

방향 탐지용 전파형 대공 근접 신관센서

A Direction Finding Proximity Fuze Sensor for Anti-air Missiles

최재현* 이석우* 안지연* 염경환**
 Jae-Hyun Choi Seok-Woo Lee Ji-Yeon An Kyung-Whan Yeom

ABSTRACT

This paper presents the direction finding proximity fuze sensor using the clutter rejection method and the adaptive target detection algorithm for anti-air missiles. To remove effects by clutter and detect a target accurately, the clutter rejection method of Legendre sequence with BPSK(Bi phase Shift Keying) modulation has been proposed and the Doppler signal which has cross correlation characteristics is obtained from reflected target signals. Considering the change of the Doppler signal, the adaptive target detection algorithm has been developed and the direction finding algorithm has been fulfilled by comparing received powers from adjacent three receiving antennas. The encounter simulation test apparatus was made to collect and analyze reflected signal and test results showed that the -10 dBsm target was detected over 10 meters and the target with mesh clutter was detected and direction was distinguished definitely.

Keywords : BPSK, Cross-Correlation(교차상관), Range Gate(거리 창), Clutter Rejection(클러터 제거), Direction Finding Fuze(방향구분 신관)

1. 서론

미사일의 효과를 최적화하기 위해서, 미사일에 탑재된 근접 신관센서 또는 표적탐지장치에 다가오는 미사일에 대해 표적의 상대적인 공간적 방위를 결정할 수 있는 능력이 있어야만 한다. 탄두와 표적과의 상대적인 물리적 방위(또한 근접 속도)를 아는 것은 무기 효과를 극대화하기 위해 기폭 위치를 조정하는데 이용될

수 있다^[1]. 본 논문은 방향 탐지용 전파형 대공 근접 신관센서에 대해 기술한다. 신관센서는 송수신부와 안테나부 및 신호처리부로 구성되어 있다. 세 개의 송신 안테나와 여섯 개의 수신 안테나는 미사일의 원주방향으로 감싸져 있고, 이 수신 안테나로부터의 수신신호들은 분석되어 표적이 근접거리에 있는 경우, 최종적으로 적응형 표적 탐지와 방향 구분 알고리즘을 통해 표적의 방향 탐지가 이루어진다.

의사무작위 잡음 코드(PN code : Pseudo random Noise code)의 일종인 Legendre sequence^[2]가 BPSK 방식으로 반송파를 변조시키기 위해 사용되며^[3], 송신/수신 코드는 교차상관(cross correlation)이 되어 상대속도에 해당하는 도플러 신호가 획득된다. 교차상관은 두

† 2013년 5월 13일 접수~2013년 8월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(CNU)

책임저자 : 염경환(khyeom@cnu.ac.kr)

코드열 중 한 코드열에 적용된 시간 지연의 함수로써 두 코드열의 유사성 정도를 나타낸다. 그러므로 원하는 거리를 벗어난 원치 않는 신호는 제거될 수 있으므로 이른바 거리 창(RG : Range Gate)을 얻을 수 있다. 만일 표적이 각각의 거리 창에 존재하면, 표적 반사신호로부터의 도플러 신호의 크기는 레이더 방정식으로 유도할 수 있는 수신전력 항을 포함하며 또한 상관 계수 항을 포함한다. 도플러 신호의 크기 및 위상은 표적이 거리 창 내에 있는지 또는 없는지를 결정하기 위해 사용되며 상기 정보들은 표적과 신관센서와의 상대 속도, 표적 모양 및 조우 궤적 등에 따라 변화될 수 있다. 실제 미사일이 날아가는 동안 변화무쌍한 환경에서 표적을 더 정확하게 탐지하기 위해서 상대속도가 변 신호처리, 적응형 임계치 알고리즘 및 2 out of 2 탐지 알고리즘에 기초를 둔 적응형 표적탐지 알고리즘을 개발하였다^[4].

신관센서가 동작하는 근거리 내의 표적 반사신호의 변화를 예측하기는 매우 어려우므로, 신관센서를 움직이고 데이터를 자동으로 수집할 수 있는 조우모의시험장치를 무인전동차량 위에 만들었다. 조우모의시험을 통해 표적 반사신호를 수집하여 분석하였고 이를 통해 표적 탐지 및 방향 구분 특성을 검증하였다^[5].

2. 시스템 설계

가. 표적 탐지 및 방향 구분 개념

신관센서는 BPSK 변조의 코드상관방식으로, 최대 탐지거리 내에 3개의 거리 창을 사용하여 표적과의 상대속도에 따른 도플러 신호를 추출하는 방식으로 표적 탐지를 하게 되며, 방향 구분은 서로 인접한 3개 수신 안테나의 수신전력을 비교한다.

