

## 방향 탐지용 대공 근접 신관센서의 BPSK 송수신기 설계에 관한 연구

### Design of a BPSK Transceiver for the Direction Finding Proximity Fuze Sensor for Anti-air missiles

최재현\*                      이석우\*                      염경환\*\*  
Jae-Hyun Choi              Seok-Woo Lee              Kyung-Whan Yeom

#### Abstract

This paper describes the fundamentals, design, realization and test results of a BPSK(Bi Phase Shift Keying) transceiver for the direction finding proximity fuze sensor for anti-aircrafts or air missiles. The BPSK transceiver for the direction finding fuze sensor has been designed to detect a moving target by Doppler signal processing with the code correlation method and to distinguish direction by comparing received powers of each Doppler signal from adjacent three receiving antennas. The electrical and ESS(Environmental Stress Screening) tests of the BPSK transceiver showed satisfactory results and target detection and direction finding performances proved to be successful through dynamic operation tests by 155 mm gun firing.

Keywords : BPSK, Code Correlation(코드상관), Range Gate(거리 창), Direction Finding Fuze(방향 구분 신관), Dynamic Operation Test(동작기능시험)

#### 1. 서론

유도무기 시스템은 탄두를 기폭시키기 위해 근접 신관을 필요로 한다. 대공 미사일 탄두의 효과적인 기능을 이끌어내는 신관의 정확한 작동은 표적과의 성공적인 교전에 결정적이다<sup>[1]</sup>. 또한 차세대 공대공 미사일은 무기 효과를 최적화하기 위해 방향 탐지의 목표물

감지를 이용해야만 하는 표적탐지장치(TDD : Target Detecting Device)를 필요로 할 것이다<sup>[2]</sup>. 상기한 바와 같은 이유로 국내에서 지향성 탄두를 위한 방향 탐지용 대공 근접신관이 성공적으로 개발되어 중거리 지대공 유도무기인 천궁에 탑재되었다. 본 논문은 중거리 지대공 유도무기 천궁에 탑재한 방향 탐지용 전파형 대공 근접 신관센서의 BPSK 송수신기에 대해 기술한다. 신관센서는 표적과의 최대 상대속도 마하 5.5, 이격거리가 약 10 m 이내인 항공기 표적을 탐지하며 원주방향에서 30° 이내로 표적을 구분하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, 최대 탐지 거리 내에 있는 표적과의 상대속도에 따른 도플러 신호를 추출하는 방식

† 2012년 10월 4일 접수~2012년 12월 14일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 충남대학교(CNU)

책임저자 : 염경환(khyeom@cnu.ac.kr)

으로 표적탐지를 하게 되며, 방향 구분은 인접 3개 수신안테나의 수신전력을 비교한다.

신관센서의 송수신기는 원하는 거리를 벗어난 원치 않는 신호를 억제하고 송수신 안테나간의 커플링(coupling)에 의해 수신감도가 떨어지지 않도록 하기 위해, 반송파를 BPSK 변조하여 송수신하고 코드상관에 의한 코드상관 계수를 포함하는 도플러 신호를 추출하도록 설계하였다. 또한 원주방향으로의 방향 구분을 위해, 동시에 3개의 송신신호를 출력하도록 송신부를 설계하였고, 6개의 수신 입력을 스위칭하는 방법으로 크기를 축소하여 수신부를 3채널로 설계하였다.

본 논문에서는 신관센서의 거리측정과 방향탐지의 개념과 송수신기 설계한 필요한 설계 파라미터 및 설계 결과들에 대해 기술하고, 제작된 송수신기의 전기적인 특성결과 및 환경시험 결과를 기술한다. 마지막으로 신관센서와 조우시험장치를 이용하여 수집된 표적 반사신호와 155 mm 포발사를 이용한 동적기능시험 결과를 기술한다.

## 2. 동작 개념

BPSK 송수신기의 블록도를 Fig. 1에 나타내었다. BPSK 송수신기는 Fig. 1과 같이 송신부는 연속파 주파수  $F_0$ 를 생성하는 DRO(Dielectric Resonator Oscillator), BPSK 변조기 및 3개의 전력증폭기(AMP2)로 구성하여, 3개의 송신안테나에 송신신호를 동시에 최대 출력하도록 설계하였다. 또한 수신부는 각 채널에 스위치(SP2T)를 사용하여 6개의 안테나 중 3개를 선택할 수 있도록 크기를 축소하여 3채널로 설계하였다.

