정 유무에 따른 성능 차이를 제시한다.

II. 본 론

1. 이상적 다채널 수신기의 경우 모노펄스 처리

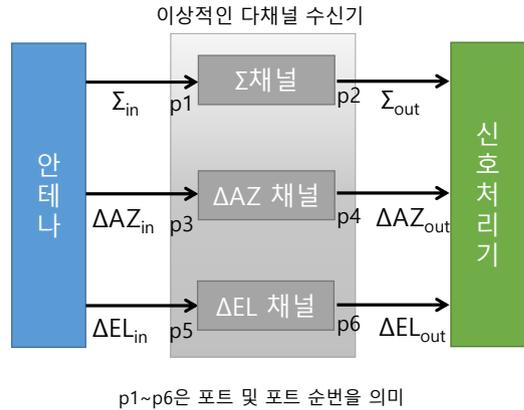


그림 1. 이상적 다채널 수신기의 모노펄스 신호 흐름도
Fig. 1. Monopulse signal flow of ideal multi-channel receiver

위 그림과 같이 안테나로부터 출력되는 모노펄스 신호는 모노펄스 각도 추출 원리^[13] 의해서 그림 1의 합채널(Σ)과 2개의 차채널(ΔAZ , ΔEL) 신호의 비율을 이용하여 아래와 같이 표적의 각도를 검출 할 수 있다.

$$\text{방위각} = \frac{\Delta AZ_{in}}{\Sigma_{in}}, \text{고각} = \frac{\Delta EL_{in}}{\Sigma_{in}} \quad (1)$$

여기서 Σ_{in} 은 안테나로부터 출력된 합채널 신호

ΔAZ_{in} 은 안테나로부터 출력된 방위각 차채널 신호

ΔEL_{in} 은 안테나로부터 출력된 고각 차채널 신호이다.

이때, 이상적인 모노펄스 수신기는 합채널과 차채널의 비율을 크기, 위상적으로 왜곡하지 않으므로 아래와 같은 관계식을 성립시킨다.

$$\begin{aligned} \text{방위각} &= \frac{\Delta AZ_{out}}{\Sigma_{out}} = \frac{S_{43}\Delta AZ_{in}}{S_{21}\Sigma_{in}} = \frac{\Delta AZ_{in}}{\Sigma_{in}} \\ \text{고각} &= \frac{\Delta EL_{out}}{\Sigma_{out}} = \frac{S_{65}\Delta EL_{in}}{S_{21}\Sigma_{in}} = \frac{\Delta EL_{in}}{\Sigma_{in}} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Σ_{out} 은 수신기로부터 출력된 합채널 신호

ΔAZ_{out} 은 수신기로부터 출력된 방위각 차채널 신호

ΔEL_{out} 은 수신기로부터 출력된 고각 차채널 신호이다.

이는 산란 파라미터(Scattering Parameter) 관점에서 이상적인 다채널 수신기는 다음 수식과 같음을 의미한다.

$$S_{21} = S_{43} = S_{65} \quad (3)$$

2. 수신 채널 간 간섭이 존재하는 경우의 보정 및 모노펄스 처리

그림 1의 포트 1, 3, 5에서만 입력이 존재하고, 임피던스 정합이 완벽하다고 가정할 때, 각 수신 채널 간 간섭이 존재하는 경우 아래와 같은 총 6개의 간섭에 해당하는 산란 파라미터를 고려하여야 한다.

S_{41}, S_{61} (Σ 입력이 $\Delta AZ, \Delta EL$ 로 간섭되는 항)

S_{23}, S_{63} (ΔAZ 입력이 $\Sigma, \Delta EL$ 로 간섭되는 항)

S_{25}, S_{45} (ΔEL 입력이 $\Sigma, \Delta AZ$ 로 간섭되는 항)

따라서, 위 간섭항에 해당하는 산란 파라미터를 고려하여 수식 (2)에 따른 모노펄스 각도를 다시 구하면 아래와 같이 연산될 수 있다.

$$\frac{\Delta AZ_{out}}{\Sigma_{out}} = \frac{(S_{41} + S_{43} + S_{45})\Delta AZ_{in}}{(S_{21} + S_{23} + S_{25})\Sigma_{in}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta EL_{out}}{\Sigma_{out}} = \frac{(S_{61} + S_{63} + S_{65})\Delta EL_{in}}{(S_{21} + S_{23} + S_{25})\Sigma_{in}} \quad (5)$$

위 수식에서 수학적으로는 각 산란 파라미터들이 분리되어 보이지만 각 채널의 데이터는 주 경로와 간섭 신호가 혼재되어 한꺼번에 획득되므로 $\Sigma_{out}, \Delta AZ_{out}, \Delta EL_{out}$ 의 획득 데이터로부터 각각의 산란 파라미터들은 분리될 수 없다. 따라서 수신 채널 간 간섭이 존재하는 상태의 모노펄스 각도는 상기 6개의 간섭항에 의해서 오염되어 정확한 각도 추정을 할 수 없게 된다.

