

잡음 신호를 이용한 바이스태틱 벽 투과 영상 레이더 연구

A Study of Bi-Static Through-Wall Imaging Radar Using a Noise Waveform

하종수 · 조병래 · 선선구 · 이종민 · 조규공

Jong-Soo Ha · Byung-Lae Cho · Sun-Gu Sun · Jong-Min Lee · Kyu-Gong Cho

요약

본 논문에서는 벽 뒤의 표적을 탐지하기 위한 영상화 기법을 연구한다. 벽에 의한 강한 반사 신호와 벽 뒤의 난반사 신호로부터 정확한 표적 정보를 획득하기 위해 잡음 신호를 이용하는 바이스태틱 벽 투과 영상 레이더의 연구 가능성을 제안하고, 획득 신호를 영상화하는 기법을 설명한다. 제안하는 연구의 도출 과정을 제시하며 실험 결과를 분석함으로써 제안하는 연구의 가능성을 검증한다.

Abstract

This paper describes an imaging approach to detect targets behind a wall. To acquire the accurate information over the strong signals reflected by the wall and affected by multipath, a bi-static through-wall imaging radar using a noise waveform is proposed in this paper including the methodology of imaging the received signal. The complete derivation of the proposed approach is presented. And the result of tests is demonstrated to show the possibility of the proposed approach.

Key words : Through-Wall Imaging Radar, Imaging Method, Noise Waveform

I. 서론

대테러전 등의 수행을 위해 미국과 이스라엘 등에서는 광대역 휴대용 투과형 탐지 센서를 개발하여 상용화 단계에 있으며^[1], 일본의 경우에도 벽 투과 탐지 센서를 개발하고 있는 중이나, 국내의 경우 벽 투과 탐지 센서에 관한 연구는 미미한 수준이다.

건물 내부를 탐지하기 위해서는 수동형 센서가 아닌 벽을 투과할 수 있는 능동형 센서를 사용해야 한다. 따라서 가시광선이나 적외선 광 센서는 사용하기 어려우며, RF(Radio Frequency) 신호를 사용하는 레이더가 센서로서 사용될 수 있다.

그러나 RF 신호의 경우, 벽을 투과하기 위한 특성과 벽에 의한 강한 반사 신호 및 난반사 신호를 억제하기 위한 특성을 갖도록 파형이 설계되어야 하며, 원하는 해상도를 만족할 수 있도록 주파수 대역폭이 설계되어야 한다. 이와 관련하여 다중 경로 영향에 강인한 잡음 신호가 벽 투과 레이더의 신호로서 연구되어 왔으나^{[2]~[5]}, 국내에서는 연구 사례를 찾아보기 어렵다.

특히 벽 뒤의 움직이는 물체 탐지^[5] 아닌 고정 물체를 탐지하기 위해서는 이에 대한 영상화 기술이 필요한데, 배열 안테나 구조를 이용한 영상화 기술이 해결 방안으로 고려될 수 있다. 다만 근거리 물체

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received February 20, 2013 ; Revised May 23, 2013 ; Accepted May 30, 2013. (ID No. 20130220-027)

· Corresponding Author : Sun-Gu Sun (e-mail : sgsun@add.re.kr)

를 탐지해야 하고, 차후 시스템 휴대성을 고려해야 하므로 가능한 소형의 배열 안테나를 구성해야 한다.

본 논문에서는 배열 안테나의 바이스태틱 구조에 기반하여, 잡음 신호를 벽 투과 용도로 적용한 벽 투과 영상 레이더(TWIR: Though-Wall Imaging Radar)를 연구한다. 기존 합성개구면 레이더(SAR: Synthetic Aperture Radar) 원리에 기반한 Range Doppler 알고리즘(RDA)^[6] 벽 투과 영상 레이더의 거리 방향으로 압축된 수신 신호에 적용함으로써 제안하는 연구가 벽을 투과하여 표적을 영상화할 수 있음을 제시한다.