신관센서의 블록도를 Fig. 1에 나타내었다. 송신신호는 연속파 f_0 신호를 PN 코드로 디지털 위상 변조하여 송신 안테나를 통해 송신하고, 표적에 의해 반사된 수신신호는 신관센서와 표적의 거리만큼 PN 코드가 지연되고 또한 표적의 상대속도에 해당하는 도플러 편이 f_d 만큼 주파수가 편이 되어 수신 안테나로 수신된다. 이 수신신호에서 도플러 신호를 검출하기 위해 먼저 연속파 f_0 신호를 혼합기에서 제거하여 IF 신호로 변환하고, 이 신호를 지연된 송신코드와 상관을 취하면 상관코드와 도플러 신호가 혼합된 형태의 신호로 변환되며 이 신호를 도플러 필터를 통과하면 도플러 신호만

추출할 수 있다.

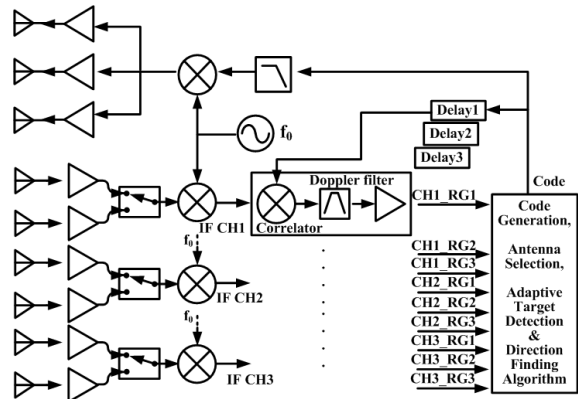


Fig. 1. Block diagram of the direction finding fuze sensor

거리 창 기능은 Fig. 2와 같이 PN 코드의 교차상관 특성을 이용하여 구현하며, 송신코드를 한 코드 폭만큼 지연시켜 수신코드와 상관시키면 Fig. 2(b)의 b 그래프와 같이 삼각형 모양의 거리 창을 얻을 수 있다. 신관센서에서는 지연코드와 상관기(correlator)를 각각 세 개 형성하여 거리 창 별로 신호 측정이 가능하고, 도플러 필터의 출력 신호인 도플러 신호의 크기와 주파수를 적응형 표적탐지 알고리즘으로 분석하여 표적의 유무를 판단하게 된다.

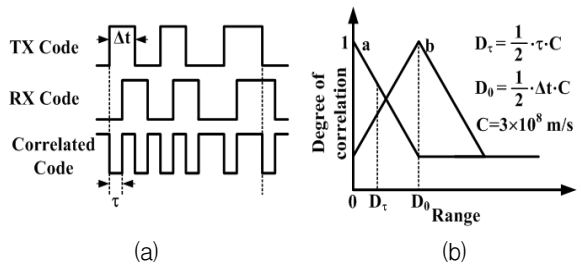


Fig. 2. Cross-correlation : (a) transmitting, receiving and correlated code and (b) degree of correlation of the correlated code

또한 Fig. 1과 같이 3개의 송신 안테나를 동시에 사용하고, 6개의 수신 안테나를 스위칭 하여 이중 3개의 수신 안테나의 수신레벨을 비교함으로써 방향 구분을 수행한다. Fig. 3에 6개의 수신 안테나 위치와 12개의 기폭 방향에 대해 나타내었다.

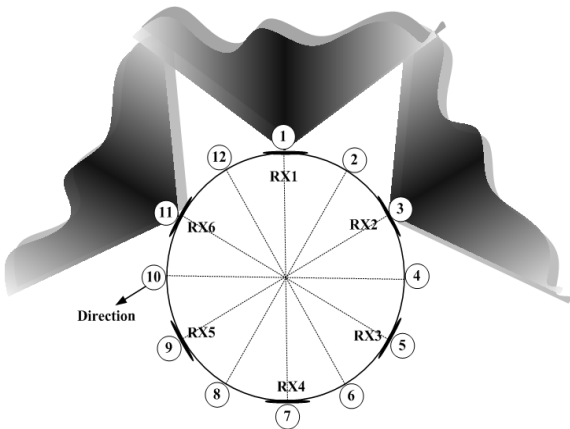


Fig. 3. Receiving antenna position and direction

Fig. 3과 같이 수신 안테나는 60° 간격으로 6개가 배치되어있고, 기폭 포인트는 12개가 있다. 방향 구분을 위해, 우선 세 개의 수신 안테나(RX Ant1, RX Ant3, RX Ant5)로 수신하고, Fig. 1의 9개 신호(CH1_RG1, ..., CH3_RG3)를 비교하여 최대 수신전력을 갖는 세부 안테나와 최대 수신전력을 갖는 거리 창을 찾는다. 이후 한 번의 안테나 스위칭을 한 후 상기 최대 수신전력을 갖는 세부 안테나와 좌, 우 인접안테나로 수신신호를 재 수신하고, 재수신한 수신전력을 비교하여 표적의 방향을 결정한다.

위와 같은 표적탐지 알고리즘과 방향구분 알고리즘을 이용하여 고속으로 이동 중인 대공표적에 대해 거리범위를 알아내고, 30° 분해능으로 방향을 구분할 수 있다.

나. 클러터 제거 기법

연속파 시스템이 좋은 out-of-range rejection을 갖기 위해서는 반송파가 억압되어야 하는데 신관센서는 PN 코드로 변조되어 반송파가 억압되었기 때문에 좋은 out-of-range rejection을 얻을 수 있다.