Fig. 1의 동작개념은 다음과 같다. 우선 송신신호는 신호처리부의 PN Code Generator에서 발생되는 Code를 사용하여 주파수  $F_0$ 인 CW(Continuous Wave)를 BPSK 변조하여 생성되고 송신안테나를 통해 표적에 송신된다. 표적에 의해 반사된 수신신호는 신관센서와 표적과의 상대 속도에 의해  $F_D$  만큼의 도플러 편이가 일어나므로 주파수가  $F_0+F_D$ 로 변화되어 수신된다. 수신 신호로부터 도플러 주파수를 검출하기 위해 송신단의  $F_0$ 를 분기하여 수신단 첫 번째 혼합기(mixer)의 국부(local)신호로 사용하여 수신신호와 혼합한다. 혼합기 출력 신호는 상관기(correlator)에서 거리별로 지연된 여러 개의 송신코드와 상관을 취하여 상관코드와 도플러 신호가 혼합된 형태의 신호로 변환된다. 이를 Fig. 2와

같이 Fig. 1의 주요 부분의 신호파형으로 설명한다. 편이상 코드 폭은 도플러 주파수의 2주기로 가정하였고, 코드 폭의 1/2만큼 지연되어 수신되는 수신신호를 “수신 RF(근거리)”라 하고, 1 코드 폭 만큼 지연되어 수신되는 수신신호는 “수신 RF(중거리)”라 하였으며, 3/2 코드 폭 만큼 지연되어 수신되는 수신신호는 “수신 RF(원거리)”라 하였다.

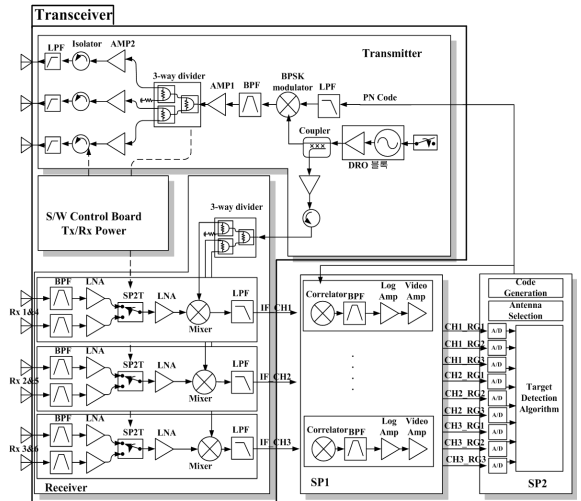


Fig. 1. Block diagram of the BPSK transceiver

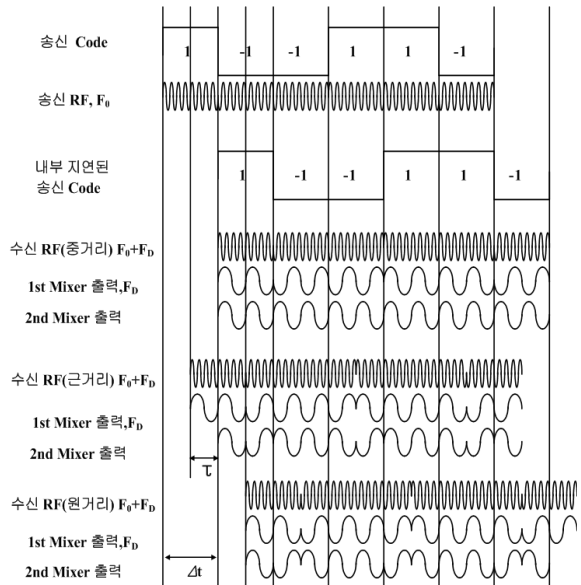


Fig. 2. The concept for range measurement of the BPSK method

“송신 RF”신호는 CW  $F_0$ 에 코드가 실려 BPSK 변조되어 송신되고 이는 Fig. 2의 두 번째 파형에 나타나 있다. “송신 Code”가 “1”에서 “-1”로 반전될 때 “송신 RF”신호의 위상반전이 있음을 알 수 있다. 다음으로 “내부 지연된 송신 Code”는 “송신 Code”의 한 코드 폭만큼 지연시켰다. 그리고 표적에 대한 반사신호는  $F_D$ 만큼 주파수가 편이되어 수신되고, 이 수신신호는 “수신 RF(중거리)”, “수신 RF(근거리)”, “수신 RF(원거리)”와 같으며 위상반전이 해당 지연 시간만큼 옮겨갔음을 알 수 있다. 각각의 수신신호들을  $F_0$ 인 CW와 혼합하면 “1st Mixer 출력”과 같이  $F_D$ 만이 남게 된다. 이 신호를 센서 내부에서 지연시킨 송신코드와 다시 혼합하면 “2nd Mixer 출력” 신호가 된다. 실제 사용하는 코드 폭은 도플러 신호의 주기보다 상대적으로 아주 작고, 도플러 주파수  $F_D$  또한 송신  $F_0$  주파수보다 아주 작으므로 이를 고려하여 시뮬레이션하면 Fig. 3과 같은 결과를 얻을 수 있다.

