

밀리미터파 탐색기에서 RELAX 기법을 이용한 표적 식별 신호처리 기법

조희진^{*,1)} · 김민우¹⁾

¹⁾ 국방기술품질원 대구센터 1팀

A Study on Signal Processing of Target Discrimination Using RELAX in Millimeter-wave Seeker

Heejin Jo^{*,1)} · Minwoo Kim¹⁾

¹⁾ The 1st Team of Deagu Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

(Received 20 October 2014 / Revised 20 April 2015 / Accepted 22 May 2015)

ABSTRACT

This paper introduces a signal processing technique for discrimination of missile target. In order to detect and discriminate the target, a seeker radar makes use of chirp waveform and stretch processing to generate high resolution range profiles(HRRPs). RELAX(relaxation) algorithm, which is one of the spectral estimation techniques, was used to find scattering centers of a missile from HRRP. From the information on the distribution of one-dimensional(1-D) scattering centers on a target, we can discriminate the target without noise.

Key Words : Target Discrimination(표적 식별), RELAX Algorithm(릴랙스 알고리즘), Missile Defense System(미사일 방어 체계), MMW Seeker(마이크로파 탐색기), Spectral Estimation Technique(스펙트럼 추정 기법)

1. 서론

탄도탄은 매우 고속으로 이동하며 일반적으로 낮은 RCS(Radar Cross Section) 값을 갖는 표적이다. 이러한 고속 저 RCS 표적인 탄도탄을 요격하기 위하여 지상 추적레이더 및 요격 미사일로 이루어진 미사일 방어 시스템(Missile Defense System)이 이용된다. 최근 이스라엘과 하마스와의 분쟁에서 하마스의 로켓을 요격하

기 위한 이스라엘의 단거리 대공요격미사일 체계인 아이언돔(Iron Dome)이 미사일 방어 시스템의 대표적인 사례라고 할 수 있다.

미사일 방어시스템 중 요격 미사일의 경우, 탄두부의 Microwave 또는 적외선 탐색기(Seeker)를 탑재하여 탐색기로 부터 적 탄도탄을 정확히 요격하기 위한 거리, 속도, 위치 정보 등을 제공받게 된다. 이러한 정보의 정확도가 떨어진다면 요격미사일을 이용하여 탄도탄을 요격하는 것은 불가능한 일이므로, 미사일 방어 시스템의 핵심은 정보의 정확도라고 할 수 있다. 본 논문은 표적신호와 노이즈신호 구분을 명확하게 하여 표적

* Corresponding author, E-mail: seriuce111@hanmail.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

정보의 정확도를 높이는 신호처리 기법을 소개한다.

일반적으로 HRRP(High Resolution Range Profile)는 레이더 혹은 탐색기에서 송신된 신호가 표적에 도달한 후 산란메커니즘을 통하여 다시 되돌아온 신호를 수신하여 수신 신호를 정합 필터링(matched filtering)을 하여 만들어진다. 이렇게 가공된 신호를 이산 신호로 변환하기 위해 사용되는 스펙트럼 추정 기법(spectral estimation technique)은 일반적으로 주파수 영역에서 수행된다. 하지만 주파수 영역에서 수행하는 스펙트럼 추정 기법에는 해상도가 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정합 필터링 기법 대신에 Stretch processing을 하여 시간 영역에서 스펙트럼 추정 기법을 사용하였다.

시간영역에서 스펙트럼 추정을 위해서 RELAX 알고리즘을 사용하였고, 이 알고리즘을 사용하여 얻은 이산 신호 거리측면도의 첫 번째 피크(peak)에서 마지막 피크까지를 표적 신호로 식별하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Stretch processing에 대하여 소개하고, 3장에서는 RELAX 알고리즘에 대하여 소개한다. 4장은 제안한 신호처리 기법을 이용한 시뮬레이션 결과를 보여주며, 5장에서는 결론을 나타낸다.