Out-of-range rejection 값은 코드 폭 및 코드열의 길이 등에 관련이 있다. 우선 코드 폭은 거리 측정 범위에 의해 결정하는데, 거리 분해능과 관련이 있다⁶⁾. 만일 코드 폭이 Fig. 2와 같이 Δt 라면 거리 창은 $\Delta t \cdot C$ 가 되므로 거리 분해능을 좋게 하기 위해서는 코드 폭을 줄이면 된다. 그러나 코드 폭이 좁아질수록 더 넓은 대역폭이 필요하게 되고, 제한된 대역폭 때문에 코드의 천이(transition)에 유한 시간이 소요되어 코드에 상승 시간(rise time)과 하강 시간(fall time)이 발

생한다. 이로 인한 상승 시간과 하강 시간의 불균형이 레이더에서 오 경보(false alarm)를 유발하는 자기상관 함수(auto correlation function)에 불요 부엽(side lobe) 쌍과 spiky ripple을 만들기 때문에⁷⁾, 코드 폭을 줄여 거리 분해능을 향상시키는 데에는 제약이 따른다. 따라서 신관센서에서는 대역폭을 고려하여 20 ns의 코드 폭을 선정하였고 이에 따른 거리 창은 6 m가 되며, 3개의 거리 창을 겹치게 사용하여 12 m까지 측정이 가능하도록 하였다.

코드열의 길이에 관련된 내용은 다음과 같다. 동일한 코드열 간의 상관관은 자기상관이라고 하며, 두 코드열이 다른 경우는 교차상관이라고 한다. 특히 길이가 N인 주기적 코드열 a_n 에 대해 정규화된 자기상관 함수 $R(m)$ 은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$R(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k a_{k+m} = \begin{cases} 1, & m = 0, N, 2N, \dots \\ -\frac{1}{N}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)로부터 N-bit PN 코드열의 자기상관을 Fig. 4(a)에, 1 bit 지연시킨 코드열과 기준코드와의 교차상관을 Fig. 4(b)에 나타내었으며, Fig. 4의 상관 특성으로부터 침투 신호의 크기는 1, 부엽신호의 크기는 $-1/N$ 으로 일정하므로 out-of-range rejection은 $-20\log(1/N)$ 으로 나타낼 수 있고, 상관 값이 1이 되는 반복거리가 있음을 알 수 있다.

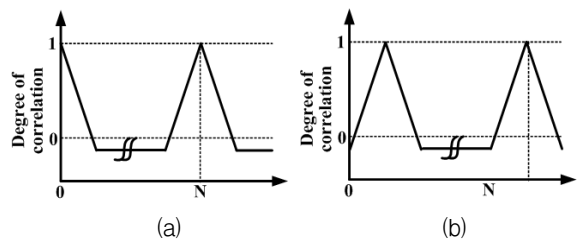


Fig. 4. Correlation Characteristics of the N-bit PN code : (a) auto correlation (b) cross correlation

Out-of-range rejection이 작거나 반복거리가 충분하지 않은 경우, 먼 거리에 있는 해면 클러터 등을 표적으로 오인하여 표적을 오 탐지할 가능성이 있다. Out-of-range rejection과 반복거리를 증대시키기 위해 코드열의 길이 N을 늘리게 되면, 코드 반복주기가 가지는 PRF(Pulse Repetition Frequency)가 낮아진다. 표적 신

호 수신 시, 잡음에 대한 오 탐지 방지를 위해 표적과의 상대속도에 의한 도플러 주파수 f_d 를 측정하는데, 낮아진 PRF는 f_d 검출을 어렵게 만든다. PRF가 낮아지면, 도플러 대역 내에 PRF 및 PRF의 하모닉 성분이 포함되거나 PRF와 f_d 와의 혼변조 왜곡(IMD : Intermodulation Distortion)이 발생하기가 쉬우므로 f_d 외의 불요 신호에 대한 충분한 range rejection이 이루어질 수 없다. 이와 같은 이유로 PN 코드의 적절한 길이 선정은 표적 탐지에 있어 매우 중요하나, 그에 비해 일반적으로 사용되는 M 시퀀스는 주기 $N = 2^m - 1$ 로 제한적 길이만을 가진다.

Legendre sequence는 PN 코드이면서 M 시퀀스에 비해 길이(주기) 선택이 유연하며, 길이 $N(N$ 은 소수)의 원시근 a 에 대해 극성이 있는 Legendre sequence는 식 (2)와 같이 정의된다^[2].

$$\hat{a}_n = \begin{cases} 1 \text{ or } -1, n = 0 \\ (-1)^t, n \equiv a^t \pmod{N} \end{cases} \quad (2)$$

즉, n 이 a 의 완전제곱($1, a^2, a^4, \dots$, modulo N)이면 $\hat{a}_n = 1$ 이고 나머지의 경우는 $\hat{a}_n = -1$ 로 정의되며, $n = 0$ 을 제외하면 $\hat{a}_n = 1$ 인 원소의 수와 $\hat{a}_n = -1$ 인 원소의 수는 같다. Legendre sequence가 최적의 자기상관 특성을 가지기 위한 필요충분조건은 식 (3)과 같이 $N \equiv 3 \pmod{4}$, 즉, 길이 $N = 4k - 1$ 이어야 한다.