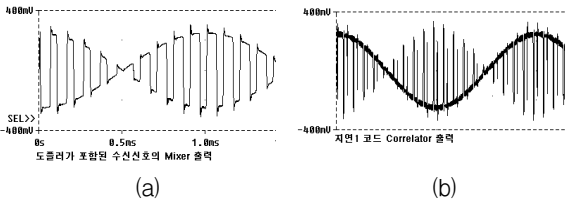


Fig. 3. Simulation results of BPSK method (a) 1st mixer output(including Doppler  $F_D$ ) and (b) 2nd mixer output(including correlation)

다시 Fig. 2의 중거리(수신신호가 지연코드와 동일하게 지연된 경우)에서 살펴보면 지연코드와 “1st Mixer 출력”을 혼합한 결과인 “2nd Mixer 출력”은 불연속이 없는 순수한  $F_D$  성분만을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 근거리(수신신호가 지연코드보다 작게 지연된 경우)와 원거리(수신신호가 지연코드보다 크게 지연된 경우)에서는 “2nd Mixer 출력”이 불연속적인 위상을 가지고 있으므로 주파수 스펙트럼이  $F_D$ 를 중심으로 퍼지게 된다. 이 스펙트럼을 협대역 대역통과여파기(BPF)에 통과시켜  $F_D$  성분만을 추출하면 그 크기가 중거리(수신신호가 지연코드와 동일하게 지연된 경우)보다 작게 출력된다. 수신신호의 지연시간이 내부 지연코드의 지연시간과 차이가 많이 날수록 BPF의 출력은 점점 작아지고 수신신호의 지연시간이 내부 지연코드의 지연시간 보다 한 코드 폭 이상 차이가 나면

PN Code의 특성에 의해 BPF의 출력은 최소값을 계속 유지하게 된다. 따라서 상기한 특성에 의해 Fig. 4와 같이 교차상관(cross correlation) 특성을 갖는 거리 창(range gate)을 형성할 수 있고 내부 지연코드의 지연시간을 적절히 선택함으로써 Fig. 4(b)의 b 그래프의 최대 상관 값을 갖는 거리  $D_0$ 를 바꿀 수 있으며, 임계치를 넘는 표적을 탐지하여 표적의 거리영역을 판단할 수 있다.

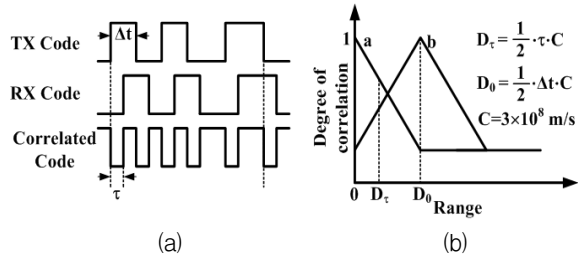


Fig. 4. Cross-correlation : (a) transmitting, receiving and correlated code and (b) degree of correlation of the correlated code.

Fig. 5에 수신안테나 위치 및 방향에 대해 나타내었다. 방향 구분은 서로 인접한 3개 안테나의 수신전력을 비교하여 판단하며, 방향 구분 분해능을  $30^\circ$ 로 하기 위해 6개의 수신안테나가 필요하다. 방향 탐지 시 안테나 스위칭 잡음으로 인해 임계치를 넘는 도플러 신호가 있는 것처럼 동작하는 오탐지 현상이 발생할 수 있으므로, Fig. 1과 같이 동시 송신방식으로 설계하였고 수신부의 스위칭은 한 번만 하도록 알고리즘을 설계하였다.

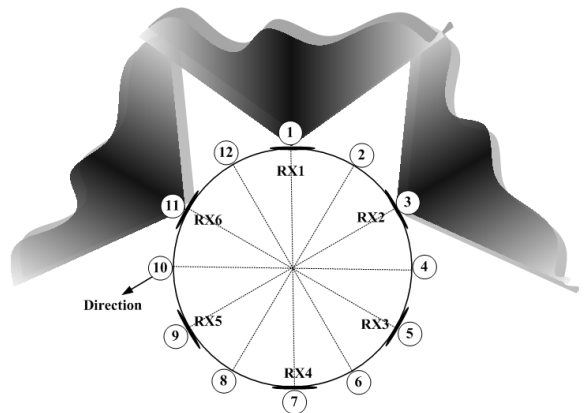


Fig. 5. Receiving antenna position and direction

### 3. 송수신기 설계 파라미터

송수신기 설계 파라미터들을 Table 1에 정리하여 나타내었고 각 파라미터에 대한 설명을 아래에 기술하였다.

Table 1. Design parameters for the BPSK transceiver

설계 파라미터	관련 항목	관련 성능
Range gate 폭/개수	필터대역폭/상관 채널 개수	- 거리분해능
도플러 주파수	도플러 필터 대역폭	- 신호대 잡음비
Code 반복주기	코드열 길이	- Range rejection - Sensitivity
Code rise/fall time	필터대역폭	- 거리분해능 - Range rejection

#### 가. Range gate 폭 및 개수

Fig. 4와 같이 BPSK 변조에 사용하는 코드의 코드 폭이  $\Delta t$ 라면 거리 창 폭은  $\Delta t \cdot C$ 가 된다. 거리 창 범위를 벗어난 신호의 크기는 상관 특성에 의해 억제되므로 거리 창 폭은 표적의 크기를 고려하여 설계한다. 즉, 거리 분해능을 좋게 하기 위해서는 코드 폭을 줄이면 되지만, 전투기와 같이 크기가 크고, 구조가 복잡한 표적의 경우 거리 창 폭이 꼭 작아야 할 필요는 없다.