본 논문의 II장에서는 노이즈 영상 레이더의 개념을 연구하고, 잡음 신호를 이용한 표적 거리 정보 획득 과정을 설명한다. III장에서는 II장에서 획득한 거리 압축 수신 신호에 대해 RDA를 이용하여 영상화하는 과정을 신호처리 과정을 위주로 설명한다. IV장에서는 벽 투과 영상 레이더의 고정된 송신 안테나와 수평 방향으로 이동하는 수신 안테나가 획득한 실험 데이터를 이용하여 제안하는 연구의 영상화 가능성을 기술하며, 실험 결과를 분석한다. 끝으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. 노이즈 영상 레이더 개념 연구

그림 1에 제안하는 노이즈 영상 레이더의 설계 개념을 도시하였다.

잡음과 유사한 형태의 송신 파형을 생성하기 위해 AWG(Arbitrary Waveform Generator)를 이용하여 노이즈 영상 레이더를 설계할 수 있다^[3]. 이렇게 생

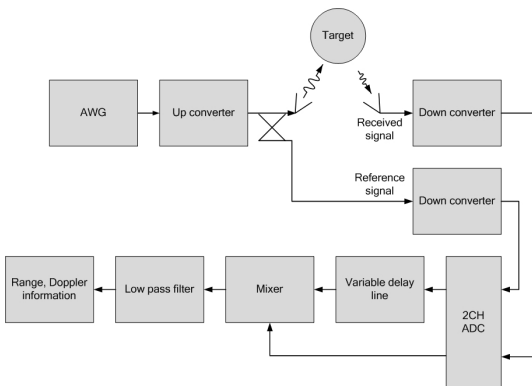


그림 1. 노이즈 영상 레이더의 설계 개념
Fig. 1. Design concept of the noise imaging radar.

성된 신호는 필터와 증폭기를 통해 증폭되며, 국부 발진기에서 증폭된 신호와 혼합되어 송신된다. 이때 표적의 거리 해상도 ΔR 는 식 (1)과 같이 송신 주파수 대역폭(BW: Band Width)에 반비례하므로 거리 해상도를 높이기 위해 본 논문에서는 광대역 노이즈 영상 레이더를 설계하였다.

$$\Delta R = \frac{C}{2BW} \quad (1)$$

위 식에서 C 는 빛의 속도를 나타낸다. 이와 같이 송신한 잡음 신호에 대한 표적의 반사 신호로부터 표적을 영상화하기 위해서는, 송신 신호의 특성을 이용하여 표적 거리 정보를 획득하는 과정이 필요하다. 잡음 신호의 경우, 펄스 신호처럼 거리 셀을 이용할 수도, 주파수 변조 신호처럼 비트 주파수를 이용할 수도 없기 때문에, 본 논문에서는 송신 신호와 수신 신호 간 cross-correlation을 수행함으로써 표적의 거리 정보를 획득한다.

이를 위해 송신과 동시에 참조 신호를 생성하여 참조 신호와 수신 신호 간 연산을 수행하며, 연산된 표적 거리 정보, 즉 거리 압축된 신호에 대해서는 기존의 합성개구면 레이더의 영상화 알고리즘 중 거리 압축 신호를 직접 이용하는 RDA를 적용하여 표적을 영상화한다.

따라서 표적의 방위각 정보를 추가로 획득할 수 있다면 RDA를 기반으로 표적 거리 정보를 이용하여 전방 표적의 영상을 획득할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 그림 1의 노이즈 영상 레이더의 안테나 부를 1개 송신 안테나-1개 수신 안테나 구조가 아닌 그림 2의 1개의 송신 안테나-(배열) 수신 안테나 구조로 구성하였다.

그림 2에서 송신 안테나는 고정되며, 수신 안테나는 수평 방향으로 이동하면서 표적 반사 신호를 수신한다. 이러한 수신 안테나의 이동 과정은 하나의 안테나 배열을 형성하므로 노이즈 영상 레이더는 마

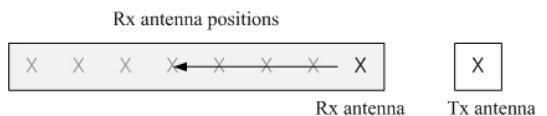


그림 2. 노이즈 영상 레이더의 안테나 구조
Fig. 2. Antenna structure of the noise imaging radar.