$$R(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{a}_n \hat{a}_{n+\tau} = \begin{cases} N, \tau \equiv 0 \pmod{N} \\ -1, \text{otherwise} \end{cases}, N = 4k - 1 \quad (3)$$

도플러 대역은 예상되는 표적 종류 및 조우 시의 상대속도를 고려하여 설계되는데, 설계된 도플러 대역이 2 ~ 130 kHz라고 가정했을 때, Table 1에 나타낸 것과 같이 211-bit의 PRF(237 kHz) 및 PRF의 하모닉 성분들, PRF와 f_d 간의 2차 IMD 모두가 도플러 대역 내에 포함되지 않음을 확인 할 수 있다.

20 ns의 코드 폭을 갖는 211-bit Legendre sequence로 약 40 dB의 out-of-range rejection 값을 얻었고, 코드열의 반복거리는 약 633 m로 클러터의 수신전력이 표적 탐지 레벨 보다 낮아지게 하여 반복거리에서의 오 탐지가 나타나지 않도록 하였다. 20 ns, 211-bit Legendre sequence의 코드상관에 의한 거리 창 특성은 Fig. 5와 같다.

Table 1. 2nd IMD between the PRF of the 211-Bit Legendre Sequence and f_d according to Relative Speed

211-bit		PRF = 237.0 kHz						Clutter MAX
Mach		0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
f_d [kHz]		7.5	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	105.6
Mixer 출력 [kHz]	원신호	7.5	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	105.6
	2차 IMD	229.5	222.0	207.0	192.0	177.0	162.0	131.3

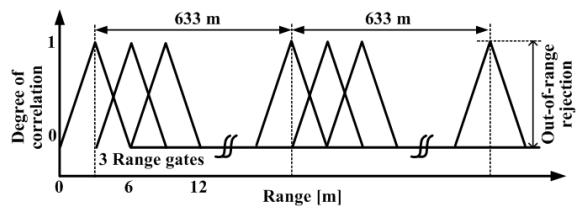


Fig. 5. Range gates of the 20 ns code width, 211-bit Legendre sequence

다. 적응형 표적 탐지 알고리즘

1) 상대속도 가변 신호처리

도플러 신호는 표적과의 상대속도에 따라 달라지며, X-대역에서 표적과의 상대속도가 Mach 0.1 ~ 6인 경우 2 kHz ~ 68 kHz로 변화가 심하게 나타난다. 표적의 길이를 2 m라고 가정할 경우 표적탐지에 허용된 시간이 Mach 0.1인 경우 58.8 ms 정도이나 Mach 6인 경우 0.98 ms에 불과하다. 한편 주파수를 판별을 위한 FFT 수행 시 2주기 이상이 필요한데 표적 형태에 따라 단일 주파수 신호가 아닌 경우 약 10주기 정도가 필요하다고 가정하면, Mach 0.1인 경우는 약 5 ms, Mach 6인 경우 약 147 us 동안의 도플러 신호가 분석되어야 한다.

따라서 동일한 시간으로 수신신호를 분석 시 Mach 6에 맞추어 신호를 처리하면 상대속도가 느린 경우 도플러 신호가 1주기가 되지 않아 신호처리가 힘들며, Mach 0.1에 기준할 경우 상대속도가 빠른 경우에는 표적이 지나간 후 판단하는 상황이 발생한다. 따라서 진행거리를 기준으로 상대속도에 따라 시간을 가변하는 탐지 알고리즘을 적용하였다. 최소표적의 길이를 2 m라고 가정하고 이 표적을 적어도 4번 탐지 확인토록 0.5 m 지나가는 시간 동안 판단하도록 하였다. 즉, 상

대속도가 느린 경우 판단시간을 길게 하며, 상대속도가 빠른 경우 처리시간을 빠르게 하여 0.5 m 지나가는 시간을 기준으로 알고리즘을 처리하였다.

2) 적응형 임계치 표적 탐지 알고리즘

표적탐지에 적용되는 수신신호의 임계치(threshold) 레벨은 단순잡음 수준을 예측 계산하여 수식으로 정할 수 있으나 비행환경에서의 여러 예측하기 힘든 상황에서 임계치를 상수화하여 고정 임계치 방식을 적용하면 오탐지할 확률이 높아 질 수 있다. 따라서 잡음이나 클러터 환경 등에 따라 임계치를 가변하여 오경보율(false alarm rate)을 유지하는 적응 임계치 방식을 적용하여 표적을 탐지토록 하였다. 우선 표적이 확실하게 존재하지 않는다고 판단되는 구간에서 각 수신 채널에 대해 잡음의 크기를 측정한다. 가변 임계치 V_{th} 는 표적 모델과 클러터는 서로 독립적인 랜덤 변수로 이들의 PDF(Probability Density Function)를 가우시안 분포라 가정 하고, 열잡음이나 회로의 검출기 잡음은 클러터에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하여 계산하였다.

