

# 고해상도 능동 위상 배열 영상 레이더를 위한 고안정 송수신 시스템 개발 및 성능 보정 연구

## Development and Performance Compensation of the Extremely Stable Transceiver System for High Resolution Wideband Active Phased Array Synthetic Aperture Radar

성진봉 · 김세영 · 이종환 · 전병태

Jin-Bong Sung · Se-Young Kim · Jong-Hwan Lee · Byeong-Tae Jeon

### 요 약

본 논문에서는 고해상도 광대역 영상 레이더용 X-대역 송수신기를 설계, 제작하고 성능 보정을 위한 연구를 수행하였다. 영상 레이더용 송수신기는 송신기, 수신기, 송수신 경로기 및 주파수 발생기로 구성되며, 특히 수신기는 지상 이동 표적 탐지를 위한 2 채널 모노펄스 구조를 가진다. 송수신기는 운용 모드에 따라 고해상도 모드를 위한 deramping 수신 기능을 제공하며, SAR 운용 모드에 적합하게 수신 대역폭 선택 기능을 가진다. 송수신기는 X-대역에서 300 MHz 이상의 대역폭을 가지며, T/R 모듈을 구동시키기에 적합하도록 송신 출력은 13.3 dBm이며, 수신 이득은 39 dB, 잡음 지수는 3.96 dB 이하인 성능을 얻었다. 수신 이득은 6 비트 디지털 감쇠기에 의해 제어되며, 이득 조절 범위는 30 dB를 보였다. 수신 동적 범위는 30 dB이며, 수신 I/Q 채널 간 진폭 오차는  $\pm 0.38$  dB 이내, 위상 오차는  $\pm 3.47$ 도 이내를 보였다. 시험 결과, 송수신기는 영상 레이더에서 요구되는 전기적 성능을 만족하였으며, 또한 영상 레이더의 성능을 크게 좌우하는 펄스 오차 항목이 분석되었으며, 임펄스 응답 특성을 개선하기 위한 보정 기법을 적용하여 개발 목표 규격을 만족하는 것을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, X-band transceiver for high resolution wideband SAR systems is designed and fabricated. Also as a technique for enhancing the performance, error compensation algorithm is presented. The transceiver for SAR system is composed of transmitter, receiver, switch matrix and frequency generator. The receiver especially has 2 channel mono-pulse structure for ground moving target indication. The transceiver is able to provide the deramping signal for high resolution mode and select the receive bandwidth for receiving according to the operation mode. The transceiver had over 300 MHz bandwidth in X-band and 13.3 dBm output power which is appropriate to drive the T/R module. The receiver gain and noise figure was 39 dB and 3.96 dB respectively. The receive dynamic range was 30 dB and amplitude imbalance and phase imbalance of I/Q channel was  $\pm 0.38$  dBm and  $\pm 3.47$  degree respectively. The transceiver meets the required electrical performances through the individual tests. This paper shows the pulse error term depending on SAR performance was analyzed and range IRF was enhanced by applying the compensation technique.

Key words : Transceiver, SAR, IRF

「이 연구는 국방과학연구소 주관 사업의 일환으로 연구되었음.」

국방과학연구소 영상정보체계개발단(Image Information PEO, Agency for Defense Development(ADD))

· 논문 번호 : 20100312-019

· 교신저자 : 성진봉(e-mail : courtneys@paran.com)

· 수정완료일자 : 2010년 4월 29일

I. 서 론

영상 레이더(Synthetic Aperture Radar: SAR)는 관 심 영역에 대해 전자파를 송신한 후 지표면으로부터 반사되어 돌아오는 전자파를 시간에 따라 합성해 영 상을 획득하는 시스템이다. 이러한 영상 레이더는 광범위한 영역의 탐사 및 군사 목적의 표적 탐지 식 별에 많이 사용되고 있다. 한편, 정밀 표적 식별을 위한 영상 레이더의 해상도 향상에 관한 기술 수요 가 점차 증가하고 있다. 고해상도 영상 레이더를 위 해서는 레이더 펄스 대역폭의 범위가 수백 MHz 정 도인 광대역 신호 처리가 필요하다<sup>[1]-[2]</sup>. 이러한 고 해상도 광대역 영상 레이더용 송수신기에서 요구되 는 기능은 다음과 같다.

- 대역 확장 기능
- 능동 안테나 구동을 위한 송신 신호 증폭 기능
- 송신 및 수신 신호의 주파수 상/하향 변환 기능
- 고해상도 모드를 위한 Deramping 수신 기능
- 코히런트 복조 기능
- 운용 모드별 수신 대역폭 선택 기능
- 송수신기 채널 보정 경로 제공 기능
- 디지털 감쇠기를 이용한 수신 이득 제어 기능
- 안정된 기준 신호 및 국부 발진 신호 제공 기능

고해상도 광대역 영상 레이더 신호를 처리하는 송수신기에서는 송신 펄스의 진폭 및 위상 안정도가 매우 중요한 성능 요소가 된다<sup>[3],[4]</sup>. 영상 레이더 시 스템의 펄스 오차는 진폭 오차와 위상 오차로 분류 되며, 시스템의 진폭 및 위상에 영향을 주는 여러 요 인들에 의해 나타난다. 펄스 오차는 최종 영상 데이 터의 품질과 관련된 임펄스 응답 함수(Impulse Res ponse Function: IRF)와 밀접한 관계가 있다. IRF 수 식은 식 (1)과 같다. 여기서  $S$ 는 수신 신호,  $T$ 는 기준 신호,  $\tau$ 는 펄스 폭,  $W_R$ 은 가중치 함수,  $N_R$ 은 가중치 함수와 관련된 정규화 계수이다.

$$g_R^2 = \left| \frac{1}{N_R \tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} W_R(t') T^*(t) S(t+t') dt \right|^2 \quad (1)$$

펄스 오차 값에 의해 IRF 특성인 거리분해능, PSLR(Peak Side Lobe Ratio) 및 ISLR(Integrated Side Lobe Ratio) 성능 값이 크게 달라진다. 펄스 오차는 펄스 내 오차와 펄스 간 오차로 나뉘며, 각각의 오차 는 거리(range) 방향과 방위(azimuth) 방향 IRF 성능 에 영향을 미친다.