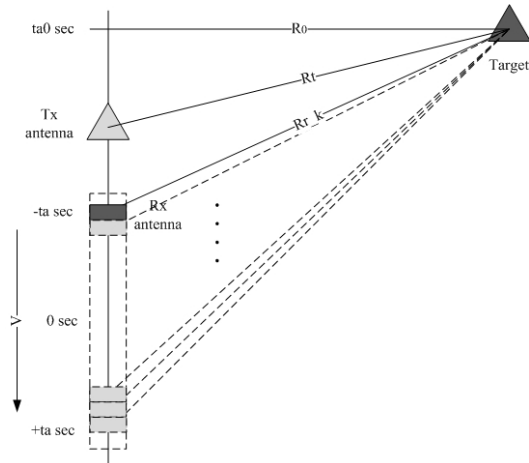


그림 3. 바이스테틱 합성개구면 레이더 기하 구조 분석
Fig. 3. Analysis of the bi-static SAR geometry.

치 바이스테틱 합성개구면 레이더처럼 동작하게 된다. 따라서 RDA를 바이스테틱 구조에 적합하게 적용하면 표적 정보를 획득할 수 있다. 이 때 grating lobe를 피하기 위해 수신 안테나 간 거리 \$d\$는 파장 \$\lambda/2\$보다 작게 설정하며, 만약 다수의 행을 형성하여 표적 반사 신호를 수신한다면 3차원 영상 정보를 획득할 수도 있다.

제안하는 노이즈 영상 레이더의 안테나 배열 및 표적과의 기하 관계를 설명하기 위해 그림 3에 바이스테틱 합성개구면 레이더의 2차원 기하 구조를 도시하였다.

그림 3에서 \$V\$는 수신 안테나의 이동 속도, \$t_a\$는 영상의 방위각 축 시간 성분, \$t_{a0}\$는 표적의 방위각 시간, \$R_0\$는 표적과 안테나 간 수직 최단 거리를 나타낸다. 따라서 송신 신호는 식 (2)와 같이, 기저 대역으로 하향 변환된 수신 신호는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_t(t_a, t_e) = \exp(j2\pi f_c t_e) \exp(j\pi k_e t_e^2) \quad (2)$$

$$S_r(t_a, t_e) = \exp(-j2\pi f_c t_{igt}) \exp(j\pi k_e (t_e - t_{igt})^2) \quad (3)$$

식 (3)에서 \$t_e\$는 영상의 거리 축 시간 성분, \$t_{igt}\$는 표적과 안테나 간 시간, \$f_c\$는 중심 주파수, \$k_e\$는 AWG에 의해 생성되는 주파수 변조율을 나타낸다. 이 때 기저 대역으로 하향 변환된 참조 신호는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

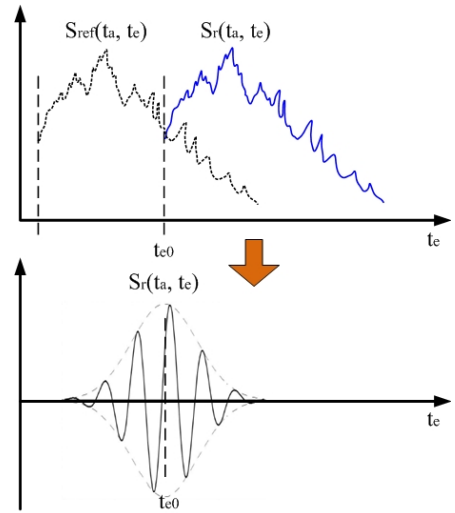


그림 4. 거리 압축 개념
Fig. 4. Concept of the range compression.

$$S_{ref}(t_a, t_e) = \exp(j\pi k_e t_e^2) \quad (4)$$

표적 거리 정보 획득을 위한 수신 신호와 참조 신호와의 거리 압축 개념을 그림 4에 도시하였다.