신관 성능은 많은 기준에 의해 파라미터화 되며, 몇몇 기준들은 탐색기 성능을 평가하는데 사용되는 기준들(탐지 확률(P_d) 및 오경보율(P_{fa}))과 동일하다. 그러나 탐색기의 경우와 다르게, 기존의 Swerling model을 이용하여 신호 대 잡음비(S/N)로부터 P_d 를 구할 수 없고, P_{fa} 또한 신관의 경우에는 조기 오기폭율(premature false trigger rate)로 알려져 있다^[8]. 즉, 주로 레이더 등에 적용하는 CFAR(Constant False Alarm Rate) 수신기의 경우 시험 셀 양쪽 주변에 포함된 잡음이나 클러터의 평균치를 이용하여 주어진 오경보율에 해당하는 가중치를 곱하여 사용하나 신관에서는 표적탐지 시 표적 양쪽의 데이터를 이용할 경우 표적을 지나친 후 판단하게 된다. 따라서 신관에 특성화하여 과거의 데이터만을 사용하는 변형된 CA(Cell Average)-CFAR 형태의 수신기를 식 (4)와 같이 구성하였다.

$$V_{th} = m + k\sigma$$

$$m = \frac{\text{sampling}[n - j - 1] + \text{sampling}[n - j - 2] + \dots + \text{sampling}[n - j - k]}{k} \quad (4)$$

여기서, m은 노이즈의 평균값, σ 는 노이즈의 표준편차, k는 false alarm rate를 일정하게 유지시켜 주는 상

수이다(예 : $P_{fa} = 10^{-4}$ 인 k는 3.72). 평균값 m 계산에 사용된 n은 현재의 sampling 개수, j는 guard sampling data의 개수, k는 임계치 계산에 반영되는 sampling data의 개수를 나타낸다. 이를 Fig. 6에 나타내었다.

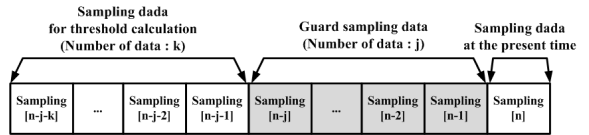


Fig. 6. Guard data set up for calculating variable threshold

Guard sampling data는 가변 임계치 계산을 위한 sampling에 반영되지 않는 data 구간이다. 이는 수신신호가 일정 레벨 이상 커질 때까지의 sampling data를 무시하여 표적을 탐지 못하게 되는 현상을 방지하는 역할을 한다. 수신신호가 임계치 이하에서 탐지 불가능한 매우 작은 레벨로 천천히 증가할 때 노이즈로 오인되어 가변 임계치 계산식의 m 및 σ 가 증가하게 되면, 수신신호가 표적이라 판단할 정도의 값을 가짐에도 불구하고 증가한 가변 임계치로 인해 표적을 탐지하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 가변 임계치 계산은 guard sampling data 구간 이전의 sampling data 구간을 이용한다. 이와 같이 계산된 가변 임계치와 현재의 sampling data의 비교를 통해 표적 탐지를 진행하며, 표적 미 탐지 시 모든 data가 shift되어 새로운 가변 임계치 및 sampling data로 업데이트 되어 비교 과정을 표적 탐지 시까지 반복하게 된다. k와 j 값은 표적의 크기를 고려하여 정하는 상수이다. 표적 탐지를 위한 sampling에 사용되는 수신 신호는 세 개 방향 수신 안테나(RX1, RX3, RX5)에 대해 세 개의 거리 창별로 총 9개이며, 각각의 수신 신호들을 sampling하여 비교하는 과정에서 개별적인 가변 임계치를 적용한다. 따라서 동일한 하나의 임계치를 적용할 때에 비해 순간적인 노이즈가 비교/판단에 영향을 주는 현상을 배제할 수 있다.

3) 2 out of 2 탐지 알고리즘

만일 single detection 방식으로 한 번의 신호만으로 표적의 유무를 판단하는 경우, 정전기(ESD : Electrostatic Discharge) 등의 우연한(inadvertent) 잡음이 신관센서에 영향을 미치는 경우 이를 표적 신호로 판단하여 잘못된 기폭 신호를 출력시킬 수 있다. 따라서 신호처리

0.5 m 단위마다 표적을 판단하지만 예기치 않은 잡음으로부터 둔감하기 위하여, 2 구간 동안 탐지 레벨을 넘는 도플러 신호가 같은 방향 및 같은 거리 창에서 두 번 연속으로 검출되어야만 표적을 탐지 완료하도록 설계 하였다. 2 out of 2 알고리즘은 레이더 등에서 오 탐지율을 낮추는데 많이 적용된다. 본 시스템에서는 1 out of 1 알고리즘보다 0.5 m 뒤에 표적이 탐지되나 표적의 크기를 고려하면 영향이 없다고 볼 수 있다.

3. 제작 및 측정

클러터 제거 기법과 적응형 표적 탐지 알고리즘이 탑재된 방향 탐지용 신관센서를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 표적탐지장치를 나타내고, Fig. 7(b)는 안테나가 시험용 동체에 장착된 모습이다.