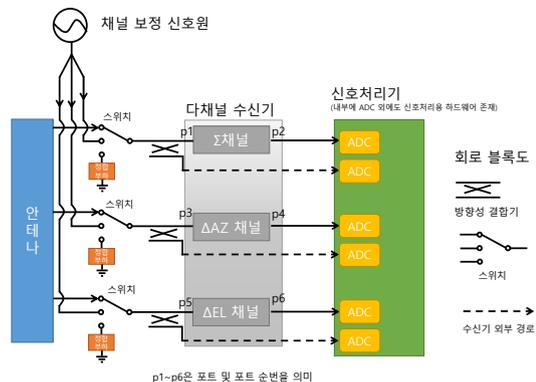


그림 2. 수신 채널 간 간섭을 보정하기 위한 하드웨어 구성도
 Fig. 2. Hardware configuration for calibration of multi-channel monopulse receiver

위 그림은 수신 채널 간 간섭을 보정하기 위한 하드웨어 구성도를 나타낸다. 앞서 수식 (4), (5)에서 보인 바와 같이 수신 채널 간 간섭을 보정하기 위해서는 수식 (4), (5)에 사용된 9개 산란 파라미터를 모두 측정할 수 있어야 한다. 이를 위하여 채널 보정 신호원, 스위치, 방향성 결합기(Directional Coupler), ADC(Analog to Digital Converter) 6개가 필요하다. 각 채널의 스위치는 모두 독립적으로 외부 제어신호에 의해서 제어될 수 있다. 채널 보정 신호원은 스위치까지 각 수신 채널별로 모두 동크기, 동위상으로 급전된다. 각 수신 채널의 입력단에는 방향성 결합기가 존재하여 ADC에 각 수신 채널의 입력 신호를 결합하여 전달한다. 또한, 방향성 결합기의 주 경로 출력과(수신기 입력 포트에 연결됨) 결합 경로 출력(ADC에 연결됨) 간의 전기적 관계는 방향성 결합기의 제작 시에 결정되고, 수동 회로 특성상 이후 변화하지 않으므로 이미 알고 있다고 가정하는 것이 타당하다. 이는 방향성 결합기의 결합 경로 출력 측정 데이터로부터 방향성 결합기의 주 경로 출력(수신기 입력 포트에 연결)의 데이터를 알 수 있게 한다.

추가적으로 입력단 방향성 결합기에서 결합하여 전달되는 경로에는 능동회로를 배제하여 시간에 따른 신호의 변화를 차단할 수 있으며, 불필요한 간섭 신호를 배제하기 위하여 수신기 내부에 위치하지 않고 외부에 위치시키는 것이 바람직하다. 또한, 그림 2의 신호처리에 각 수신 채널별로 2개의 ADC가 존재하여 각 채널의 입출력 데이터를 복소(Complex) 전압 데이터로 획득할 수 있다. 따라서 각 채널의 입출력 데이터를 모두 복소 데이터로 알 수 있으므로, 이로부터 산란 파라미터를 각 채널별로 획득할 수 있게 된다.

이 때, 각각의 스위치를 개별적으로 제어하면서 측정하면 입력을 통제할 수 있고, 입출력을 모두 복소 전압으로 측정할 수 있으므로 입출력의 비율로 산출되는 수식 (4), (5)에 사용된 9개의 산란 파라미터를 개별적으로 측정할 수 있다. 보정을 위한 산란 파라미터를 획득하는 동안 채널 보정 신호원은 전원 제어 등을 통하여 ON으로 동작시켜야 하며, 이후 보정이 끝나게 되면 전원 제어 등을 이용하여 OFF로 동작시켜야 한다. 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1에 제시된 9개 산란 파라미터를 모두 획득한 다음, 각 채널의 스위치를 안테나 경로로 연결하여 안테나로부터 실제 모노펄스 신호가 들어오는 상황을 가정하자.(보정 신호는 OFF 상태). 이 경우, 수신 채널 간 간섭을 고려할 때 산란 파라미터와 입출력 신호 간에는 아래