2. 시간영역 이산 스펙트럼 추정 기법

2.1 Peak search

일반적으로 노이즈 신호를 제외한 표적신호를 추정하기 위해서 사용되는 방법은 크게 2종류가 있다. 첫 번째 방법은 ISAR imaging을 통한 방법이고 두 번째 방법은 peak search를 통한 방법이다.

먼저 ISAR imaging 방법은 표적 신호를 추정함에 있어서 높은 정확도를 가지고 있는 것이 장점이다. 하지만 레이더 수신신호를 imaging 할 때 계산 시간이 오래 걸려 실제 상황에서는 적용이 제한된다. Fig. 1은 스퀴드 미사일의 ISAR imaging영상을 나타내며 표적의 RCS가 클수록 붉은색으로 나타남을 알 수 있다^[1].

다음으로 peak search 기법은 계산 시간이 짧기 때문에 실제 상황에 적용할 수 있지만 노이즈에 약하며, 실제 표적의 산란원에 의한 피크가 아닌 신호의 피크를 찾는 경우가 발생하기 때문에 정확도가 낮은 단점이 있다. 본 논문에서 제안한 표적신호 추정 방법은 주파수 대역이 작더라도 산란원의 위치와 크기를 비교

적 정확하게 추정할 수 있으며, 계산 시간이 빠르기 때문에 실제 상황에도 적용 가능하다고 판단한다. Fig. 2는 스퀴드 미사일의 peak search imaging 영상을 나타낸다^[1]. Fig. 2에서 실제 표적의 길이와 Peak search를 통해 계산한 표적의 길이가 차이는 것은 Peak search 기법의 정확도가 낮아서 생기는 오차이다. 이런 오차를 줄이기 위해서 사용되는 것이 본 논문에서 소개하는 신호처리 기법이다.

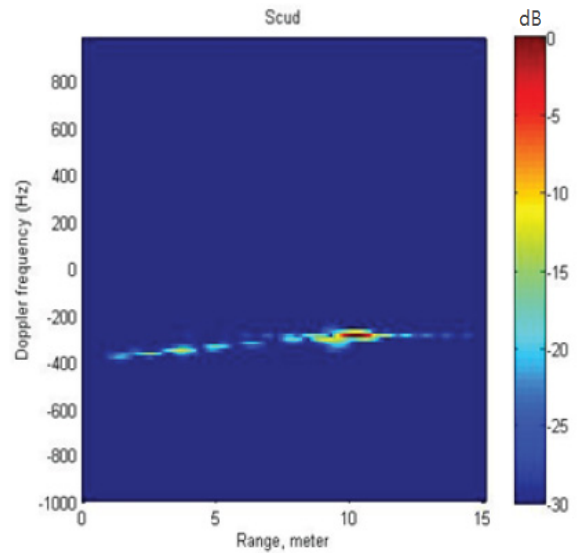


Fig. 1. ISAR imaging of the scud missile

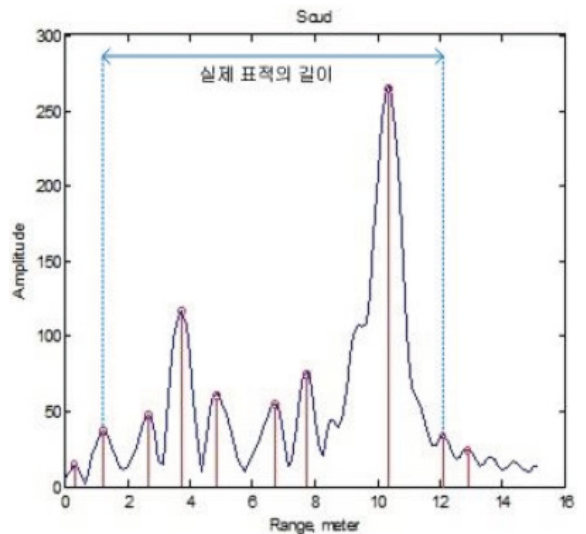


Fig. 2. Peak search imaging of the scud missile

2.2 Stretch processing

앞서 언급한 주파수 영역 스펙트럼 추정 기법의 단점인 해상도 저하 문제점을 보완하기 위해서 시간 영역 스펙트럼 추정 기법을 사용하기 위해서는 Stretch processing이 필요하다.

