

# 밀리미터파 탐색기에서 ESPRIT 기법을 이용한 탄도 미사일 탄두 식별 신호처리 기법 개발

## A Study on Signal Processing of Ballistic Missile Warhead Discrimination Using ESPRIT in Millimeter-Wave(Ka-Band) Seeker

최각규 · 한승구 · 조희진 · 김효태 · 김경태 · 송성찬\* · 나영진\*

Gak-Gyu Choi · Seung-Ku Han · Hee-Jin Jo · Hyo-Tae Kim ·  
Kyung-Tae Kim · Sung-Chan Song\* · Young-Jin Na\*

### 요 약

본 논문은 탄도 미사일의 탄두를 식별하는 신호 처리 기법의 개발에 관하여 소개한다. 요격 미사일이 적 미사일을 파괴하기 위해서 적 미사일 탄두 위치의 정보가 필요하다. 적 미사일을 탐지하고 위치를 찾기 위해 요격 미사일의 밀리미터파 탐색기(millimeter-wave seeker)는 chirp 파형을 사용하여 HRRPs(High Resolution Range Profiles)을 발생시킨다. 표적의 산란점(scattering center)을 찾아내기 위해 대표적인 스펙트럼 추정 방법(spectral estimation technique)인 ESPRIT(Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Technique) 기법을 HRRPs에 적용하였다. 1차원 산란점의 정보를 이용하고 미사일의 길이를 추정함으로써 탄두의 위치를 식별하였다. 시뮬레이션 결과는 이러한 신호 처리 기법이 탄도 미사일의 탄두 식별에 적용하기에 효율적임을 보여준다.

### Abstract

This paper introduces a signal processing technique for discrimination of ballistic missile's warhead. An interceptor missile to destroy the enemy's ballistic missile requires an information on the location of missile's warhead. In order to detect and locate the missile's warhead, a seeker radar in the interceptor missile makes use of chirp waveform to generate high resolution range profiles(HRRPs). We applied one of the well known spectral estimation technique called ESPRIT (Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Technique) to these HRRPs to estimate scattering centers on the target. Using the information on the one-dimensional(1-D) scattering centers, we can find the location of the warhead by estimating the length of the missile. Simulation results show that the proposed signal processing technique is efficient in discriminating the warhead of an ballistic missile.

Key words : Missile Defense, Target Recognition, MMW Seeker

### I. 서 론

오늘날 적국의 미사일의 위협에 대비하기 위해서는 미국의 패트리엇 시스템과 유사한 미사일 방어

시스템(missile defense system, MD system)이 구축되어야 한다<sup>[1],[2]</sup>. 레이더를 이용하는 이러한 미사일 방어 시스템의 핵심 요소인 대응 요격 미사일은 적 미사일을 좀 더 정확하게 탐색, 요격하기 위한 정보를

「이 연구는 (주)삼성탈레스와 2012년도 두뇌 한국21사업에 의하여 지원되었음.」

포항공과대학교 전자전기공학부(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

\*삼성탈레스(주) 탐색기그룹(Seeker Group, Samsung Thales Co., Ltd.)

· 논문 번호 : 20120120-009

· 교신저자 : 김경태(e-mail : kkt@postech.ac.kr)

· 심사일자 : 2012년 2월 15일 · 수정완료일자 : 2012년 2월 17일

제공하는 밀리미터파 대역의 탐색기(seeker)를 많이 장착하고 있다. 효율적인 요격을 수행하기 위해서 탐색기가 적 미사일의 탄두(warhead)를 정확하게 식별하여 요격 미사일이 적 미사일의 탄두를 타격할 수 있도록 정보를 제공하는 것이 필요하다. 이에 따라 탐색기에서 얻어진 수신 신호를 신호 처리하여 표적의 길이  $L$ 을 추정하여 그 앞부분을 적 미사일의 탄두 부분으로 가정하고 식별하여야 한다.