BPSK 변조를 하면 반송파가 억압되며, 반송파를 중심으로 스펙트럼이 확산된다. 이때, 변조 및 복조 시의 코드 모양을 왜곡시키지 않으려면 송수신기에 사용되는 필터의 대역폭이 충분히 넓어야 한다. BPSK 시스템의 경우 99 % 전력대역폭은 약 20.56/코드 폭으로 알려져 있다.

상기와 같이 표적의 크기를 고려하여 거리 창 폭을 6 m로 하고, 요구되는 코드 폭은 20 ns이므로 송수신기에 사용되는 필터 대역폭 및 안테나 대역폭 또한 약 1 GHz 이상으로 설계하였다. 필터 대역폭에 대한 영향을 시뮬레이션 해보면, 1 GHz 이상일 경우 코드의 모양이 왜곡되지 않으나, 필터 대역폭이 좁을 경우 변, 복조에 사용되는 코드의 상승시간(rise time) 및 하강시간(fall time)이 증가한다.

한편, 신관센서가 작동하는 근거리에서의 표적은 점 표적이 아니기 때문에 표적의 반사신호는 안테나 빔이 조사되고 있는 여러 거리들에 걸쳐서 나타나게 된다. 따라서 표적의 크기가 클 경우 정확한 거리 측정보다는 거리 영역을 판단하는 것이 효과적이다. 그러므로 여러 개의 거리 창을 겹쳐서 사용하고 각 거리 창에서의 출력 레벨을 비교함으로써 표적의 거리 영역을 더 정확히 알아 낼 수 있다. 거리 창의 개수가 늘어날수록 거리분해능도 높일 수는 있으나, 거리 창의 개수는 상관기 개수와 비례하므로 적절히 선택해야 한다.

Fig. 6은 설계 예로써, 코드 폭이 20 ns 즉, 거리 창 폭이 6 m이고, 내부 지연코드가 30 ns, 50 ns 및 70 ns 만큼 지연된 세 개의 상관기를 사용하여 각각 4 m, 7 m 및 10 m에 상관 값이 최대가 되는 지점이 나타나도록 한 경우이다.

내부 지연코드를 코드 폭의 배수에 10 ns의 지연을 더 시킴으로써, 0 ~ 1 m의 상관 값을 최소로 하여 1 m 이내에 존재하는 송, 수신 안테나 간의 커플링의 영향을 배제할 수 있다. 실제 송수신기 내부에는 시스템 delay가 생기게 되며, 이를 적절히 이용하면 상기와 같이 탐지거리 내에 이른바 In-range-hole을 만들 수 있다. 또한 후처리(post processing)를 통해 세 개의 거리 창에 각각의 weighting을 곱한 후 더함으로써 굵은 실 선과 같은 하나의 거리 창을 형성 할 수 있다.

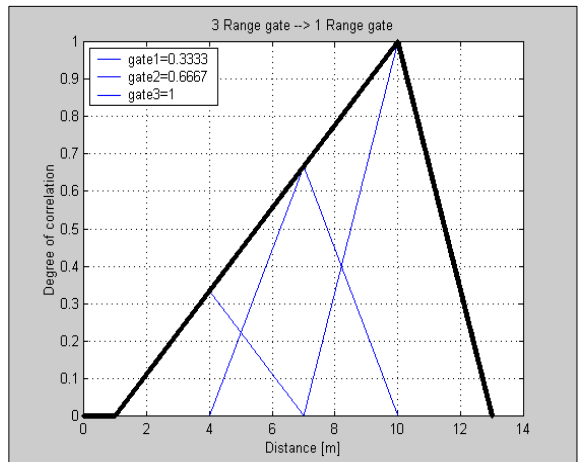


Fig. 6. Range gate transformation

#### 나. 도플러 주파수

수신부의 noise floor를 낮추어 신호대 잡음비를 좋게 하기 위해서는 표적의 도플러 주파수를 예측하여

이에 맞게 필터 대역폭을 설계해야 한다. Fig. 7에 대공표적에 대한 상대속도를 나타내었다<sup>[3]</sup>.