AWG를 이용한 노이즈 영상 레이더는 거리 축에서의 표적 위치 \$t_{e0}\$ 지점을 찾기 위해 수신 신호와 시간 지연된 참조 신호의 cross-correlation을 수행한다. 이 때 표적 신호는 거리 축 방향으로 압축되며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_r(t_a, t_e) = A_0 F_e \text{sinc}(F_e(t_e - t_{igt})) \exp\left(-j \frac{2\pi R_{igt}}{\lambda}\right) \quad (5)$$

\$\lambda\$는 파장, \$A_0\$는 복소 상수, \$F_e\$는 거리 축 방향의 주파수 대역폭, \$R_{igt}\$는 표적과 안테나 간 거리를 나타낸다. 이 때 \$R_{igt}\$는 테일러 급수를 이용하여 식 (6)과 같이 근사적으로 변환될 수 있다^[6].

$$R_{igt} = R_t + \sqrt{R_0^2 + (V(t_a - t_{a0}))^2} \approx R_t + R_0 + \frac{(V(t_a - t_{a0}))^2}{2R_0} \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 식 (5)를 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$S_r(t_a, t_e) = A_0 F_e \text{sinc}(F_e(t_e - t_{igt})) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi(R_t + R_0)}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{\pi V^2(t_a - t_{a0})^2}{\lambda R_0}\right) \quad (7)$$

식 (7)로부터 방위각 축 방향의 도플러 주파수 f_a 가 식 (8)과 같이 도출될 수 있다.

$$f_a = -\frac{V^2(t_a - t_{a0})}{\lambda R_0} \quad (8)$$

식 (7)에서 표적은 거리 방향으로 압축되었다. 앞서 설명한대로 표적 반사 신호는 잡음 신호 형태로 수신되기 때문에 다중 경로에 의한 난반사에 매우 강인하게 수신될 수 있으며, 따라서 표적의 거리 정보는 비교적 정확하게 획득될 수 있다.

더 나아가 식 (7)의 수신 신호는 바이스태틱 합성 개구면 레이더의 수신 신호와 유사한 구조로 되어 있기 때문에, III장에서 설명하는 RDA에 기반한 바이스태틱 영상화 알고리즘을 통해 표적 정보를 거리-방위각 축 정보로 획득할 수 있다. 다음 장에서 이러한 영상화에 대해 설명한다.

III. 영상화 알고리즘 적용 연구

본 논문에서는 노이즈 영상 레이더를 이용하여 식 (5)와 같이 거리 방향으로 압축된 신호를 획득한 다음, 영상화를 위해 식 (7)에 대해 RDA에 기반하여 바이스태틱 수신 신호에 적합한 RCMC(Range Cell Migration Compensation)와 방위각 압축을 수행한다. 그림 5에 노이즈 영상 레이더에서 획득한 거리 압축

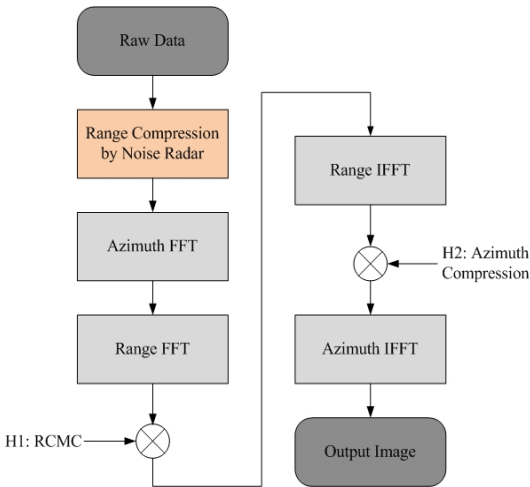


그림 5. 노이즈 영상 레이더 영상화 알고리즘(RDA)
Fig. 5. Imaging algorithm(RDA) of the noise imaging radar.

신호 처리를 위한 RDA의 블록 다이어그램을 도시하였다.

그림 5의 영상화 알고리즘에 따라 식 (7)에 대해 방위각 방향 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$S_r(f_a, t_e) = B_0 F_e \text{sinc}(F_e(t_e - t_{tgt})) \cdot \exp\left(j\pi \frac{\lambda R_0}{V^2} f_a^2\right) \exp(-j2\pi t_{a0} f_a) \quad (9)$$

위 식 (9)에서 B_0 는 복소 상수를 나타내며, RCM 성분은 식 (10)과 같이 해석될 수 있다.

$$\Delta R_{rcm} = \frac{V^2}{2R_0} \left(-\frac{\lambda R_0}{V^2} f_a\right)^2 = \frac{\lambda^2 R_0}{2V^2} f_a^2 \quad (10)$$