일반적으로 레이더 수신 신호를 이용하여 표적의 HRRPs(High Resolution Range Profiles)을 생성하기 위해서는 정합 필터링(matched filtering) 과정을 거친다. 이 정합 필터링을 통해 얻어진 range profile에서 높은 피크(peak)들을 탐지한 다음 맨 처음 피크와 맨 마지막 피크 사이의 거리를 계산하여 표적의 길이를 추정한다. 하지만 정합 필터링을 사용한 HRRPs는 푸리에 변환(Fourier transform)을 사용하여 구현되기 때문에 해상도가 저하되는 단점이 있어 피크의 정확한 위치를 찾아내기 어렵다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 고해상도 이산 스펙트럼 예측 기법(high resolution discrete spectral estimator)인 ESPRIT(Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Technique)을 사용하였다. 이를 통해 탐색기의 주파수 대역이 작더라도 유도탄 표적상의 각 산란점(scattering center)에 해당되는 피크의 위치를 비교적 정확하게 변수(parameter)로 추출할 수 있다.

본 논문은 위의 기법을 사용하여 유도탄의 탄두를 정확히 측정하는 알고리즘을 얻어내었으며, 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 탐색기를 이용한 유도탄 탄두의 탐지를 위한 시스템 개념과 탄두 식별을 위한 신호 처리 기법에 대하여 소개한다. III장은 제안된 알고리즘을 이용하여 파형을 이용하여 도출한 시뮬레이션 결과를 보여주며, IV장은 결론을 나타낸다.

## II. 시스템 개념 모델 및 신호 처리 기법 연구

본 논문에서 가정하는 탐색기를 이용한 탄두 탐지의 시스템 개념 모델은 그림 1과 같다.

### 2.1 탄두 탐지 개념 모델 및 식별 알고리즘

그림 1에서 적 미사일이 속도  $\vec{v}$ 로 이동하고 있고,

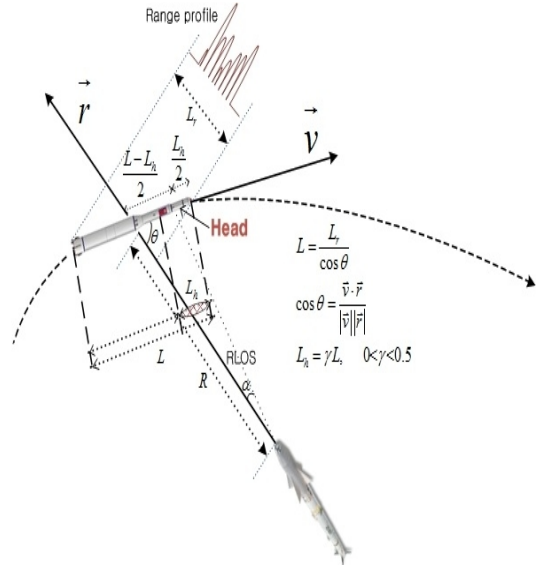


그림 1. 탐색기를 이용한 탄두 탐지 개념도  
Fig. 1. Concept of warhead discrimination using seeker.

이를 요격하기 위한 미사일의 탐색기가 적 미사일의 중심을 향해  $\vec{r}$  방향(RLOS: Radar's Line of Sight)로 이동하고 있다고 가정하면, 두 벡터  $\vec{v}$ 와  $\vec{r}$  사이의 각도  $\theta$ 는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\cos\theta = \frac{\vec{v} \cdot \vec{r}}{|\vec{v}||\vec{r}|} \quad (1)$$

이때 요격 미사일의 탐색기에서 수신한 신호로부터 range profile을 생성할 수 있으며, 생성된 range profile로부터 표적의  $\vec{r}$  방향으로 투사된 길이  $L_r$ 을 추정할 수 있다. 추정된  $L_r$ 에 따라 계산하는 표적의 실제 길이  $L$ 은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$L = \frac{L_r}{\cos\theta} \quad (2)$$

표적의 탄두 부분의 길이는 표적의 진행 방향인  $\vec{v}$ 로부터  $L_h$ 의 길이를 차지한다고 가정하면  $L_h = \gamma L$ ,  $0 < \gamma < 0.5$ 로 주어진다.  $\gamma$ 값은 적 미사일의 제원에 따라 달리 정할 수 있고, 요격 미사일이 적 미사일의 탄두의 중심을 타격하기 위해 보정해야 할 요격 미사일 탐색기와 탄두 사이의 각도  $\alpha$ 는 그림 1로부터 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{A}{2R\sqrt{B}}\right),$$

$$\begin{cases} A = 2R^2 - R(L - L_h)\cos\theta \\ B = R^2 + \left(\frac{L - L_h}{2}\right)^2 - R(L - L_h)\cos\theta \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $R$ 은 탐색기와 적 미사일과의 거리를 나타낸다.