와 같은 수학적인 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \Sigma_{in} S_{21} + \Delta AZ_{in} S_{23} + \Delta EL_{in} S_{25} &= \Sigma_{out} \\ \Sigma_{in} S_{41} + \Delta AZ_{in} S_{43} + \Delta EL_{in} S_{45} &= \Delta AZ_{out} \\ \Sigma_{in} S_{61} + \Delta AZ_{in} S_{63} + \Delta EL_{in} S_{65} &= \Delta EL_{out} \end{aligned} \quad (6)$$

표 1. 보정신호와 스위치 제어 상태에 따른 보정용 산란 파라미터 측정

Table 1. Scattering parameter measurement with respect to switch control

	수신 채널	스위치 제어	측정 항목	보정 신호
측정 1	Σ	보정신호 경로 선택	S_{21}	ON
	ΔAZ	정합부하 선택	S_{41}	
	ΔEL	정합부하 선택	S_{61}	
측정 2	Σ	정합부하 선택	S_{43}	
	ΔAZ	보정신호 경로 선택	S_{23}	
	ΔEL	정합부하 선택	S_{63}	
측정 3	Σ	정합부하 선택	S_{65}	
	ΔAZ	정합부하 선택	S_{25}	
	ΔEL	보정신호 경로 선택	S_{45}	

수식 (6)을 다시 행렬 형태로 정리하면 아래와 같고,

$$\begin{bmatrix} S_{21} & S_{23} & S_{25} \\ S_{41} & S_{43} & S_{45} \\ S_{61} & S_{63} & S_{65} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{in} \\ \Delta AZ_{in} \\ \Delta EL_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{out} \\ \Delta AZ_{out} \\ \Delta EL_{out} \end{bmatrix} \quad (7)$$

따라서, 다채널 모노펄스 수신기의 채널 간 간섭에 의하여 왜곡되지 않은 Σ_{in} , ΔAZ_{in} , ΔEL_{in} 을 수식 (7)로부터 역행렬을 연산하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{in} \\ \Delta AZ_{in} \\ \Delta EL_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{21} & S_{23} & S_{25} \\ S_{41} & S_{43} & S_{45} \\ S_{61} & S_{63} & S_{65} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma_{out} \\ \Delta AZ_{out} \\ \Delta EL_{out} \end{bmatrix} \quad (8)$$

결론적으로 제안한 본 연구는 아래 흐름과 같이 요약이 가능하다.

- ◎ 안테나 입력으로부터 다채널 모노펄스 수신기를 거쳐 측정된 각 수신 채널의 모노펄스 신호 측정치 (Σ_{out} , ΔAZ_{out} , ΔEL_{out})와
- ◎ 채널 보정 신호원과 스위치 제어(그림 2 및 표 1)를 이용하여 획득한 산란 파라미터(S_{21} , S_{41} , S_{61} , S_{43} , S_{23} , S_{63} , S_{65} , S_{25} , S_{45}) 데이터를 이용하여

◎ 수신 채널 간 간섭에 의해 왜곡되지 않은 안테나로부터 출력된 모노펄스 3채널 신호(Σ_{in} , ΔAZ_{in} , ΔEL_{in})을 복원할 수 있고(수식 (8) 이용)

◎ 상기 복원된 모노펄스 3채널 신호(Σ_{in} , ΔAZ_{in} , ΔEL_{in})를 수식 (1)에 적용하여 정확한 모노펄스 각도 추정이 가능하다.

3. 보정 유무에 따른 시선각 오차 검출 차이

Ka 대역 모노펄스 안테나 시뮬레이션 결과 데이터를 이용하여 합패턴, 차패턴을 형성하였으며 해당 데이터에 수식 (1)을 적용하면 수신기의 간섭이 없는 이상적인 시선각 오차 그래프를 얻는다. 방위각과 고각의 패턴이 매우 유사하여 두 데이터가 겹쳐져 있는 것처럼 보인다.

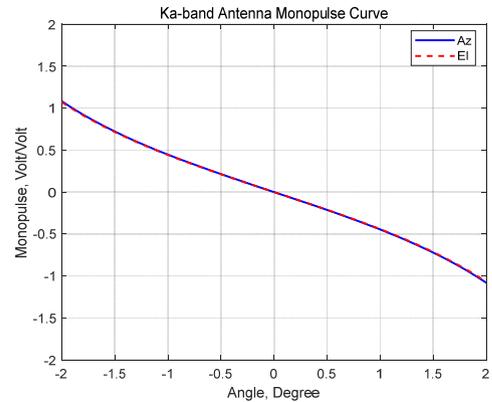


그림 3. 시선각 오차 그래프(안테나 자체)
Fig. 3. Boresight error(Antenna only)

한편, 수신 채널 간 간섭 및 이득에 해당하는 수식 (7) 내의 산란 파라미터는 제작 레이아웃 및 회로 배치에 따라 실제 각 수신기마다 다를 수밖에 없으므로 표 2와 같이 임의의 수로 가정하였다.