Stretch processing에 사용되는 신호는 chirp신호를 이용하였고 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$p(t) = A_0 \exp[j2\pi(f_0 t + 0.5 \frac{B}{\tau} t^2)] \times \text{rect}(\frac{t}{\tau}) \quad (1)$$

표적으로부터 반사된 chirp 신호를 표현하면 식 (2)와 같다.

$$s(t) = A \exp[j2\pi[f_0(t - \tau_0) + 0.5 \frac{B}{\tau}(t - \tau_0)^2]] \times (\frac{t - \tau_0}{\tau}) \quad (2)$$

위 두 수식에서 $p(t)$ 는 송신된 chirp 신호를 의미하고 $s(t)$ 는 표적으로부터 반사된 chirp 신호를 의미하며 f_0, B, rect 는 각각 시작 주파수, 대역폭, 사각펄스(rectangular pulse)를 의미한다. τ, τ_0, A_0, A 는 각각 펄스 지속시간(duration), 시간지연(time delay), 송신 및 수신 chirp 신호의 진폭을 나타낸다.

chirp 신호의 순시 주파수는 식 (3)과 같다.

$$f_i = \frac{d}{dt}(f_0 t + 0.5 \frac{B}{\tau} t^2) = f_0 + \frac{B}{\tau} t, 0 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

이 선형적인 주파수의 변화는 Δ 로 정의된다. chirp 신호에서 분산 요소(dispersion factor)라 불리는 수치는 D 라는 심벌로 정의되며 수식 정의는 식 (4)와 같다.

$$D = \tau \Delta \quad (4)$$

식 (1)의 chirp 신호를 $2\pi f_0 = \beta, \frac{\pi B}{\tau} = \alpha$ 로 치환하면 chirp 신호는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p(t) = a(t) \exp[j\beta t + j\alpha t^2] \times \text{rect}(\frac{t}{\tau}) \quad (5)$$

여기서 $a(t) = 1, 0 \leq t \leq \tau$ 이며, 이에 따라 n 개의 산란원으로 구성된 표적으로부터 반사된 chirp 신호를 표현하면 식 (6)과 같다.

$$s(t) = \sum_n \sigma_n a(t - \frac{2x_n}{c}) \exp[j\beta(t - \frac{2x_n}{c}) + j\alpha(t - \frac{2x_n}{c})^2] \quad (6)$$

$$= \sum_n \sigma_n a(t - t_n) \exp[j\beta(t - t_n)] \exp[j\alpha(t^2 - 2\alpha t_n t + \alpha t_n^2)]$$

위의 반사 신호를 이용한 stretch processing 기반의 deramping 과정을 통해 얻어진 시간영역 복원 신호는 식 (7)과 같다.

$$s_c(t) = s^*(t) \exp(j\beta t + j\alpha t^2) \quad (7)$$

$$= \sum_n \sigma_n a^*(t - t_n) \exp(j\beta t_n - j\alpha t_n^2) \exp(j2\alpha t_n t)$$

위와 같은 복원 신호에서 sinusoidal 성분의 주파수 $\exp(j2\alpha t_n t)$ 에 표적의 위치 x_n 에 따른 왕복 시간 $t_n = \frac{2x_n}{c}$ 의 정보가 담겨져 있다. 식 (7)을 푸리에 변환하면 압축 신호는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_c(w) = \sum_n \sigma_n \exp(j\beta t_n - j\alpha t_n^2 - jw t_n) \text{psf}(w - 2\alpha t_n) \quad (8)$$

여기서 $\text{psf}(w)$ 는 $a^*(t)$ 를 푸리에 변환한 점상 강도 분포 함수(point spread function)이다. 이를 통한 표적의 위치 함수는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$|S_c(w)| \approx \sum_n \sigma_n |\text{psf}(w - 2\alpha t_n)| \quad (9)$$

위의 stretch processing 과정을 통해 표적의 산란원 위치 신호를 복원하는 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 또한 시간영역 이산 스펙트럼 기법의 전체적인 흐름을 나타내는 순서도를 Fig. 4에 나타내었다.