즉, 탄두의 위치와 탐색기와 탄두 사이의 각도  $\alpha$ 를 추정하기 위해서는 표적의 실제 길이  $L$ 을 정확히 추정해야 한다. 표적의 실제 길이  $L$ 은 HRRPs로부터 추정되는  $L_r$ 을 이용해 식 (2)를 통해 계산하므로 표적의 레이더 신호로부터 RLOS에 투사된 길이  $L_r$ 의 정확도가 표적의  $L$ 의 정확도와 비례한다. HRRPs의 높은 피크들을 찾아 맨 처음 피크와 마지막 피크의 위치로부터  $L_r$ 을 계산할 수 있지만, 해상도가 낮아 표적의 피크를 찾는데 문제가 발생할 수 있으므로 이산 스펙트럼 예측 기법인 ESPRIT 기법을 이용해 산란점의 위치를 보다 정확하게 도출하였다.

그림 2는 5개의 산란점으로 이루어진 표적의 HRRP 및 산란점의 위치를 나타내고 있다. 레이더 수신 신호에 이산 스펙트럼 예측 기법인 ESPRIT 기법을 적용하면 산란점의 위치  $r_k$ 를 추출할 수 있다. 따라서 만약  $r_1$ 이 표적의 맨 뒷부분에 해당되는 산란점이고,  $r_5$ 가 표적의 맨 앞부분에 해당되는 산란점이라면 RLOS에 투사된 표적의 길이  $L_r$ 은  $r_5 - r_1$ 로 얻을 수 있다.

### 2-2 ESPRIT

본 연구에서 사용한 ESPRIT 기법은 다음과 같이 얻어진다.

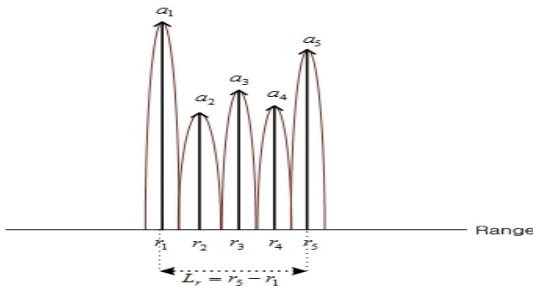


그림 2. 표적 산란점의 위치 추정  
Fig. 2. Position estimation of target scattering centers.

$$S_1 = [I_{m-1} \ 0]S \text{ and } S_2 = [0 \ I_{m-1}]S \quad (3)$$

여기서  $S$ 는  $m \times n$ 의 신호 행렬이고, 0은 영행렬,  $I_{m-1}$ 은  $(m-1) \times (m-1)$  항등 행렬이다. 위와 같다면,

$$S_2 = S_1 D, \quad D = \begin{bmatrix} e^{-j\omega_1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & e^{-j\omega_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S = AC, \quad C = PA^H S A^{-1} \quad (5)$$

식 (4)를 만족하는 회전 변환을 가능케 하는 유니타리 행렬(unitary matrix)  $D$ 가 존재한다. 식 (5)<sup>[2],[4]</sup>를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_2 = A_2 C = A_1 D C = S_1 C^{-1} D C = S_1 \phi \quad (6)$$

여기서  $\phi = C^{-1} D C$ 이며  $S_1$ 과  $S_2$ 가 완전 열 계수(full column rank)를 가지므로 유일한 해를 가지며,  $\phi$ 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = (S_1^H S_1)^{-1} S_1^H S_2 \quad (7)$$

ESPRIT을 통해 추정 주파수  $\{\omega_k\}_{k=1}^n$ 은 추정 행렬  $\phi$ 의 고유치(eigenvalue)의 편각(argument)의 음수 값으로 계산할 수 있다.

### III. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 본 연구에서 제안하는 알고리즘이 탄두 식별에 적합한지를 평가하는 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에서 사용한 적 미사일의 3-D CAD 모델은 그림 3과 같으며, 표적은 점산란원으로 모델링하였다. 그림 3의 표적을 이용하여 표 1과 그림 4와 같은 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다.