본 논문에서는 X-대역 SAR용 송수신기를 설계 하고 제작하였다. 논문의 II 장에서는 송수신기의 전 반적인 설계에 대해 기술하였고, III 장에서는 송수신 기의 제작 및 시험 결과를 제시하였다. IV 장에서는

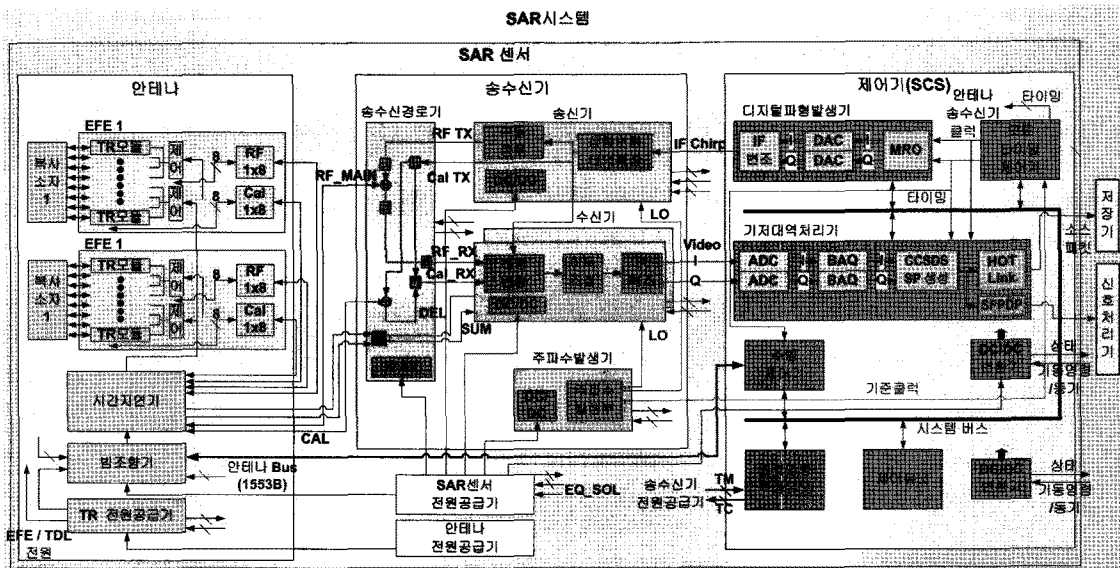


그림 1. SAR 시스템 블록도  
Fig. 1. Block diagram of SAR system.

송수신기의 펄스 내 진폭 오차와 위상 오차의 보정 결과에 대하여 기술하였고, V 장에서는 결론을 내리도록 한다.

## II. 영상 레이더용 송수신기 설계

### 2-1 송수신기 구조 및 개발 목표 규격

본 논문에서 제안하는 X-대역 송수신기가 적용될 SAR 시스템은 그림 1과 같이 안테나, 송수신기, 제어기, 저장기, 그리고 신호처리기로 구성된다.

안테나는 능동 위상 배열 방식으로 X-대역 레이더 신호를 방사하고, 표적에 맞고 돌아오는 반사 신호를 수신하는 송수신(T/R) 모듈이 다수 배치된다. T/R 모듈에 의해 송수신 안테나 복사 패턴의 합성, 수신 신호에 대한 저잡음 증폭 및 출력 신호에 대한 전력 증폭이 수행된다.

송수신기는 송신기, 수신기, 송수신 경로기 그리고 주파수 발생기로 구성된다. 송신기는 디지털 파형발생기로부터 L-대역 75 MHz 대역폭의 IF 신호를 입력받아서 주파수 상향 변환용 주파수 혼합기 및 주파수 체배 회로를 통과하여 X-대역 300 MHz 대역폭의 RF 신호를 생성한다. 또한, 송신 채널 보정 경로를 제공하고 안테나 구동에 필요한 전력으로의 증폭 및 고해상도 모드를 위한 수신 LO 신호용 dechirp 신호 생성 기능을 담당한다. 또한 송신 채널의 열화 특성과 진폭 보정을 위하여 9 dB 정도의 이득을 제어하는 기능을 가지고 있다.

수신기는 안테나로부터 송수신 경로기를 통과하여 입력된 RF 신호를 I/Q 신호로 주파수 하향 변환한 뒤 저잡음 증폭한다. 수신기는 2 채널 모노펄스 구조이며, 광대역 신호의 수신이 가능하도록 설계되었다. 또한, 수신 채널 보정 경로를 제공하며, SAR 운용 모드에 적합한 IF 필터의 대역폭 선택 기능을 제공한다. 수신기는 표준이나 광역 모드에서는 일반적인 SAR 수신 구조로 주파수 발생기로부터 입력된 국부 발진 신호를 이용하여 주파수를 하향 변환하는 구조이지만, 고해상도 모드에서는 광대역의 신호 처리를 위하여 송신기로부터 전달된 수신 LO용 dechirp 신호를 국부 발진 신호로 이용하여 주파수 하향 변환 및 대역폭 축소 기능을 제공하는 dechirp 수신 구조이다. 또한 수신기는 거리에 따라 달리 입력

표 1. 송수신기 개발 목표 규격

Table 1. The specification of transceiver.