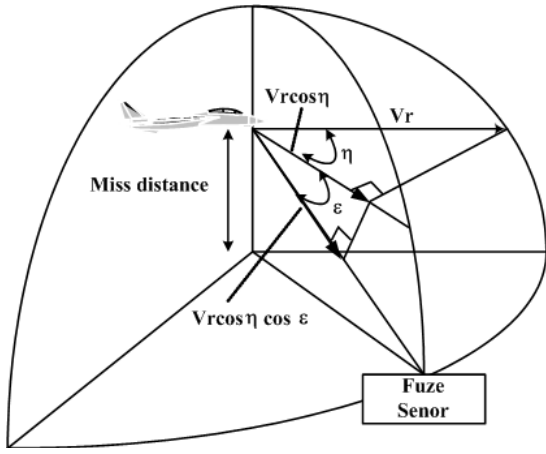


Fig. 7. Radar velocity  $V_r$

Fig. 7로부터 도플러 주파수는 식 (1)로 나타낼 수 있고, 조우각  $\eta, \epsilon$ 에 따라 주파수가 변화된다.

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \cos \eta \cos \epsilon \quad (1)$$

Fig. 8은 미국 NAWC-WD MESA에서 수행한 조우모의 시험 데이터로, 상대속도 1 m/s로 14 inch 표준구에 대해 수집한 결과이다<sup>[4]</sup>.

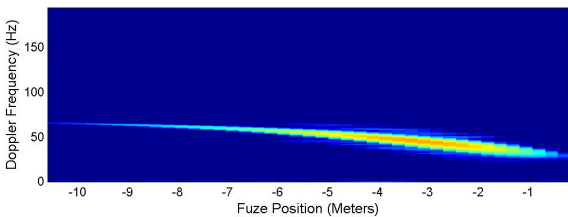


Fig. 8. Doppler frequency(14" standard sphere)

식 (1) 및 Fig. 8과 같이 표적과의 접근 시 접근 속도 변화에 의해 도플러 주파수가 달라짐을 볼 수 있다. 또한 복잡한 형태의 전투기 표적의 경우 다중 반사에 의해 도플러 주파수가 넓게 퍼진다<sup>[4]</sup>. 상대속도 1 m/s인 경우의 도플러 주파수가 약 30 ~ 60 Hz이므로 최대속도를 마하 6으로 하여, 최대 도플러주파수를 약 130 kHz로 설계하였다.

따라서 수신부의 잡음 대역폭을 예측된 도플러 대역인 130 kHz로하고, 잡음지수를 약 4 dB로 설계하여 약 -118 dBm의 noise floor를 얻었다. 이는 송신출력이 20 dBm이고 송수신안테나의 이득이 10 dB인 경우, 0.1 m<sup>2</sup>의 표적에 의한 수신신호 레벨과 비교하여 40 dB 이상의 마진이 있다.

다. Code 반복 주기

Code 반복주기와 도플러 대역과의 관계를 주파수 축과 시간 축으로 나누어 기술한다. Fig. 9에 BPSK 신호 스펙트럼을 나타내었다.

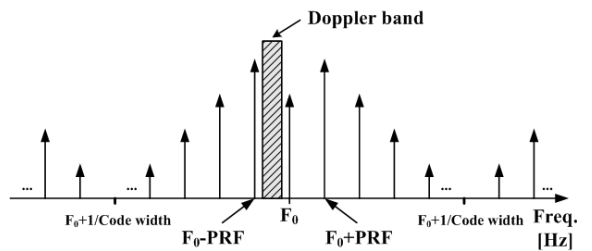


Fig. 9. BPSK signal spectrum

Fig. 9와 같이 송수신기에서 확인해야 할 특성은,  $F_0$  신호가  $-10\log(\text{코드열길이 } N)$  만큼 억압되고, 코드열의 PRF(Pulse Repetition Frequency) 주기로 주파수 성분들이 존재하며, 코드 폭의 역수에 해당하는 주파수에 null이 위치한다는 점이다. 만일 Fig. 9의 PRF가 낮으면 도플러 대역과 중복이 일어나 표적에 대한 정확한 도플러 신호를 추출할 수 없다. 한편, Fig. 10은 시간 축에서의 코드열과 도플러 신호를 나타낸 것이다. 만일 코드열의 길이가 도플러 신호의 반주기보다 길어지면, 도플러 신호의 위상이 바뀌게 되어 신호대 잡음비를 저하시키게 되므로 적절한 도플러 수정(correction)을 해야 한다<sup>[5]</sup>.