표 2와 수식 (7)을 이용하면 수신 채널 간 간섭량이 존재하는 상태의 합채널, 차채널의 복소 데이터를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 시선각 오차 그래프를 그림 4(고각), 그림 5(방위각)와 같이 그릴 수 있다. 그림 4, 5에서 확인할 수 있듯이 수신 채널 간 간섭이 존재하는 상태에서는 이상적인 시선각 오차 그래프 대비, 왜곡된 시선각 오차 그래프가 얻어짐을 알 수 있다. 왜곡된 시선각 오차 그래프는 왜곡된 정도 만큼 표적의 각도 정보를 오염시켜 정확한 표적의 각도 정보 추정을 어렵게 한다.

표 2. 수신 채널 간 간섭량 및 이득, 산란 파라미터
 Table 2. Coupling coefficient and gain between receiving channel, Scattering parameters

항목	값	항목	값	항목	값
S_{21}	10+j0	S_{23}	-2.172-j0.542	S_{25}	1.364+j0.366
S_{41}	0.669+j0.743	S_{43}	10+j0	S_{45}	-1.222-j0.305
S_{61}	1.751+j0.309	S_{63}	-1.448+j0.645	S_{65}	10+j0

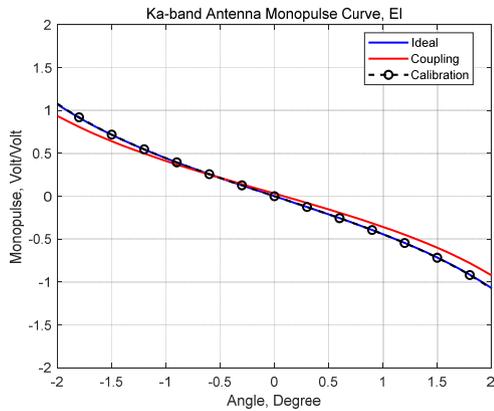


그림 4. 수신기 영향성을 고려한 시선각 오차 및 보정한 결과, 고각
 Fig. 4. Boresight error including receiver coupling effect and calibration results, elevation

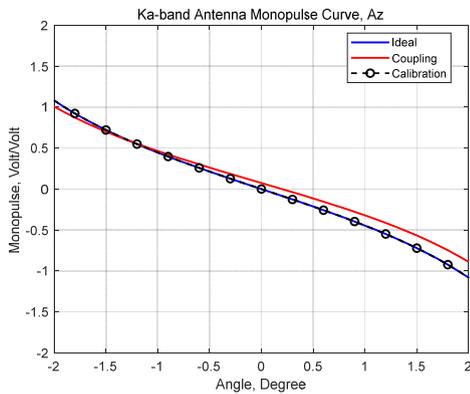


그림 5. 수신기 영향성을 고려한 시선각 오차, 방위각
 Fig. 5. Boresight error including receiver coupling effect and calibration results, azimuth.

이와 같은 상황에서 본 논문에서 제안한 보정 방식인 그림 2(하드웨어 구성), 표 1(간섭항 및 주경로 이득에 해당하는 산란 파라미터 획득), 수식 (8)(수학적 연산)을 적용하면 그림 4, 5 내에서 표시하였듯이 수신 채널 간 간

섭량을 보정한 시선각 오차 그래프를 복원할 수 있다.(그림 4, 5 내 Calibration 인덱스 참조) 복원된 그래프는 수신 채널 간 간섭이 없는 상태의 이상적인 시선각 오차 그래프와 완벽하게 일치하는 것을 그림 내에서 확인할 수 있다.