항목		개발 목표 규격
송신성능	1. 송신 출력 주파수	X-대역
	2. 송신 대역폭	최대 300 MHz
	3. 송신 출력	13±2 dBm(단독) 38.5±0.5 dBm (반도체송신기 연동)
수신성능	4. 수신 이득	39±2 dB (오차 ±(0.5 + inserted atten의 0.3 %) dB 이내)
	5. 잡음 지수	10 dB 이하
	6. 수신 동적 범위	30 dB 이상
	7. 수신 이득 조절 범위	30 dB
	8. IF BPF 대역폭	40/80/120/300 MHz
	9. 채널 간 진폭 차	±0.5 dB 이내
	10. 채널 간 위상차	90±3.5도 이내
11. 펄스 진폭/위상 오차	표 2 참조	
12. 전력 소모	100 W 이하	
13. 크기	380 mm×250 mm×270 mm (W×H×D)	

되는 신호간의 방사 특성을 조절하기 위하여 6 비트 디지털 감쇠기를 이용하여 수신 이득을 제어하는 기능을 가지고 있다.

송수신 경로기는 송수신 신호 및 송수신 채널 보정 신호의 경로를 제공하며, 2 채널 모노 펄스 수신 경로를 제공한다. 송신기로부터 안테나로의 송신 경로, 안테나로부터 수신기로의 수신 경로, 안테나와 송신기/수신기간의 송수신 채널 보정 경로를 제공한다. 또한, 송수신 채널 간 격리 기능을 제공한다. 주파수 발생기는 송수신기에 필요한 국부 발진 신호를 제공하며 시스템 기준 클럭 신호를 생성한다.

송수신기의 개발 목표 규격을 표 1에 나타내었다. 송수신 중심 주파수는 X-대역이며, 송신 대역폭은 최대 300 MHz이다. 송수신기 자체 송신 출력은 13±2 dBm이며, SSPA 연동시 38.5±0.5 dBm이다. 수신 이득은 39±2 dB, 잡음 지수는 10 dB 이하이며, 수신 동적 범위는 30 dB 이상, 수신 이득 조절 범위는 30 dB이다. 수신 IF 대역 통과 여파기의 대역폭은 SAR 시스템의 운용 목적에 따라 4개 주파수 대역폭에서 하나를 선택할 수 있어야 한다. 송수신기의 펄스 진

표 2. 펄스 진폭/위상 오차 개발 목표 규격  
Table 2. The specification of amplitude and phase error.

진폭 오차(펄스 내)	
Error term	개발 목표 규격
Linear(dB)	2.07
Quadratic(dB)	1.06
Random(dBrms)	1.34
위상 오차(펄스 내)	
Error term	개발 목표 규격
Linear(deg)	10
Quadratic(deg)	19.8
Random(deg rms)	10.85
진폭 오차(펄스 간)	
Error term	개발 목표 규격
Linear(dB)	0.72
Quadratic(dB)	0.35
Random(dBrms)	0.64
위상 오차(펄스 간)	
Error term	개발 목표 규격
Linear(deg)	35
Quadratic(deg)	8.4
Random(deg rms)	12.07

폭 오차와 위상 오차 개발 목표 규격은 표 2와 같다. 펄스 내 절대오차는 수신기 출력 신호와 파형 발생기에서 출력된 이상적인 신호를 비교한 결과이며, 펄스 내 상대오차는 수신 신호에서 기준 펄스와 다른 펄스간의 상대 오차를 비교한 결과이다. 펄스 간 오차는 수신 신호에서 펄스별 평균 값을 상호 비교한 결과이다. 펄스 오차 관련 수식은 식 (2)와 같다. 여기서,  $Z_m$ 은 수신 신호,  $R_k$ 는 기준 신호,  $A$ 는 펄스의 진폭 값,  $\mu$ 는 chirp rate,  $a_m(t_n)$ 과  $\phi_m(t_n)$ 는 샘플  $n$ 펄스  $m$ 에서의 진폭과 펄스 오차이다. 펄스 내 절대 오차와 상대 오차 관련 수식은 식 (3)과 같다. 오차 성분은 진폭과 위상에 대하여 각각 Linear, Quadratic 및 Random 항목으로 분류된다.

$$Z_m(t_n) = a_m(t_n)\exp(j\phi_m(t_n))A\exp(j\pi\mu t_n^2)$$

$$R_k(t_n) = a_k(t_n)\exp(j\theta_k(t_n))B\exp(j\pi\mu t_n^2) \quad (2)$$

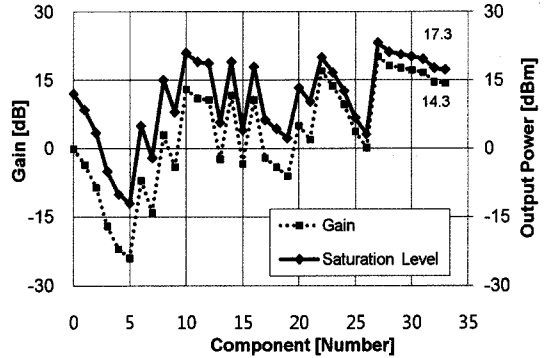


그림 2. 송신 경로에 대한 이득 및 출력 전력 버짓  
Fig. 2. Gain and output power budget of transmit path.