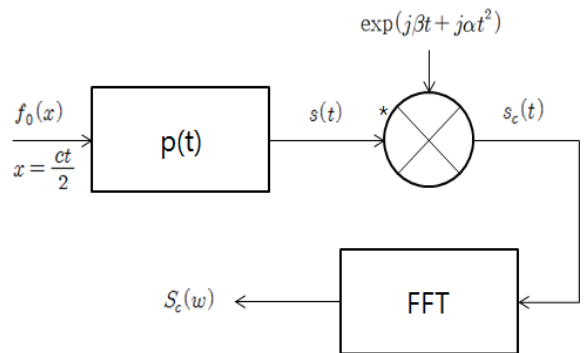


Fig. 3. Stretch processing

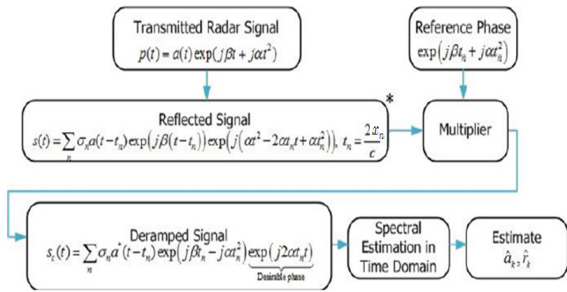


Fig. 4. Flow chart of spectral estimation technique in time domain

3. Relaxation Algorithm

RELAX(Relaxation Algorithm)는 신호의 극점(pole)을 예측하는 기법인 CLEAN 기법의 한 종류이다. CLEAN 기법은 신호의 극값이 높은 순서에서부터 PSF(Point Spread Function)을 재구성하여 차례대로 원 신호에서 빼 나가 깨끗한 신호 또는 이미지를 얻는 기법이다. RELAX 알고리즘은 CLEAN 기법을 반복적으로 수행하도록 변형하여 보다 정확한 극점의 위치와 극값을 얻는 기법이다. 자세한 과정은 아래와 같다.

원 신호 y 를 식 (10)과 같이 정의한다.

$$y = \sum_{i=1}^K a_i w(f_i) \tag{10}$$

$$w(f_i) = [1 \ e^{j2\pi f_k} \ \dots \ e^{j2\pi(N-1)f_k}]^T \tag{11}$$

여기서 a 는 진폭, f 는 극점의 위치, N 은 신호의 길이이다. K 개의 개수 a 와 f 는 아래 비용 함수를 최소화하는 값이 되어야 한다.

$$C_3(f_1, a_1, \dots, f_K, a_K) = \left\| y - \sum_{k=1}^K w(f_k) a_k \right\|^2 \tag{12}$$

원 신호에서 한 개의 PSF를 뺀 y_k 를 식 (13)과 같이 정의한다.

$$y_k = y - \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{a}_i w(\hat{f}_i) \tag{13}$$

나머지 계수들은 주어졌다고 가정하면 식 (12)의 비용 함수를 최소화하는 계수들은 아래의 식 (14), (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{a}_k = \frac{w^H(f_k) y_k}{N}, \quad f_k = \hat{f}_k \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \hat{f}_k &= \arg \min_{f_k} \left\| \left[I - \frac{w(f_k) w^H(f_k)}{N} \right] y_k \right\|^2 \\ &= \arg \min_{f_k} |w^H(f_k) y_k|^2 \end{aligned} \tag{15}$$

식 (15)를 만족하는 \hat{f}_k 는 제로 패딩(zero padding) 후의 y_k 를 FFT한 신호에서 최대 극값을 가진 극점의 위치로 쉽게 구할 수 있다. 계수들을 순차적으로 구하는 방법은 다음과 같다^[2].