식 (10)의 RCM 성분을 보상하기 위해 그림 5에 따라 식 (9)에 대해 거리 방향 FFT를 수행하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$S_r(f_a, f_e) = B_0 \text{rect}\left(\frac{f_e - k_e \frac{R_{tgt}}{C}}{F_e}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi k_e \frac{(R_0 + \Delta R_{rcm})}{C} f_e\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{\lambda R_0}{V^2} f_a^2\right) \exp(-j2\pi t_{a0} f_a) \quad (11)$$

식 (11)에 식 (12)의 RCMC 필터 H_1 을 곱한 후 거리 방향 IFFT(Inverse FFT)를 수행하면 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$H_1 = \exp\left(j2\pi k_e \frac{\Delta R_{rcm}}{C} f_e\right) \quad (12)$$

$$S_r(f_a, t_e) = B_0 F_e \text{sinc}(F_e(t_e - t_{e0})) \cdot \exp\left(j\pi \frac{\lambda R_0}{V^2} f_a^2\right) \exp(-j2\pi t_{a0} f_a) \quad (13)$$

위 식 (13)에서 t_{e0} 는 표적의 거리 축 방향에서의 시간 성분을 나타낸다. RCMC를 통해 식 (9)의 RCM 성분이 식 (13)에서 보상되었음을 확인할 수 있다.

RDA에 따라 방위각 압축을 위해 식 (14)의 방위각 정합 필터 H_2 를 식 (13)에 곱한 후 방위각 방향 IFFT를 수행하면 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$H_2 = \exp\left(-j\pi \frac{\lambda R_0}{V^2} f_a^2\right) \quad (14)$$

$$S_r(t_a, t_c) = B_0 F_c \text{sinc}(F_c(t_c - t_{c0})) \cdot F_a \text{sinc}(F_a(t_a - t_{a0})) \quad (15)$$

위 식 (15)에서 F_a 는 방위각 축 방향의 주파수 대역폭을 나타내며, 최종적으로 획득한 수신 신호는 거리 축과 방위각 축에서 각각 표적을 압축하였으므로 바이스테틱 구조의 노이즈 영상 레이더를 이용한 표적 영상화는 가능함을 알 수 있다.

IV. 벽 투과 영상화 실험 및 분석 결과

앞서 연구한 노이즈 영상 레이더와 영상화 알고리즘을 이용한 벽 투과 영상화 가능성을 검증하기 위해 그림 6과 같이 벽 투과 영상화 실험을 수행하였다. 이 때 노이즈 영상 레이더의 송신 신호와 표적 반사 수신 신호는 벽에 의해 굴절되어 시간 지연이 발생하게 되는데, 본 논문에서는 하드웨어적으로 지연 시간을 보상하였다.

그림 6의 실험을 위해 벽 종류는 약 7 cm 일반 벽돌을 선택하였으며, RF 신호의 평균 감쇄 비율, 주파수 대역별 표면 침투 능력, 주파수 대역별 신호 손실 등을 고려하여 송신 주파수를 C 밴드로 설정하였다. 15 cm 거리 해상도를 만족하기 위해 주파수 대역폭을 1 GHz로 설정하였으며, 수신 안테나 간 간격은 4 cm로 설정하였고, 바닥으로부터 약 1.2 m 높이에 안테나를 설치하였다. 표적으로서는 한 변의 길이가 0.3 m인 corner reflector를 바닥으로부터 약 1.1 m 높

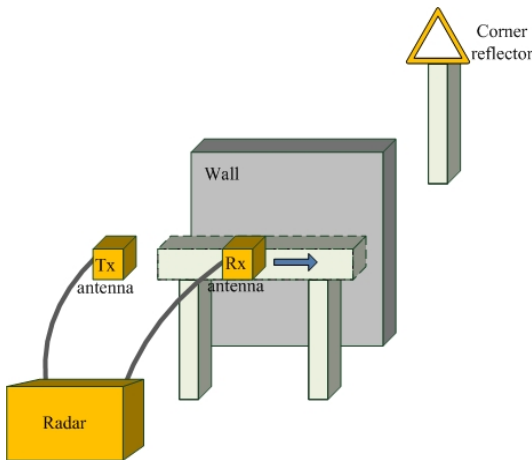


그림 6. 벽 투과 영상화 실험
Fig. 6. Laboratory test of the TWIR.