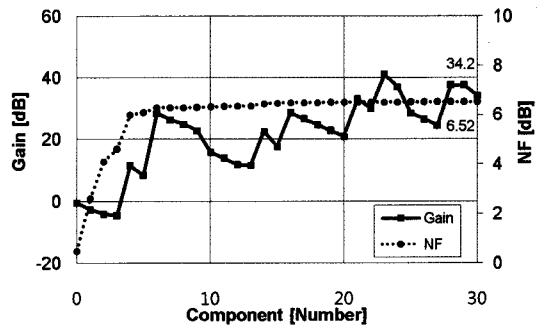


그림 3. 수신 경로에 대한 이득과 잡음 지수 버짓  
Fig. 3. Gain and noise figure budget of receive path.

$$A_{s,m}(t_n)\exp(j\phi_{s,m}(t_n))$$

$$= \frac{Z_m(t_n)}{Z(\text{mean})\exp(j\pi\mu t_n^2)}$$

$$A_{r,m}(t_n)\exp(j\phi_{r,m}(t_n))$$

$$= \frac{Z_m(t_n)R_k(\text{mean})}{Z_m(\text{mean})} \quad (3)$$

설계된 송수신기의 송신 경로 budget은 그림 2와 같다. 선정된 MMIC 및 W/G 부품들을 이용한 송수신기의 송신 경로에 대한 budget 해석 결과, 이득은 14.3 dB이고 출력 P1dB는 17.3 dBm이다. 송수신기의 수신 경로 budget은 그림 3과 같다. 해석 결과, 수신 이득은 34.2 dB이고, 잡음 지수는 6.52 dB이다. 그림 4는 최대 수신 레벨과 수신 잡음 신호 레벨을 나타낸 것으로 수신 잡음 신호 레벨은 대역폭이 40 MHz 인 경우와 300 MHz인 경우를 도시하였다.

### III. 송수신기 제작 및 시험

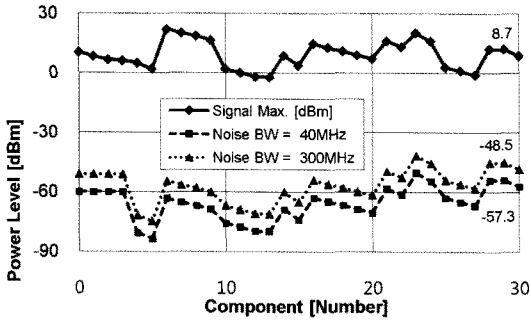


그림 4. 최대 수신 레벨과 수신 잡음 신호 레벨  
Fig. 4. Receive signal level budget. Maximum receive signal level and thermal noise power budget of receive path.

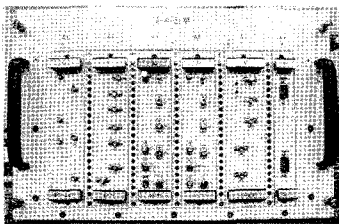
### 3-1 송수신기 제작 형상

설계된 송수신 budget을 바탕으로 제작된 송수신기의 형상은 그림 5와 같다. 크기는 380 mm×246.1 mm×267.2 mm이며, 왼쪽부터 순서대로 송수신 경로기, 송신기, 수신기 #1, 수신기 #2, 주파수 발생기 그리고 외부 인터페이스 보드로 구성된다.

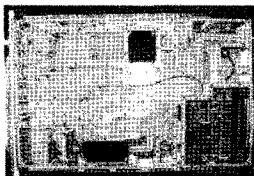
### 3-2 시험 결과

송수신기의 전력 소모량은 시험 결과 90.3 W를 보였다.

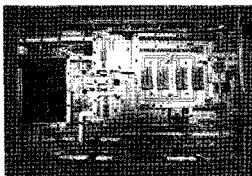
영상 레이더의 송신 신호는 순시 대역폭이 해상



(a) 송수신기 전면  
(a) Front of transceiver



(b) 송신기 전면  
(b) Back of transmitter



(c) 수신기 후면  
(c) Back of receiver

그림 5. 제작된 송수신기  
Fig. 5. Fabricated transceiver.

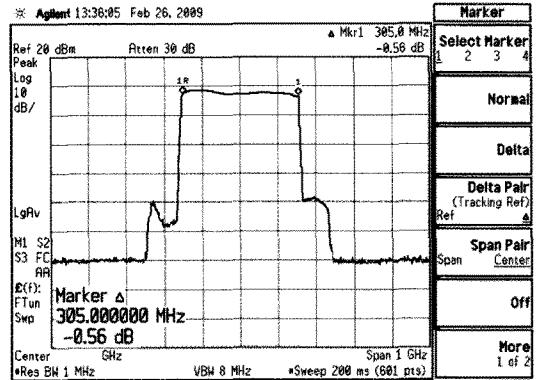


그림 6. 송신 출력 주파수 및 대역폭  
Fig. 6. The output frequency and bandwidth.

도와 직접적으로 관련되어 있으므로 대역폭 특성이 중요한 설계 변수이다. 송신 대역폭 시험은 SAR 운용 모드를 점검하기 위하여 입력 chirp 신호의 대역폭이 40 MHz, 80 MHz, 120 MHz 그리고 300 MHz인 경우에 대해 각각 수행하였으며, 그림 6은 300 MHz 입력 신호에 대한 송수신기의 송신 출력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 출력 신호의 대역폭은 305 MHz이고, 레벨 평탄도는 2.05 dB로 개발 목표 규격을 만족하는 결과를 얻었다.

그림 7과 8은 송수신기의 송신 출력 레벨 시험 결과를 나타낸 것으로 송신기 단독 출력 레벨은 케이블 손실을 포함하여 13.3 dBm이고, 반도체 송신기 연동시의 출력 레벨은 38.044 dBm으로 개발 목표 규격

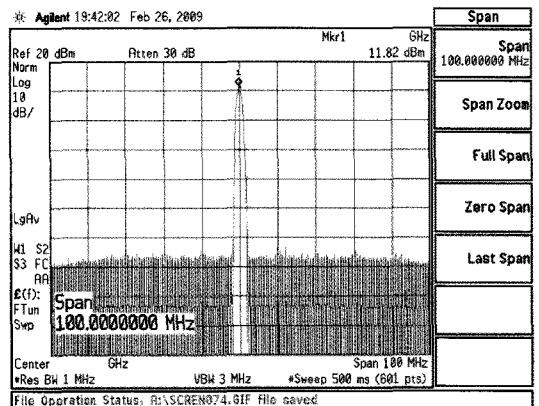


그림 7. 송신 출력 레벨(송신기 단독, 케이블 손실 1.48 dB)  
Fig. 7. The output power level without SSPA(1.48 dB cable loss).