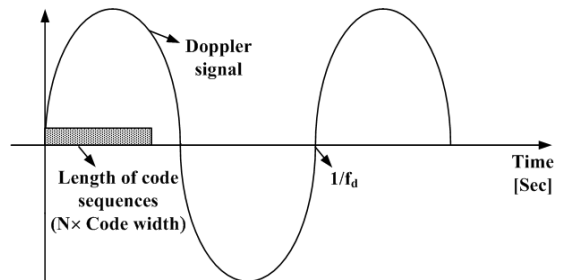


Fig. 10. Doppler vs. code sequence in time domain

라. 코드의 rise time 및 fall time

코드의 rise time과 fall time이 신관센서와 같은 근거리, CW 레이더에서 중요한 이유는 rise time과 fall time의 불균형(inequality)이 레이더에서 오경보를 유발하는 auto-correlation function의 불요 부엽 쌍(pair)과 spiky ripple을 만들기 때문이다<sup>[6]</sup>. 이는 제한된 대역폭 때문에 코드의 천이(transition)에 유한 시간이 소요되기 때문으로, 만일 rise time과 fall time의 천이시간이 동일하다면, 거리 창이 좁은 넓어지고 크기는 감소하게 되며, 천이시간이 동일하지 않으면 Fig. 11과 같이 거리 창에 대한 영향과 더불어 부엽에 2차 침투치가 나타나고 spiky ripple이 더해지게 되어 원치 않는 거리의 range rejection이 나빠지는 결과를 초래한다. 따라서 BSPK 변조기, 복조기 및 코드 발생기의 대역폭이 충분히 넓도록 설계한다.

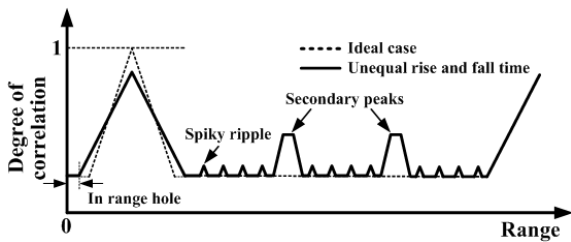


Fig. 11. Range gate of unequal rise and fall time

4. 송수신기 제작/측정 및 표적 시험결과

가. 송수신기 제작 및 측정

Fig. 12에  $145 \times 150 \times 22 \text{ mm}^3$ 의 크기로 제작된 BSPK 송수신기 사진을 나타내었다.

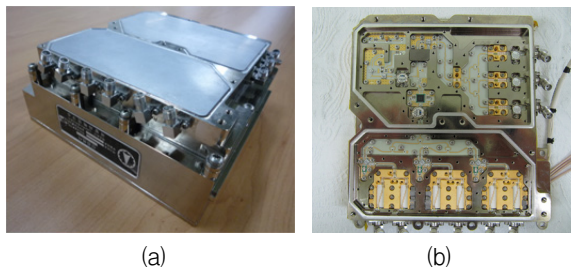
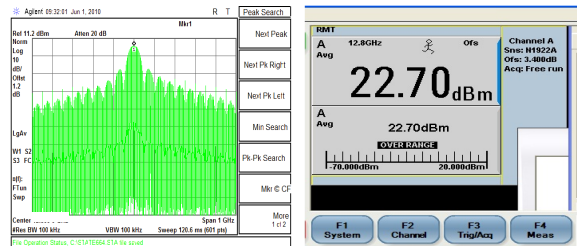


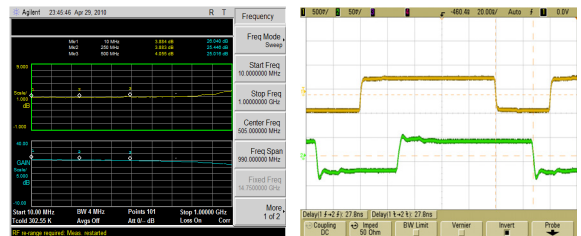
Fig. 12. Photo graph of the BSPK transceiver  
(a) outside and (b) inside

송수신기를 소형화하기 위해 주요 부품은 Die chip을 사용하여 본딩 작업을 하고, 송신부의 하모닉 제거용 저역통과필터 및 수신부의 대역통과필터는 알루미늄 기판을 사용하여 삽입손실을 줄였다<sup>[7]</sup>.

제작된 송수신기에 대한 대표적인 특성 측정결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)로부터 BPSK 변조에 따라 스펙트럼이 정상적으로 확산(50 MHz null)되고 있음을 알 수 있고, power meter로 측정한 송신출력은 22 dBm 이상이며, Fig. 13(b), (c)로부터 수신부의 잡음 지수는 약 4 dB, 이득은 25 dB를 나타내고, 시스템 지연은 측정에 포함된 케이블 지연(19 ns)을 제외하면 약 8.8 ns로 송수신기의 전기적 특성이 요구 규격을 모두 만족함을 알 수 있다.



(a)



(b)

(c)

Fig. 13. Test results (a) transmitter output, (b) receiver gain/noise figure and (c) system delay

전기적 성능 확인 외에 송수신기는 자체적으로 온도 및 진동 시험을 포함하는 ESS 시험을 수행하였고, 온도 및 진동 시험의 시험 조건을 Fig. 14에 나타내었다. 각각의 시험 중 및 시험 후 시험 항목으로 온도에 대한 송신전력 변화와 수신부 이득 변화를 측정하였고, 모두 요구 규격을 만족하는 결과를 나타내었다<sup>[7]</sup>.