Step 1 : $K=1$ 로 놓는다. \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 y 로부터 얻는다.

Step 2 : $K=2$ 로 놓는다. \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 식 (13)에 넣어 y_2 를 계산하고, 그로부터 \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 얻는다. 이렇게 얻은 \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 다시 식 (13)에 넣어 \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 재계산한다.

Step 3 : $K=3$ 로 놓고, 과정 2에서 얻은 $\{\hat{f}_i, \hat{a}_i\}_{i=1}^2$ 을 식 (13)에 넣어 y_3 를 얻고 난 다음 \hat{f}_3 과 \hat{a}_3 을 계산한다. 그 다음 $\{\hat{f}_i, \hat{a}_i\}_{i=2}^3$ 을 식 (13)에 넣어 y_1 을 구하고 \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 다시 계산한다. 그리고 $\{\hat{f}_i, \hat{a}_i\}_{i=1,3}$ 을 식 (13)에 넣어 y_2 를 얻고 \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 를 다시 계산한다.

이후 과정 : 위의 Step 1 ~ Step 3의 과정을 원하는 K 값이 될 때까지 혹은 아래에 설명한 특정 조건을 만족할 때까지 반복한다.

위 과정을 통해 산란원의 위치와 크기를 얻을 수 있으며, 위의 과정을 계산 중 전체 산란원의 개수 K 를 알고 있다면 K 개의 산란원의 위치와 크기를 얻은 후 RELAX 알고리즘 과정을 마치면 된다. 하지만 실제 field에서 산란원의 개수를 사전에 미리 아는 것은 불가능하다. 그러므로 RELAX 기법을 종료하기 위한 조건을 설정 혹은 정해 주어야 한다. RELAX 기법은

식 (13)을 보면 알 수 있듯이 각 Step을 통해 얻은 산란원의 계수로 만든 PSF을 원 신호에서 계속 빼 나가는 구조를 가지고 있다. PSF의 합은 원본 신호를 재현하는데 FFT나 노이즈의 영향으로 과정이 진행되면서 원본 신호와 조금씩 오차가 생기게 되는데, 이러한 오차가 누적되거나 혹은 모든 산란원의 위치를 찾게 되면 RELAX 기법은 실제로 존재하지 않는 극값을 추정하게 된다. 이와 같은 결과는 식 (13)에서 PSF을 뺄 때 전체 파워가 오히려 상승하게 되는 현상을 볼 수 있으며, Fig. 5, 6을 참조하면 쉽게 알 수 있다. 식 (13)에서 $y_k = [y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kN}]$ 라 하면, 잔여 파워(Residual Power)는 아래 식 (16)과 같이 정의된다.

$$Residual\ Power = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N |y_{nk}|^2} \quad (16)$$