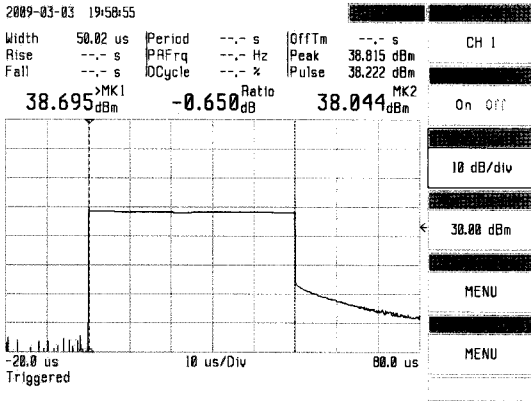


그림 8. 송신 출력 레벨(SSPA 연동)  
Fig. 8. The output power level with SSPA.

을 만족한다.

수신 이득 시험과 수신 잡음 시험은 그림 1의 송수신기 블록도에서 송수신 경로를 제외하고 수신기 단독으로 시험하였다. 송수신 경로의 수신 경로 시험 결과, 수신 채널 삽입 손실은 3.8 dB를 보였다. 수신기 단독 시험 결과에서는 그림 3의 수신 budget 결과에서 송수신 경로의 수신 채널 삽입 손실을 고려해야 한다. 수신 이득 시험은 입력 chirp 신호의 대역폭이 40 MHz, 80 MHz, 120 MHz 그리고 300 MHz인 경우에 대해 각각 수행하였으며, 그림 9는 300 MHz 대역폭을 갖는 입력 신호에 대한 시험 결과로 모든 대역 내에서 39±1 dB로 개발 목표 규격을 만족하는 결과를 얻었다.

수신 잡음 지수 시험은 수신기 내의 디지털 감쇠기의 감쇠도가 0 dB, 20 dB, 그리고 30 dB인 경우에

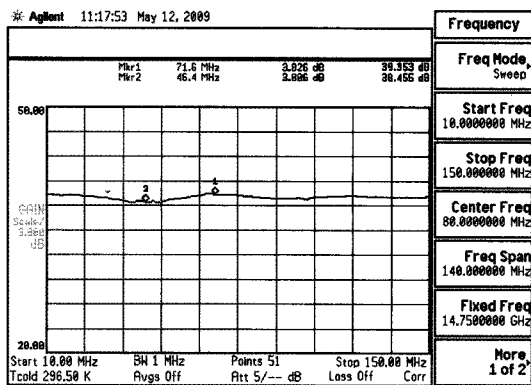


그림 9. 수신 이득(입력 신호 대역폭 300 MHz)  
Fig. 9. The receive gain of 300 MHz chirp bandwidth.

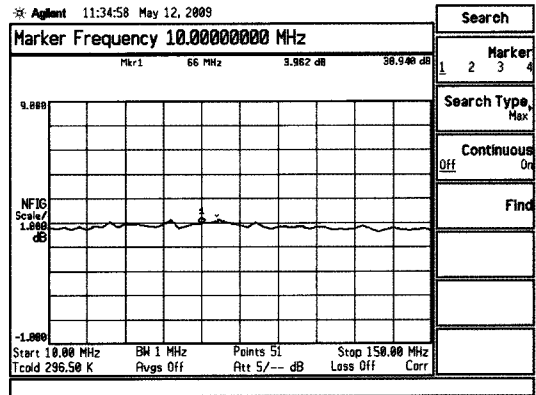


그림 10. 수신 잡음 지수(0 dB 감쇠)  
Fig. 10. The noise figure(0 dB attenuation).

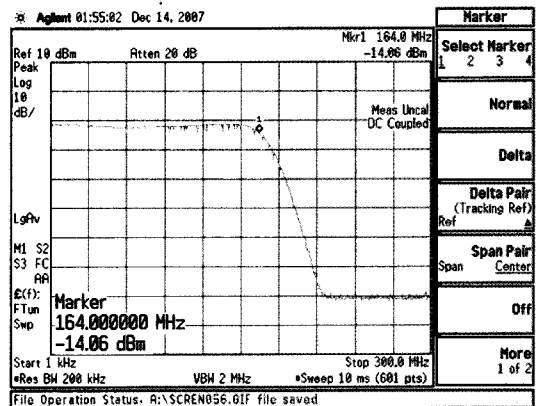
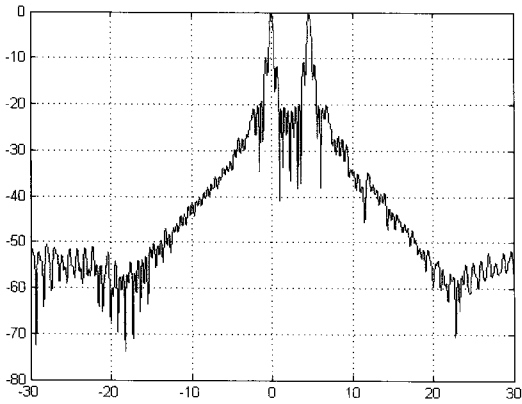


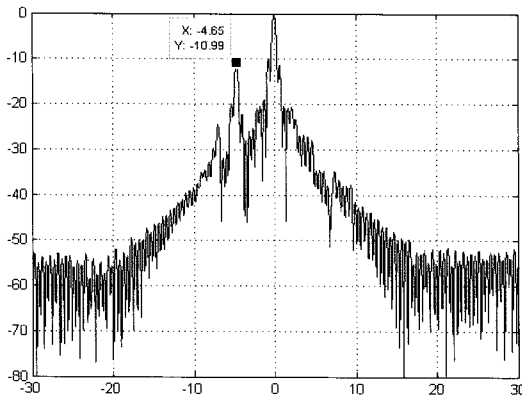
그림 11. 수신 대역폭(I 채널)  
Fig. 11. The receive bandwidth at I channel.