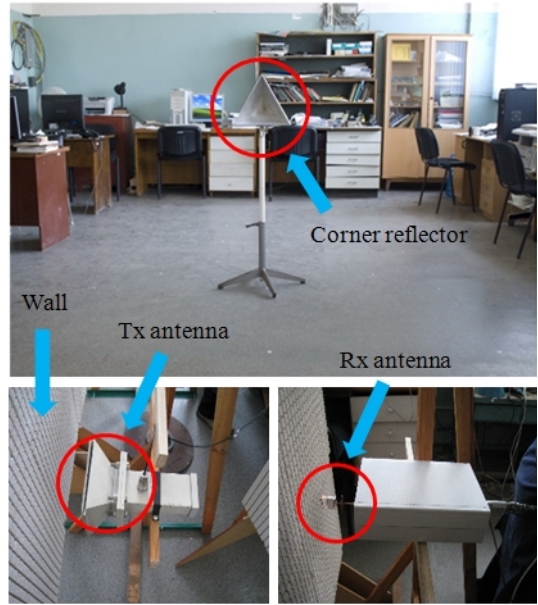


그림 7. 벽 투과 영상화 실험 장면
Fig. 7. Pictures of the laboratory test.

이에, 안테나로부터 약 3 m 지점에 설치하였다. 그림 7에 위 실험의 실제 장면을 나타내었다.

그림 7의 벽 투과 영상화 실험으로부터 획득한 표적 영상을 그림 8에 도시하였다.

표적이 있을 때와 없을 때를 비교하기 위해 표적이 없을 때 탐지한 벽 투과 영상을 그림 9에 도시하였다.

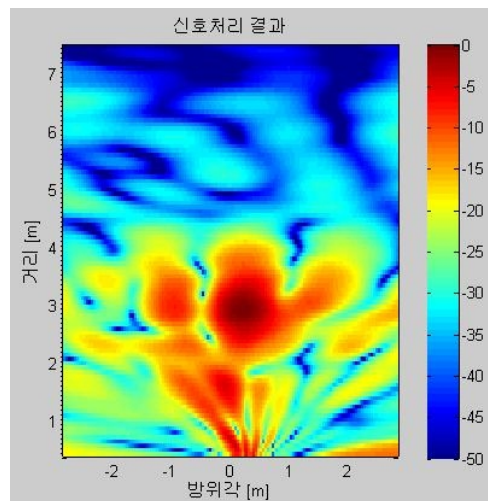


그림 8. 표적 영상 형성 결과
Fig. 8. Imaging result of 1 target.

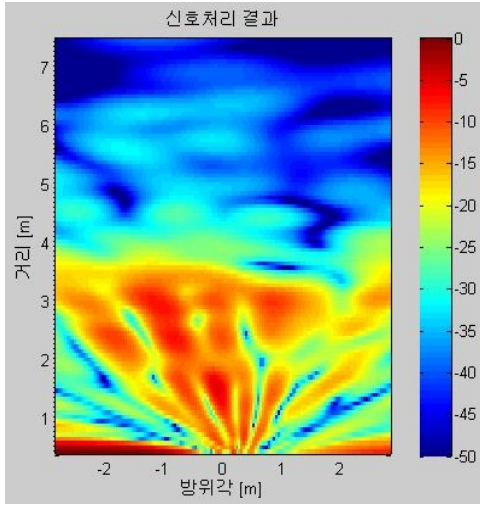


그림 9. 표적이 없을 때의 영상 형성 결과
Fig. 9. Imaging result of no target.