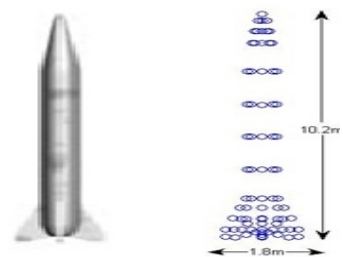


그림 3. 미사일 표적  
Fig. 3. Missile target.

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. Simulation condition.

중심 주파수	Ka band
대역폭	200 MHz
펄스폭	30 $\mu$ s
샘플링 주파수	500 MHz
PRF	2 kHz
표적의 속도	1,500 m/s
표적과 탐색기와의 상대적 위치	(10.0, 17.3 0.1) km (8.7, 1.0, 0.2) km
표적의 실제 길이	10.2 m
$\gamma$	0.2

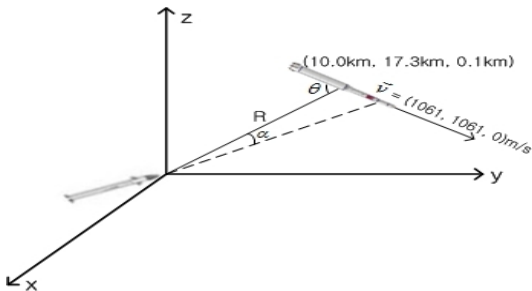


그림 4. 시뮬레이션 시나리오의 예  
Fig. 4. Example of simulation scenario.

위와 같은 조건에서 Chirp 신호를 사용하여 생성한 표적의 HRRPs에 ESPRIT을 이용하여 그림 5와 같은 결과를 얻고, 이에 식 (1)~(3)을 이용하여 표적의 길이와 표적과 탄두 사이의 각을 추정하면 표 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

위의 결과에서 볼 수 있듯이 거리 분해능(range resolution)이 1.5 m이고, 실제 표적의 길이가 10.2 m 이므로 시뮬레이션을 통해 표적의 길이를 비교적 정확히 추정할 수 있어 제시한 알고리즘이 미사일의 탄두 식별에 적합하다는 것을 판단할 수 있다.

본 논문에서는 표적 미사일의 HRRPs과 ESPRIT

표 2. 시뮬레이션 결과

Table 2. Simulation result.

변수	$L_r$ (m)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$L$ (m)	$\alpha$ ( $^\circ$ )
추정치 1	10.9	15.0	11.3	$3.35 \times 10^{-3}$
추정치 2	8.4	38.5	10.7	$1.75 \times 10^{-2}$

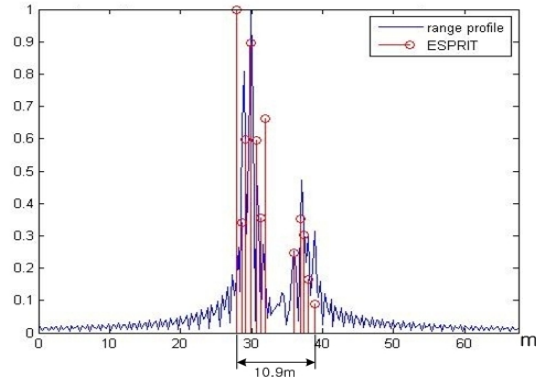


그림 5. ESPRIT을 이용한 표적의 산란점 위치 추정  
Fig. 5. Position estimation of target scattering centers using ESPRIT.

기법을 이용하여 피크를 찾아내고, 양 끝의 피크를 이용하여 표적의 길이를 추정하고 탐색기와 탄두 사이의 각도를 알아낼 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 ESPRIT 기법을 이용한 신호 처리 알고리즘이 미사일의 탄두 위치 식별에 적용하기에 적합함을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, 2001.
- [2] 김홍섭, 김기태, 전건욱, "탄도 미사일의 비행특성을 고려한 요격미사일 소요 알고리즘", 한국군사과학기술학회지, 14(6), pp. 1009-1017, 2011, 2011년 12월.
- [3] Petre Stoica, Randolph L. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, Prentice-Hall, 1997.
- [4] K-T. Kim, H-T. Kim, "One-dimensional scattering centre extraction for efficient radar target classification", *IEE Proc.-Radar, Sonar, Navigation*, vol. 146, no. 3, Jun. 1999.
- [5] D-K. Seo, "A study on the one-dimensional scattering center extraction algorithms for radar target identification", Department of Computer and Communications Engineering, POSTECH Graduate School of Information Technology.