대해 수행하였으며, 그림 10은 0 dB 감쇠일 때의 시험 결과를 나타낸 것이다. 시험 결과, 0 dB 감쇠시 3.96 dB, 20 dB 감쇠시 9.45 dB, 그리고 30 dB 감쇠시 24.7 dB의 수신 잡음 지수 특성을 얻었다. 감쇠도가 증가할수록 수신 잡음 지수 성능이 저하되는 결과를 얻었으며, 이에 대한 원인을 분석한 결과, 디지털 감쇠기 전단에 위치한 일부 증폭기와 혼합기의 P1dB 특성이 낮아서 발생하는 것을 파악하였다.

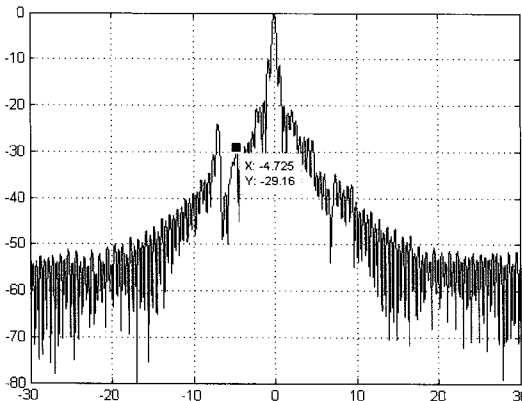
수신 대역폭 시험은 입력 chirp 신호의 대역폭이 40 MHz, 80 MHz, 120 MHz 그리고 300 MHz인 경우에 대해 각각 수행하였으며, 그림 11은 입력 대역폭이 300 MHz일 때 SSB(Single-Sideband Modulation) 복조 후 I 채널에서의 출력 스펙트럼을 나타낸 것으로 155 MHz의 3 dB 대역폭 성능을 얻었다.



(a) 0 dB 감쇠  
(a) 0 dB attenuation



(b) 10 dB 감쇠  
(b) 10 dB attenuation



(c) 30 dB 감쇠  
(c) 30 dB attenuation

그림 12. 수신 동적 범위 시험 결과  
Fig. 12. The result of dynamic range.

그림 12는 수신 동적 범위 시험 결과를 나타낸 것이다. 수신 동적 범위 시험은 송수신 경로기의 송신

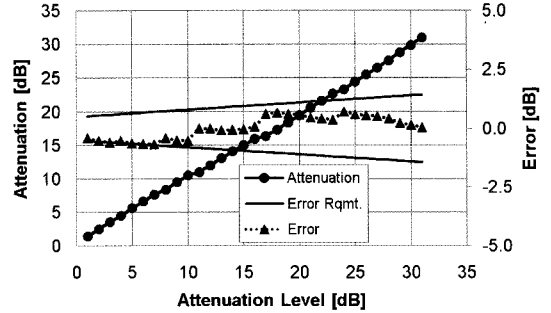


그림 13. 수신기 이득 조절 오차  
Fig. 13. The receiver gain control range.

출력 단자와 수신 입력 단자 사이에서 신호 경로를 둘로 나누어서 한 쪽 신호 경로에만 시간 지연기와 감쇠기를 배치하여 시험하였다. 시험 결과는 송신기 IF 입력 단자에 chirp 신호를 입력하고, 수신기 I/Q 출력 신호를 정합 필터를 이용하여 거리 방향으로 압축하여 송수신기의 수신 동적 범위를 확인하였다. 감쇠가 적용된 신호의 크기가 감쇠가 적용되지 않은 신호에 의해 보이지 않을 때의 감쇠 적용 값이 수신 동적 범위이며, 본 송수신기는 30 dB의 시험 결과를 얻었다.

수신 이득 조절 범위 시험은 수신기 내 디지털 감쇠기(Digital Control Attenuator: DCA)의 감쇠도를 조절하면서 수행하였으며, 파형 발생기로부터 발생된 Chirp 신호를 송신기 IF 단자에 입력하고, 송신기와 송수신 경로기, 그리고 수신기를 통과하여 출력된 I/Q 신호에 대하여 압축하여 결과를 분석하였다. 그림 13은 수신 이득 조절 범위 시험 결과를 나타낸 것으로 측정된 감쇠 값은 실선으로 오차는 점선으로 표시하였다. 시험 결과, 30.96 dB의 이득 조절 범위 성능을 얻었다. 그림 14는 수신기 출력 주파수에 대한 수신기의 I/Q 채널 간 이득 및 위상 차를 나타낸 것으로 채널 간 이득 차는 최대 0.38 dB이고, 위상 차는 최대 86.53도 이었다.