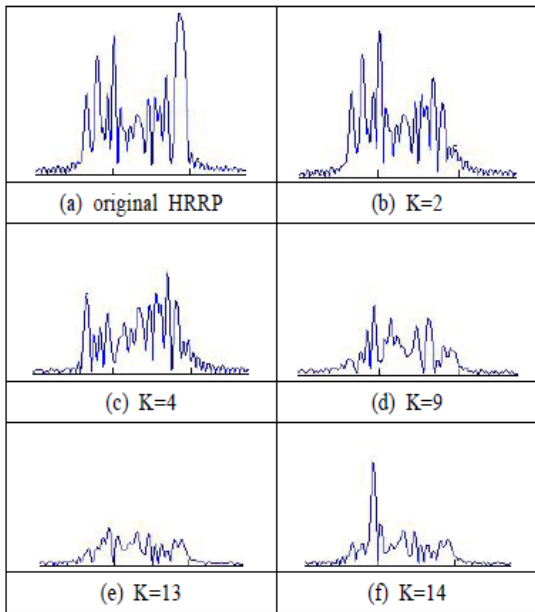


Fig. 5. The condition for the finish of RELAX algorithm

Residual power값은 산란점의 위치가 정확하다면 값이 점점 작아지지만 존재하지 않는 극값을 추정하면 값이 커지는 현상이 나타난다. 이러한 경우, 더 이상의 산란원을 찾는 것은 잘못된 산란원을 추정하는 것이므로, RELAX 기법을 종료한다. Fig. 5, 6을 참조하면 RELAX 기법의 종료 과정과 조건을 볼 수 있다. Fig.

5(a)는 원본 HRRP이고, Fig. 5(b) ~ (e)를 통해 총 13개의 산란점을 찾았다. Fig. 5(f)를 보면 K=14일 때 존재하지 않는 극값을 추정하였고, 신호의 파워가 늘어나게 되는 현상을 Fig. 6에서 확인 할 수 있다. 그러므로 최종적으로 찾은 산란원의 개수는 13개가 된다.

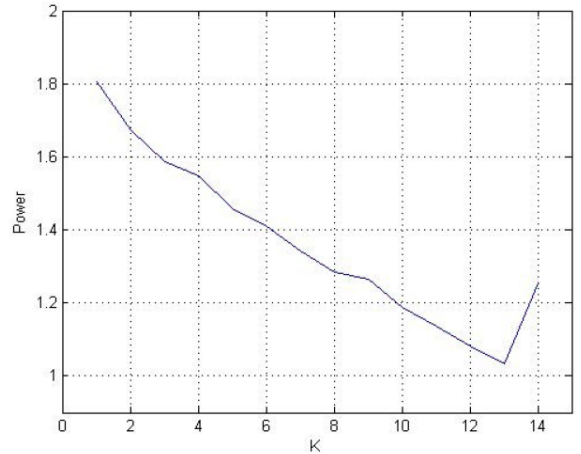


Fig. 6. Residual power of HRRP with the number of scattering centers

4. Simulation Result

이 장에서는 본 논문에서 제안한 기법이 표적 식별에 적합한지를 나타내는 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 시뮬레이션을 위해 사용한 표적은 Fig. 7과 같이 대포동 미사일을 점 산란원으로 모델링한 3-D CAD 모델을 사용하였다. Table 1에서는 시뮬레이션의 조건을 나타내었으며, Table 2 ~ 4에서는 조건별 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