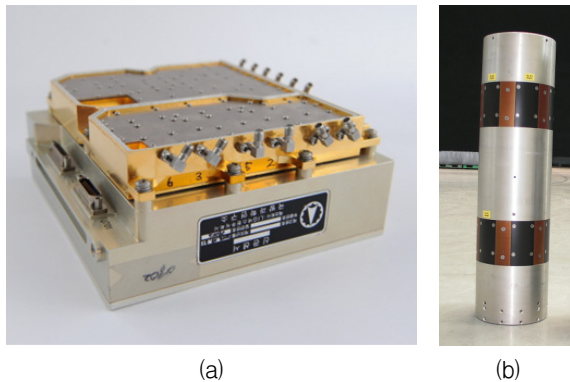


Fig. 7. Direction finding fuze sensor : (a) target detecting device and (b) antennas

기폭 거리에서, 표적은 산란체들의 집합이라는 점에서 통계적인 방법으로 작용하지 않는다. 근접 거리 및 일반적으로 신관의 좁은 빔폭 때문에, 표적의 일부분만 조사된다. 신관은 오직 하나 내지 또는 산란체의 작은 무리들을 보고 이러한 산란체들의 근역장(near field)에 위치하기 때문에, 신관은 감시 또는 추적 레이더와 같이 보통의 시나리오와는 아주 다른 상황으로, 표적의 레이더 특성을 나타내기 위해서는 신관 특유의 방법이 필요하다⁵⁾. 즉, 표적과의 조우 시 안테나의 방사패턴, 표적과의 조우 상황 및 표적의 종류 등에 따라 표적 반사신호가 달라지고 표적 반사신호 변화의 예측이 매우 어려우므로 조우모의시험을 통해 근거리

에서의 표적 반사신호를 수집하고 분석하였다. 조우모의시험 시의 상대속도가 약 1 m/s ~ 2 m/s로 이때 발생하는 도플러 대역이 매우 낮기 때문에 신호처리부의 도플러 필터 대역을 50 Hz ~ 1 kHz로 수정하여 사용하였다.

조우시험장치는 표적과의 거리 정보 및 센서 신호를 수집하는데 목적이 있으며, 제작된 조우시험장치는 Fig. 8에 나타내었고, 수집된 데이터는 Fig. 9의 뷰어 프로그램을 만들어 나타내었다. 신관센서가 무인전동 차량에 탑재된 상태에서 운행 중에 신관센서의 운용 및 신호 획득이 가능하도록 하였으며, 시험조건 및 환경을 기록하기 위해 영상카메라와 레이저 거리 측정기를 별도로 장착하여 표적과의 거리 및 조우 상황을 기록하였다.

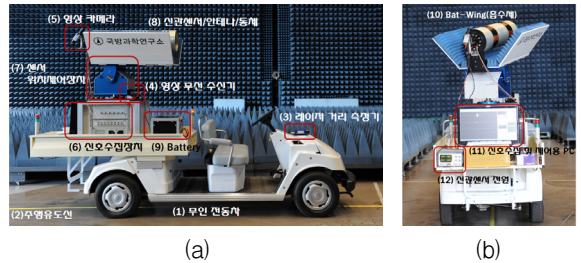


Fig. 8. Encounter simulation test apparatus : (a) side-view and (b) rear-view



Fig. 9. Viewer program

조우모의시험 표적으로는 Fig. 10(a)의 레이더 단면적(RCS : Radar Cross Section)이 -10 dBsm인 14 inch 표준구와 Fig. 10(b)의 F-4D Phantom 실물 비행기를 사용하였다. 표적의 높이와 방향 등을 바꿔가며 신호를

수집하여 탐지 가능 거리, 거리 창 특성 및 방향 구분 특성을 확인하였다.

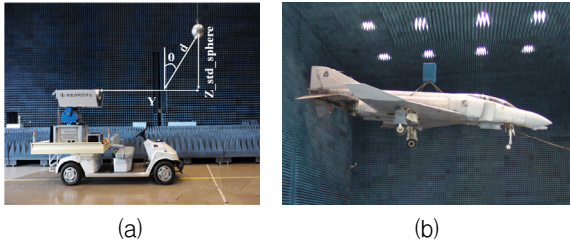


Fig. 10. Encounter simulation test : (a) the 14" standard sphere and (b) F-4D Phantom

근접거리에서의 표적과 클러터를 구분하기 위한 시험을 위해 Fig. 11과 같이 클러터 모사용 철망을 RG3 (Range Gate 3)인 약 9 m에 설치하고 직경이 14 inch인 표준구를 RG1인 약 2 m에 설치하였다.

입사각 θ 가 $0^\circ \sim 70^\circ$ 인 영역에서 TE파와 TM파 모두에 대해서 사각 격자가 약 0.9 이상의 반사계수를 가지려면, 정사각형 그물일 경우에 선간 간격 $a \leq 0.7\lambda$ 이고, 그물 와이어의 등가 반지름 $c \approx 0.014\lambda$ 이면 된다^[9]. 시험에 적용한 철망은 $a = 0.064\lambda$, $c \approx 0.011\lambda$ 로 반사 계수 값이 거의 1에 가깝다.