#### IV. 펄스 내 오차 보정

##### 4-1 오차 분석 결과

Ⅲ장에서는 SAR 설계 변수에 대한 일반적인 분석이 수행되었다. SAR 성능 중 영상의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 항목은 송신 펄스에 대한 송신 시

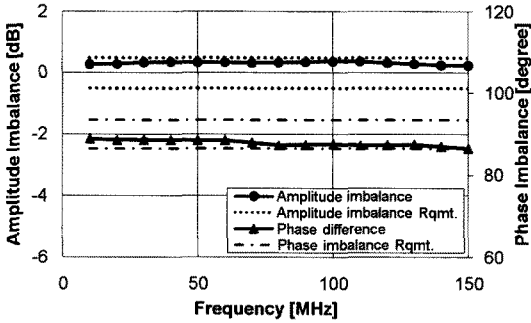


그림 14. I/Q 채널 간 이득/위상 차  
Fig. 14. The gain and phase difference between I and Q channel.

시스템의 하드웨어 안정도이다. SAR 송수신 시스템의 진폭/위상 오차는 펄스 내 오차와 펄스 간 오차로 나뉘며, 펄스 내 오차는 거리 방향 IRF 특성과 관계가 있다. 펄스 오차 시험 결과를 표 3에 나타내었다. 펄스 오차 시험은 파형 발생기에서 Chirp 신호를 생성하여 송신기, 송수신 경로기와 수신기를 통과하는 루프 백(loop-back) 경로를 이용하여 수행했다.

수신 신호는 1분 동안 획득하였으며, RF 대역폭은 300 MHz, 펄스 폭은 50 usec, 펄스 반복 주기는 500 msec, 펄스 개수는 총 120개이었다. 진폭 오차의 경우, 개발 목표 규격을 만족하나, 펄스 내 위상 오차

표 3. 진폭/위상 오차 시험 결과  
Table 3. Test result of the amplitude and phase error.

진폭 오차			
	Linear	Quadratic	Random
펄스 내 절대오차	-0.01 dB/us	-0.003 dB/us	0.07 dBrms
펄스 내 상대오차	0.04 dB	0.04 dB	0.4 dBrms
펄스 간 오차	≈0 dB	≈0 dB	≈ 0 dBrms
위상 오차			
	Linear	Quadratic	Random
펄스 내 절대오차	6.2 deg/us	530 deg/us	88 degrms
펄스 내 상대오차	500 deg	-1.46 deg	2.49 degrms
펄스 간 오차	4.45 deg	0.005 deg	211 degrms

의 절대 오차 항목의 경우 quadratic 오차 성분이 개발 목표 규격보다 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이 오차 성분은 송신과 수신 경로상에 위치한 필터의 형식과 차수에 크게 의존하는 항목으로써 스퓨리어스와 고조파 신호의 억압에 따른 3-dB 대역폭 근처에 위치한 극점(pole)의 차수에 의해 크게 발생한 것으로 확인되었다.

#### 4-2 오차 추출 결과

오차 보정 변수는 측정된 수신 신호에 2차 다항식 피팅(polynomial fitting) 기법을 적용하여 추출하였다. 본 논문에서는 펄스 내 절대 오차에 대한 보정을 수행하였으며, 진폭 및 위상 오차 시험 결과 및 보정 계수 추출 결과를 그림 15와 16에 각각 도시하였다. 실선은 시험 결과이며, 점선은 다항식 피팅 기법이 적용된 결과이다.

#### 4-3 오차 보정 결과

보정 계수는 다항식 피팅 기법 적용에 의해 계수를 추출한 뒤 추출된 계수를 수신 신호에 역으로 보정하는 post-processing 기법을 적용하여 수신 신호에 대한 신호 보정을 수행하였다.

보정 수식은 식 (4)와 같다<sup>[5]</sup>. 여기서,  $i(t)$ 는 수신 신호로 수식 (1)의  $Z_m(t_n)$ 과 같고,  $w(t)$ 는 송수신

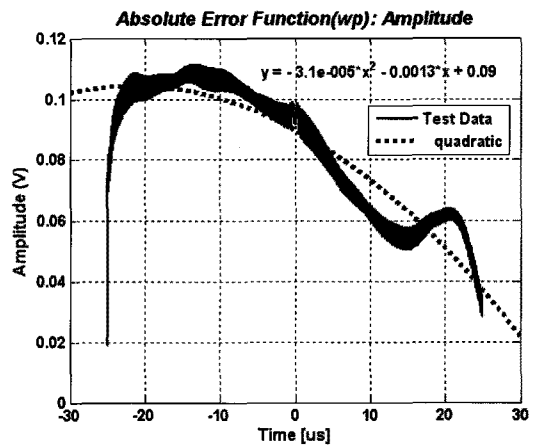


그림 15. 펄스 내 진폭 오차에 대한 보정 계수 추출 결과

Fig. 15. Compensation coefficients extraction of the within-pulse amplitude error.



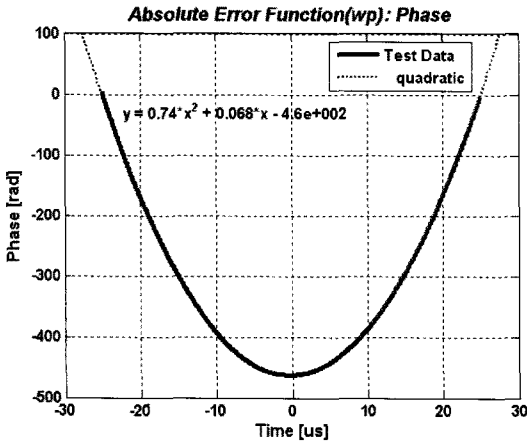


그림 16. 펄스 내 위상 오차에 대한 보정 계수 추출 결과

Fig. 16. Compensation coefficients extraction of the within-pulse phase error.