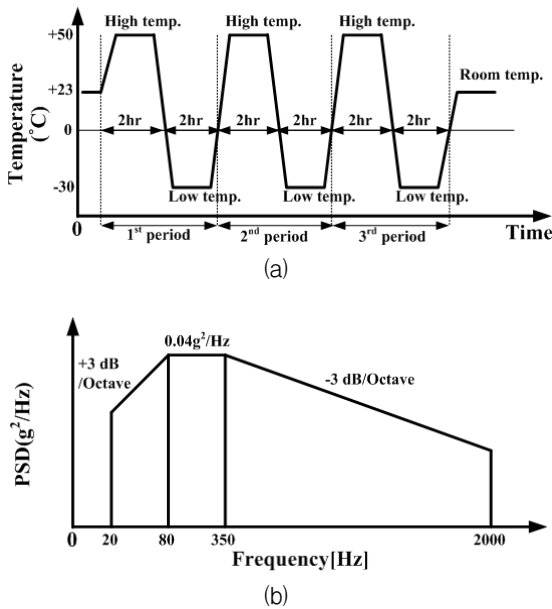


Fig. 14. ESS test conditions (a) Temperature test and (b) vibration test

나. 표적 시험결과

제작된 BPSK 송수신기를 탑재한 방향 탐지용 전파형 근접 신관센서와 조우시험장치<sup>[8]</sup>를 이용해 Fig. 15와 같이 표적(14인치 표준구)의 높이와 방향 등을 바꿔가며 신호를 수집하여 탐지 가능 거리 및 방향 구분 특성을 확인하였다.

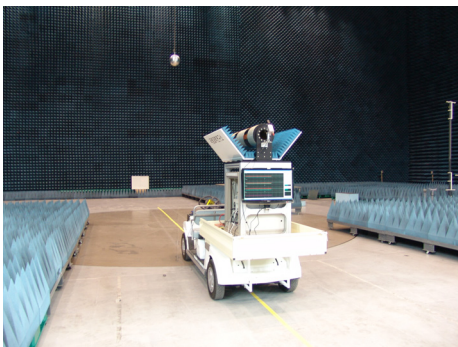


Fig. 15. Encounter simulation test(14" standard sphere)

신관센서와 조우시험장치를 사용하여 수집된 데이터는 MATLAB을 이용하여 분석하였다. 이격거리 2 m, RX1 안테나 방향의 14" 표준구에 대한 수집 신호를 Fig. 16에 나타내었다.

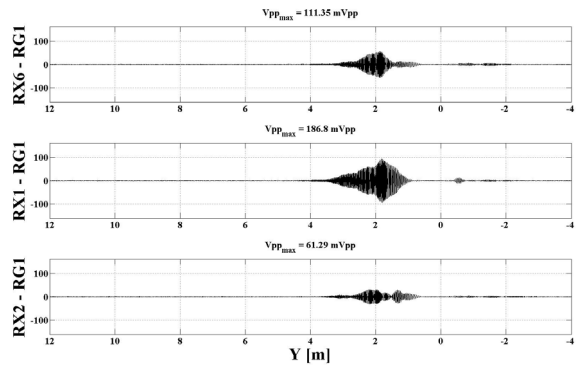


Fig. 16. Collected data for the 14" standard sphere (miss distance 2 m)

Fig. 16과 같이 RX1 안테나 방향의 수신신호가 다른 방향의 수신신호와 비교하여 가장 큰 값을 확인할 수 있다. 이격거리 2 m의 표준구에 대한 표적탐지 결과를 Fig. 17에 나타내었고, 표적 중심으로부터 약 4.2 m 전방에서 표적이 탐지되었고, 약 3.2 m 전방에서 RX1 방향으로 구분됨을 볼 수 있다.

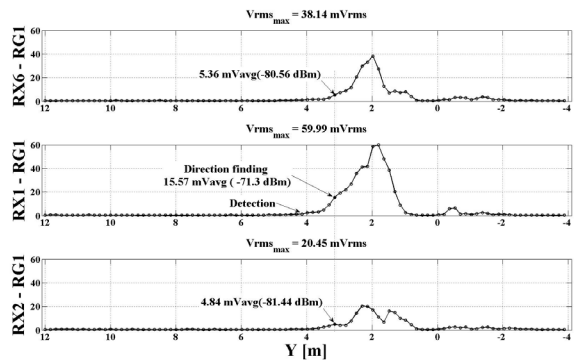


Fig. 17. Collected data for the 14" standard sphere (miss distance 2 m)

신관센서의 목표 성능을 확인하기 위해서는 실제로 이동 중인 항공기를 대상으로 시험해야 하나 이는 현실적으로 매우 힘들기 때문에 신관센서와 조우시의 포탄의 높이 및 각도를 변화시켜가며 155 mm 포탄을 발사하여 155 mm 탄 표적을 탐지하고 방향을 구별하는 동적기능시험으로 그 성능을 확인하였다<sup>[9]</sup>. 동적기능시험은 Fig. 17과 같이 구성하여, 시험 시 수신부 각 채널에서 추출한 도플러 신호로부터 Log Amp 출력 신호를 수집하여 시험 후 결과 분석이 가능토록 하고, 표



적방향에 해당되는 플래시가 점등되도록 하였으며, 고속 비디오카메라를 이용하여 조우시의 탐지위치를 정확히 측정하였다.