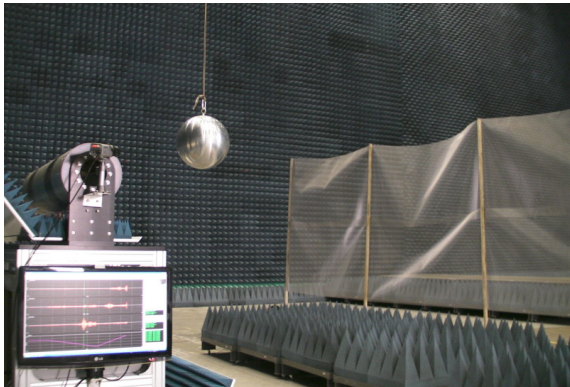


Fig. 11. Encounter simulation test for the 14" standard sphere with the mesh clutter.

4. 결 과

가. F-4D Phantom 표적 탐지 및 방향 구분
신관센서와 조우시험장치를 사용하여 수집된 데이터

는 MATLAB을 이용하여 분석하였다. 거리에 따른 수집신호를 신관센서의 budget을 고려하여 센서 입력 전력으로 환산하고 이로부터 표적 탐지 여부를 판별함으로써 탐지 가능 거리를 확인하였다. F-4D Phantom에 대해서 수행한 분석내용의 한 예로써, 이격 거리가 약 3 m인 경우의 수집된 신호를 Fig. 12에 나타내었다.

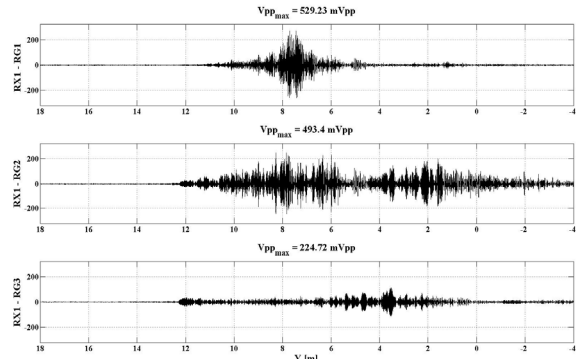


Fig. 12. Collected data for the F-4D Phantom

Fig. 13의 탐지 판단 결과로부터 이격 거리 약 3 m에 F-4D Phantom이 있을 때, 표적탐지 및 방향 구분은 표적 중심 약 10 m 전방에서 RX1 안테나 방향으로 이루어졌다.

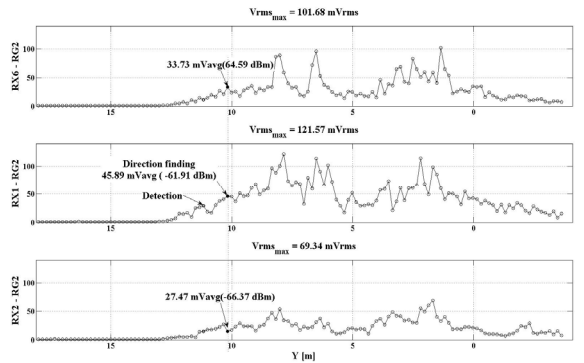


Fig. 13. Target detection result

나. 거리 창 특성

Fig. 10에서 표준구의 높이 Z_std_sphere 를 0.4 m ~ 9.0 m로 가변해 가며 신호를 수집하였다. 거리 창 특성을 확인하기 위해 각 측정결과에 대해 최대 신호크기를 이격거리에 대해서 추출하여 Fig. 14(a)에 나타내었고, 거리에 의한 감쇠($\propto R^4$)요소를 제거하여 Fig.

14(b)에 나타내었다.

Fig. 14(b)의 결과로부터 삼각형 모양의 거리 창이 형성됨을 알 수 있고, 각 거리 창에서 최대 상관이 되는 거리는 각각 약 3 m, 6 m, 9 m임을 알 수 있다. 또한 dB 단위로 환산된 out-of-range rejection 값은 약 40 dB 이다. 20 ns의 코드폭을 갖는 211 bit의 Legendre sequence의 이론적인 out-of-range rejection 값은 약 46.5 dB이나, 코드의 동일하지 않은 상승 시간과 하강시간이 6 dB 정도 rejection 값을 저하시켰으며 각 거리 창의 폭이 넓어졌다.

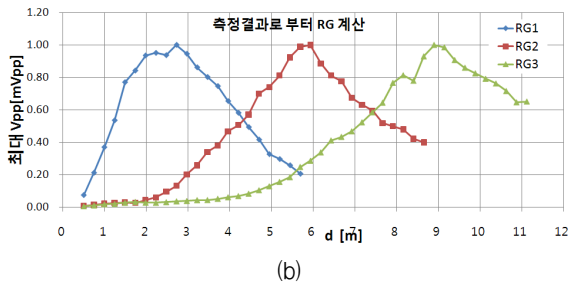
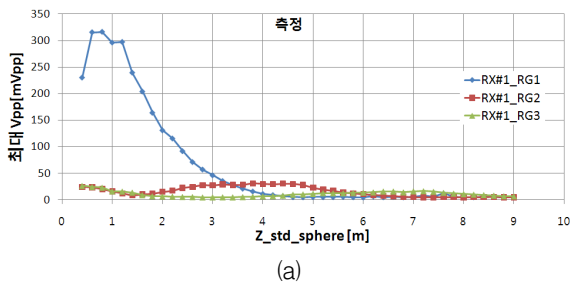