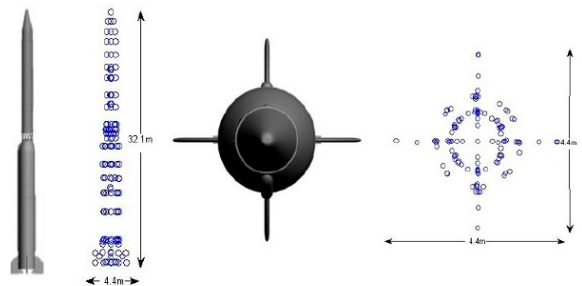


Fig. 7. 3D CAD model of taepodong 2 missile

Table 1. Simulation condition

구분	값
중심 주파수	Ka band
대역폭	200 MHz
펄스폭	30 us
샘플링 주파수	500 MHz
PRF	2 kHz

Table 2. Simulation result

표적	실제 길이	추정 길이 (평균값)	산란원 수
대포동 미사일2	32.1 m	31 m	11개

Table 3. Length estimation of the target with angle

표적	관찰각도 영역	
	0 ~ 70°	0 ~ 80°
대포동 미사일2	31 m	30.2 m

Table 4. Length estimation of the target with SNR

SNR	10dB	20dB	30dB
추정 길이	29.6 m	31 m	31.5 m

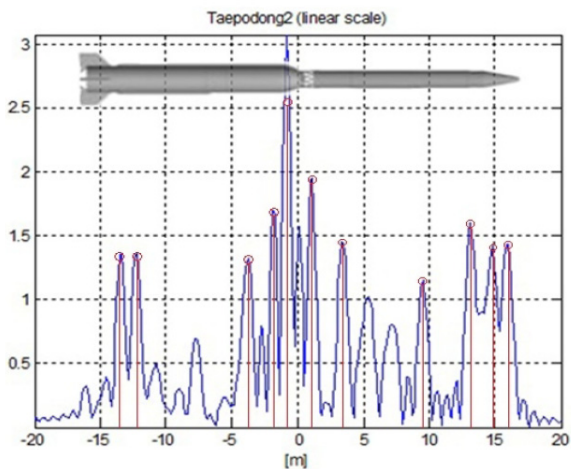


Fig. 8. Target signal estimation of a taepodong 2 scattering centers using RELAX algorithm

Fig. 8의 가로축과 세로축은 각각 Linear scale에서의 길이와 신호의 크기에 해당한다. Fig. 8에서 가장 왼쪽의 산란원의 위치와 가장 오른쪽의 산란원의 위치를 확인해보면 미사일의 길이가 약 31 m 정도임을 확인 할 수 있다. Fig. 8과 같은 시뮬레이션을 위해 Fig. 7의 대포동 미사일2 표적을 이용하였고, 2장과 3장에서 설명한 신호처리 기법을 이용하였다. Table 2는 SNR이 20 dB일 경우 레이더를 향해 45° 각도로 진입해오는 미사일에 대하여 100회 시행한 결과의 평균값이다. 추정 길이를 보면 실제 표적의 길이와 작은 오차를 가짐으로써 거의 유사함을 확인 할 수 있다.

관찰각이 90°에 가까워지면 표적의 길이를 추정할 수 없으므로 Table 3에서 관찰각이 90° 부근을 제외하 나머지 각도에 대하여 추정된 길이를 나타내었다. Table 3을 보면 알 수 있듯이 관찰각이 0 ~ 70°인 경우가 0 ~ 80°인 경우보다 표적의 길이 추정 정확도가 더 높다. 이 결과로부터 관찰각이 90°에 가까워 질수록 표적의 길이추정 정확도가 낮아짐을 알 수 있다.

Table 4는 Table 2와 동일한 조건에서 SNR에 따른 추정 길이를 나타내었다. SNR이 높을수록 추정된 표적길이의 정확도가 높아짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 제안한 신호처리 기법을 이용하여 레이더 수신 신호로부터 표적 신호를 구분하여 표적정보를 확인 할 수 있음을 확인하였다. 추후 연구를 통해 미사일 표적의 실제 기동 시나리오를 구현하고, 구현한 기동 시나리오를 기반으로 하여 북한이 보유한 다양한 미사일을 신호처리 기법을 통하여 식별하는 연구가 필요할 것이라 예상된다.

References

- [1] H. Jo, "A Study on Signal Processing of Ballistic Missile Warhead Discrimination using Millimeter-wave Seeker," Department of Electrical Engineering, POSTECH, 2013
- [2] Jina Li and Petre Stoica, "Efficient Mixed-spectrum Estimation with Applications to Target Feature

- Extraction,” IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 44, No. 2, Feb. 1996
- [3] K. Kim and H. Kim, “One-dimensional Scattering Center Extraction for Efficient Radar Target Classification,” IEE Proc.-Radar, Sonar, Navigation, Vol. 146, No. 3, Jun. 1999
- [4] G. Choi, S. Han, H. Jo, H. Kim, K. Kim, S. Song and Y. Na, “A Study on Signal Processing of Ballistic Missile Warhead Discrimination Using ESPRIT in Millimeter-wave(Ka-Band) Seeker,” The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 23, No. 2, pp. 266-269, 2012.