그림 8, 9의 비교를 통해 제안하는 연구가 벽을 투과하여 표적을 성공적으로 생성하였음을 확인할 수 있다. 표적의 위치 정확도와 방위각 해상도, PS-LR(Peak To Sidelobe Ratio)을 확인하기 위해 그림 8의 표적을 그림 10과 같이 방위각 축에서 분석하였다. 바이스태틱 안테나 구조에 대한 표적의 3 dB 방위각 해상도는 식 (16)과 같이 약 0.6 m으로 추정된다^[6].

$$\Delta a \approx \frac{R_{tgt}\lambda}{L} \quad (16)$$

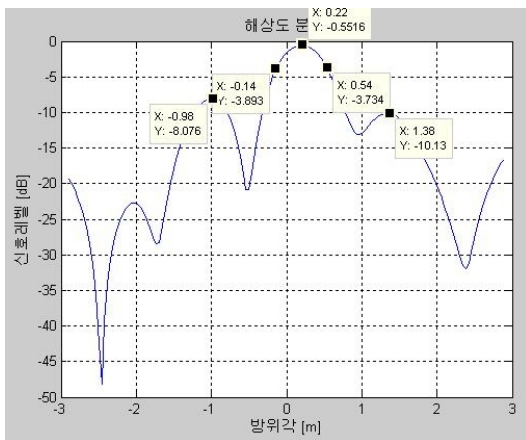


그림 10. 표적 방위각 정보 분석
Fig. 10. Analysis of the cross-range information of the target.

그림 10에서 3 dB 방위각 해상도가 약 0.68 m보다 작으므로 제안하는 연구가 레이더 이론에 부합하는 표적을 영상화하였음을 알 수 있다. 이 때 PS-LR은 약 8 dB를 상회하고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 잡음 신호를 이용한 벽 투과 영상 레이더의 영상화를 연구하였다. 벽 투과 영상 레이더는 광대역 레이더이고, 잡음 신호를 송신 파형으로 사용하기 때문에 송·수신 잡음 신호 간 상관관계를 이용하여 거리 방향으로 영상을 압축한다. 이후 신호처리 과정은 기존의 합성개구면 레이더의 영상화 알고리즘 중 Range Doppler 알고리즘을 바이스태틱 구조에 맞게 수정 적용하여 영상화를 수행하였다.

이러한 개념 설계 및 실험과 더불어 본 논문에서는 노이즈 영상 레이더의 송·수신 신호를 수학적으로 분석하여 영상화 알고리즘에 따른 신호처리 과정을 설명하였다. 노이즈 영상 레이더를 이용한 벽 투과 영상화 실험을 통해 제안하는 연구가 레이더 이론에 부합하게 표적을 영상화함을 확인하였으며, 최종 영상 결과를 제시함으로써 그 가능성을 검증하였다.

References

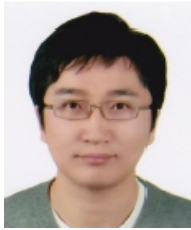
- [1] Xaver-800, www.camero-tech.com
- [2] S. R. J. Axellson, "Noise radar using random phase and frequency modulation", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, pp. 2370-2384, Nov. 2004.
- [3] K. A. Lukin, et al., "L-band stepped frequency noise SAR on the basis of arbitrary waveform generator", *Asia-Pacific Conference Synthetic Aperture Radar*, 2011.
- [4] R. M. Narayanan, et al., "Through-wall radar imaging using UWB noise waveforms", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 345, no. 6, pp. 659-678, 2008.
- [5] R. M. Narayanan, et al., "Doppler estimation using a coherent ultra-wideband random noise radar", *IE-*

EE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 6, no. 4, pp. 868-878, 2000.

[6] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, *Digital Proce-*

ssing of Synthetic Aperture Radar Data, Artech House, 2005.

하 중 수



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 영상 레이더, 시스템 M&S, 영상 신호처리 등

이 중 민



1985년 2월: 경희대학교 물리학과 (이학사)
1988년 2월: 경희대학교 물리학과 (이학석사)
2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
1991년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계/분석, 특수 레이더 등

조 병 래



1999년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2005년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2005년 3월~2006년 1월: 포항공과대학교 전자전기공학과 연구원
2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 영상레이더 등

조 규 공



1986년 3월: 육군사관학교 (공학사)
1991년 11월: U. of Surrey (공학석사)
2000년 5월: U. of Florida (공학박사)
2003년 11월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 미사일/로켓 능동방어기술, 센서융합, 고속소형 표적처리, 체계분석, 영상정보전시 등

선 선 구



1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1989년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 영상레이더, 컴퓨터비전