Fig. 14. Characteristics of range gates : (a) measured data and (b) calculated results

다. 철망 클러터와 표적 구분

Fig. 11의 근접 거리에서의 표적과 클러터를 구분하기 위한 시험 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 14는 표준구 표적이 없을 때의 RG3에 위치한 철망 클러터에 대한 시험 결과로써, RG1과 RG2에서는 신호가 나타나지 않고 약 215 mVpp의 철망 클러터에 대한 신호가 RG3에서만 나타남을 알 수 있다.

Fig. 16은 이격거리 약 2 m, 즉 RG1 내의 표준구 표적과 RG3에 철망 클러터가 같이 있을 때의 시험 결과이다. RG1의 표준구 표적 신호가 약 430 mVpp의 빠른 침투치를 나타내며, 클러터 신호는 넓은 면적의 다양한 거리에서 반사되어 오기 때문에 상대적으로 더

넓게 나타난다. 즉, 각각의 거리 창에 위치한 표적이 명확히 구분됨을 알 수 있다.

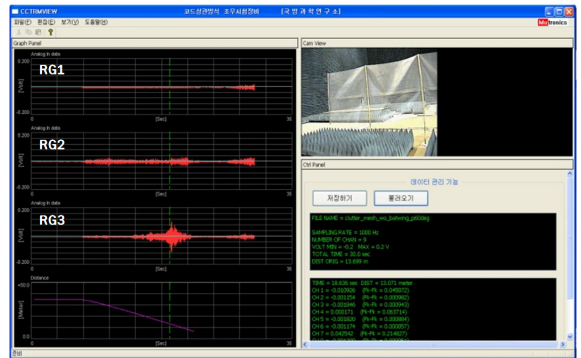


Fig. 15. Measured data for the mesh clutter(without the 14" standard sphere)

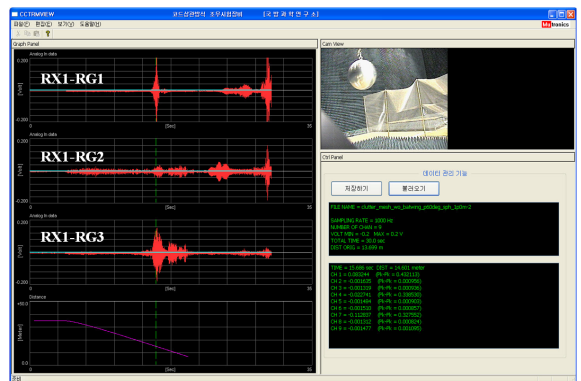


Fig. 16. Measured data for the 14" standard sphere(with the mesh clutter)

5. 결론

방향 탐지용 전파형 대공 신관센서를 성공적으로 개발하였다. 신관센서는 BPSK 변조의 코드상관방식으로, 최대 탐지거리 내에 3개의 거리 창을 사용하여 표적과의 상대속도에 따른 도플러 신호를 추출한다. Legendre sequence를 사용하여 out-of-range rejection을 최대화하고, 빠른 조우시간 내에서 오 경보율을 낮추며 정확히 표적을 탐지하기 위해 상대속도 가변 신호처리, 적응 임계치 표적탐지 및 2 out of 2 탐지 알고리즘을 적용하였다. 위와 같은 표적탐지 알고리즘과 수신전력 비교의 방향구분 알고리즘을 이용하여 고속으로 이동 중

인 대공표적에 대해 거리범위 및 30° 분해능으로 방향을 구분할 수 있다.

References

- [1] 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.
- [2] Sarwate, Dilip, V., and Pursle, Michael, B., "Cross-Correlation Properties of Pseudorandom and Related Sequences", Proceedings of the IEEE, Vol. 68, No. 5.
- [3] 안지연, 이석우, 정명숙, 최재현, 김완주, "Legendre Sequence를 이용한 코드상관 알고리즘 설계", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011
- [4] 이석우, 안지연, 정명숙, 최재현, 김완주, "전파형 신관센서용 적응형 표적탐지 알고리즘 연구", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.
- [5] 정명숙, 이석우, 최재현, 안지연, 안근욱, 김완주, "전파형 대공신관 조우모의시험", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.
- [6] S. E. Craig, W. Fishbein and O. E. Rittenbach, "Continuous-Radar with High Range Resolution and Unambiguous Velocity Determination", IRE Transactions on Military Electronics, Vol. MIL-6, No. 2, 1962.
- [7] Churchill, F. E. "Effect of Unequal Rise and Fall Times on the Autocorrelation Function of a PN Sequence", Electronics Letters 25th October 1990, Vol. 26, No. 22
- [8] 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.
- [9] C. G. Christodoulou, J. F. Kauffman, "On the Electromagnetic Scattering from Infinite Rectangular Grids with Finite Conductivity", IEEE Trans. On AP, Vol. 10-34, No. 2, Feb, 1986.