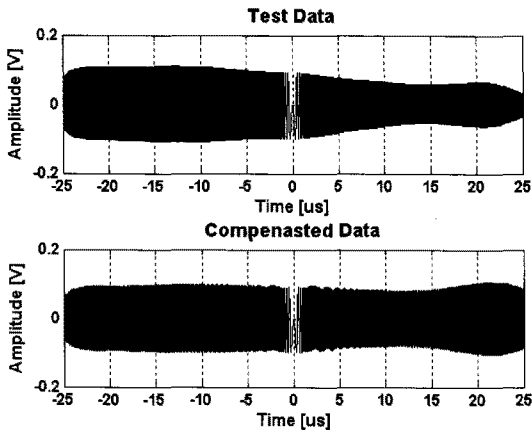


그림 17. 보정 전/후 파형 비교

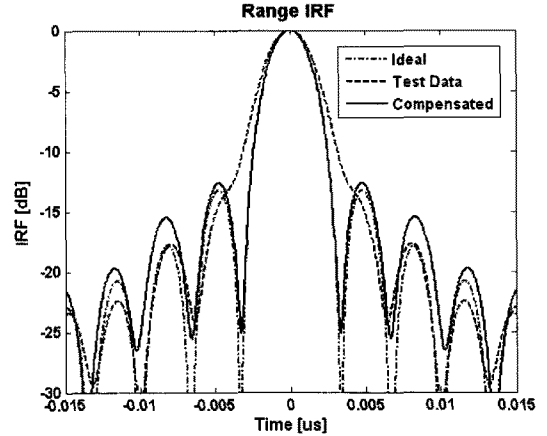
Fig. 17. Comparison of waveform.

기의 주파수 응답,  $\bar{I}(f)$ 는 수신 신호의 주파수 응답이다.

$$c(t) = \left[ \frac{1}{i(t)} \right] \times IFFT \left[ \bar{I}(f) \cdot \frac{W^*(f)}{|W(f)|^2} \right] \quad (4)$$

오차 보정 결과를 그림 17과 그림 18에 각각 도시하였다. 그림 17은 수신기 출력 I 신호에 보정 기법이 적용된 결과이며, 보정 전에 비해 보정 후 신호의 크기 차이가 많이 개선된 것을 확인할 수 있다.

그림 18은 보정 결과에 따른 거리 방향 IRF 결과를 비교 분석한 것으로 점선은 시험 결과, 실선은 보



	Resolution [nsec]	PSLR [dB]	ISLR [dB]
이상적 신호	2.88	-13.26	-10.09
시험 결과	3.36	-17.74	-10.37
보상 결과	2.88	-12.65	-8.76

그림 18. 보정 전/후 거리 방향 IRF 비교

Fig. 18. Comparison of IRF(---received waveform-compensated waveform).

정 결과를 보인다. 분석 결과 보정에 의해 거리분해능이 3.36 nsec에서 2.88 nsec로 향상되었으며, 본 논문이 적용될 SAR 시스템의 거리 방향 IRF 규격인 PSLR -11 dB 이하를 만족하는 것을 확인하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 광대역 영상 레이더용 송수신기를 설계, 제작하였고, 펄스 오차를 해석하여 거리 방향 IRF 성능 향상을 위한 펄스 오차 보정 기법을 연구하였다. 제작된 송수신기는 전기적 개발 목표를 대부분 충족하였다. 수신 잡음 지수의 경우 수신기 내 디지털 감쇠기의 감쇠가 커질수록 성능이 저하되는 특성을 보였으며, 이에 대한 원인을 분석하였다. 펄스 오차의 경우, 수신 신호에 대한 오차 보정 계수 추출 및 post-processing 기법을 적용하여 수신 신호에 대한 성능 개선을 수행하였다. 측정된 수신 신호에 대해 보정에 의한 결과를 분석하였다. 수신 신호의 보정 전/후 파형을 통해 진폭 및 위상 오차에 의한 수신 신호의 왜곡 성분이 보정에 의해 상당 부분 제거된 것을 확인하였다. 또한, IRF 분석을 통해 적

용된 보정 기법에 의해 거리분해능 및 PSLR 특성이 향상되는 것을 보였으며, 신호 보정 결과가 SAR 시스템의 개발 목표 규격을 만족하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Ian G. Cumming, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, pp. 130-131, 2005.  
 [2] John C. Curlander, Robert N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar, Systems & Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 15-16, 1991.  
 [3] 성진봉, 김세영, 이종환, 전병태, "임펄스 응답 성

능 향상을 위한 광대역 영상레이다 오차 해석 및 보정 기법 연구", 대한전자공학회 하계종합학술대회, 32(1), pp. 36-37, 2009년 7월.

[4] 정주용, 여환용, 김완식, 이수호, 김세영, 성진봉, "X-대역 SAR 레이더용 송신 모듈 구현", 한국전자과학회 추계학술대회, 2009년 11월.  
 [5] Se-Young Kim, Noh-Hoon Myung, "Wideband linear frequency modulated waveform compensation using system predistortion and phase coefficients extraction method", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 808-810, Nov. 2007.

성진봉



1998년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2001년~2007년: 한국전자통신연구원 연구원  
 2007년 3월~현재: 국방과학연구소

선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템 등

이종환



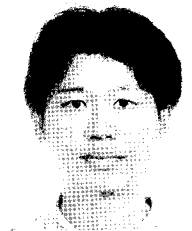
1998년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2005년 1월~2006년 10월: (주)삼성탈레스 책임연구원  
 2006년 2월: 충남대학교 전파공학과

(공학박사)

2006년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로 및 시스템

김세영



1991년 2월: 단국대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 1993년 2월: 단국대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 1993년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 2010년 2월: 한국과학기술원 전기

및 전자공학과 (공학박사)

[주 관심분야] 레이더 및 영상 레이더 초고주파 시스템 등

전병태



1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 1993년 3월~현재: 국방과학연구소

책임연구원

[주 관심분야] 영상 레이더 및 초고주파 시스템