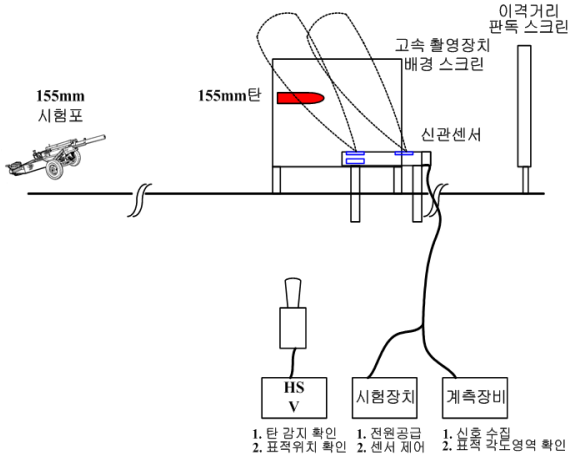


Fig. 18. Map of the dynamic operation test

Fig. 19는 플래시가 점등할 시점의 HSV(High speed Video) 촬영 결과로 -10 dBsm 이하의 155 mm 포탄을 정확히 탐지하였음을 나타낸다.

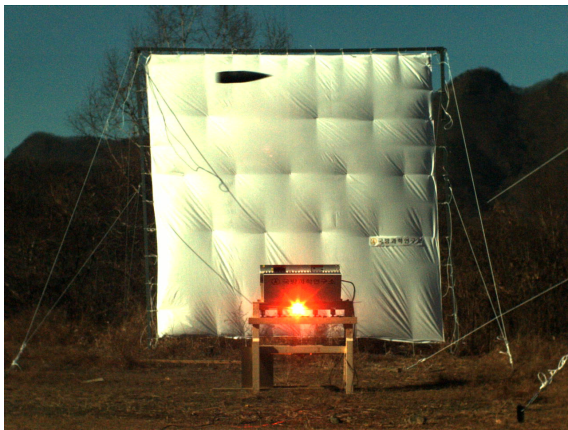


Fig. 19. Dynamic operation test result

## 5. 결론

본 논문에서는 중거리 지대공 유도무기인 천궁에 탑재된 방향 탐지용 전파형 대공 신관센서의 송수신기 설계 방법을 기술하였다. 신관센서의 표적 탐지와 방

향 구분은 코드상관방식의 도플러 신호처리를 통해 이루어지며, 따라서 BPSK 변조 신호를 생성하도록 송신부를 설계하고, 수신안테나를 선택하고 하향주파수 변환을 통해 도플러 신호가 실린 수신 지연코드를 출력하도록 수신부를 설계하였다. 제작된 송수신기는 전기적 시험, ESS 시험 결과 설계 요구 규격을 모두 만족하였고, 조우모의시험 및 동적기능시험을 통해 그 성능이 입증되었다.

## References

- [1] Andrew Burdon, James Mountford and Adrian Garrod, "An Air Target Engagement Simulation for Radar Proximity Fuze Development and Performance Assessment", IEE Colloquium on Radar System Modelling(Ref No. 1998/459), pp. 3/1~3/7, 1998.
- [2] Michael D. Pollman, Peter Katzin, Brian Bedard, Vladimir Aparin, Wes Grammer, Robert Orgusaar, "A MMIC Radar Chip for Use in Air-to-air Missile Fuzing Applications", IEEE 1996 Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium, pp. 185~188.
- [3] George W. Stimson, "Introduction to Airborne Radar", 2<sup>nd</sup> Edition, SciTECH Publishing, INC., 1998.
- [4] 이석우, 최재현, 정종철, "표적위치식별 신관센서 조우모의시험 결과", 국방과학연구소, 연구보고서, TEDC-519-030770, 2003.
- [5] M. I. Skolnik, "Radar Handbook", 2nd Edition, Ch 10.24-10.25, McGraw-Hill, 1990.
- [6] Churchill, F. E., "Effect of Unequal Rise and Fall Times on the Autocorrelation Function of a PN Sequence", Electronics Letters 25<sup>th</sup> October 1990, Vol. 26, No. 22
- [7] 최재현, 정명숙, 이석우, 안지연, "철매-II 신관센서 송수신장치 최종시제 설계/제작", 국방과학연구소, 연구보고서, ADDR-519-110575, 2011.
- [8] 최재현, 이석우, 정명숙, 안지연, "철매-II 신관센서 조우시험장치 설계", 국방과학연구소, 연구보고서, ADDR-519-110841, 2011.
- [9] 최재현, 이석우, 정명숙, 안지연, 안근욱, 김완주, "철매-II 신관센서 동적기능시험 결과", 국방과학연구소, 연구보고서, ADDR-519-110691, 2011.