요컨대 그림 2와 같이 모노펄스용 레이더용 다채널 수신기의 입출력의 복소 산란 파라미터를 측정할 수 있는 하드웨어 구성과 표 1과 같이 보정 신호를 획득하여 총 9개의 수신기 산란 파라미터를 측정하면, 수식 (8)을 적용하여 수신 채널 간 간섭에 의한 시선각 오차 그래프의 왜곡을 보정 할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 모노펄스용 레이더용 다채널 집적 수신기의 채널 간 간섭을 보상할 수 있는 보정 방법을 제안하였다. 보정에는 보정을 위한 추가적인 하드웨어 구성, 스위치 제어 방법 및 획득한 산란 파라미터를 이용한 수학적 연산이 이용되었다. 이를 이용하면 채널 간 간섭을 배제할 수 없는 소형화 된 모노펄스 레이더용 다채널 집적 수신기의 수신 채널 간 간섭을 보상하여 시선각 오차 성능의 열화 없이 소형 모노펄스 레이더 운용이 가능하다.

References

- [1] Hong-Rak Kim, Hyo-Young Hyun, Younjin Kim, Seonkeol Woo, Gwanghee Kim, "Development of High-Speed Real-Time Signal Processing Unit for Small Radio Frequency Tracking Radar Using TMS320C6678", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 21, No. 5, pp. 11-18, Oct. 2021. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.1.9>
- [2] Man-Hee Lee, Se-Hwan An, Youn-Jin Kim, Hong-Rak Kim, Hae-Chang Jeong, Sun-Ho Kim, "Receiver for Ku-band Compact Doppler Radar", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 20, No. 1, pp. 89-93, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2020.20.1.89>
- [3] Mihui Seo, Hyun-ju Kim, Sosu Kim, "Development of 1 W Class SSPA of a W-band Compact Pulse Doppler Radar", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 34, No. 5, pp. 337-344, Feb. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.5.337>
- [4] Byung-Chang Nam, Gyoosoo Chae, "Design of a

K-band CW Radar Transceiver”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 10, No. 7, pp. 1532-1535, Jul. 2009.

- [5] Seok-Ho Noh, Jee-Youl Ryu, “Realization of 77GHz Power Amplifier for Automotive Radar”, Journal of KIIT, Vol. 16, No. 9, pp. 23-29, Sep. 2018
DOI: <https://doi.org/10.14801/ikiit.2018.16.9.23>
- [6] Jinsung Park, Haechang Jeong, Bojun Kwon, Apparatus and Method for Calibrating a Receiver in a Monopulse Radar Detecting a Target using Transmission/Reception Signal of a FMCW waveform, KOR Patent 1019978290000, filed Aug. 10, 2017, Issued Jul. 02, 2019
- [7] Ki-Hong Lee, Wan-Sik Kim, Gye-Kuk Kim, “The Design and Fabrication of Multi Channel Receiver for Radar System”, The Journal of Korea Society of Computer and Information, Vol. 16, No. 10, pp. 131-136, Oct. 2011.
- [8] Byeoung-Koo Jeong, Dae-Hong Lee, Tae-Hwan Joo, “Monopulse Receiver Design with Adaptive Transmission Speed on Ku-band”, The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 29, No. 7, pp. 500-507, Jul. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.7.500>
- [9] Seong Sik Yang, Ju Hyun Lim, Sung Chan Song, “Design and Fabrication of the Ka-band Receive Module for Millimeter Wave Seeker”, The Journal of Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 49, No. 1, pp. 78-84, Jan. 2012.
- [10] Linpu Li, Yiqiang Gao, Rong Qian, Xiaowei Sun, “W-band Four-Channel Receiver MMIC in 0.1um GaAs PHEMT Technology”, 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore, pp. 1512-1514, 2019
DOI: <https://doi.org/10.1109/APMC46564.2019.9038426>
- [11] P. Klatser, R. Boot, G. Voshaar and C. Roeloffzen, “A Fully Integrated 8-Channel Wide-Band Receiver for Ku-band Dual-Polarization Phased Array in SiGe BiCMOS”, 2019 9th European Microwave Integrated Circuit Conference, Rome, Italy, pp. 37-40, 2014
DOI: <https://doi.org/10.1109/EuMIC.2014.6997785>
- [12] M. M. R. Esmael, M. Ayman, K. Gooda, M. A. Y. Abdalla and M. Mobarak, “10.5-14.5GHz four-channel phased array receiver in 0.13- μ m CMOS technology”, 2016 IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), Austin, TX, USA, pp. 60-63, 2016
DOI: <https://doi.org/10.1109/SIRF.2016.7445468>
- [13] Samuel M. Sherman, David K. Barton, Monopulse Principles and Techniques, Second Edition, Artech, 2011

저 자 소 개

박 진 성(정회원)



- 2008년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : 레이더용 RF 송수신기 등

※ 이 성과는 2022-2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 연구임