

RELAX 기법을 이용한 미사일의 길이 추정 신호 처리 기법 연구

A Study on Signal Processing of the Length Estimation of Missile Target Using RELAX

조희진 · 최각규 · 한승구 · 김경태 · 송성찬*

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

요 약

본 논문에서는 미사일의 길이를 추정하는 신호 처리 기법의 개발에 관하여 소개한다. 표적의 길이를 추정하기 위해서는 미사일의 위치 및 표적과 레이더와의 각도 정보가 필요하다. 미사일의 위치 및 각도를 알아내기 위해서 chirp 파형을 사용했고, 레이더 영상 신호인 HRRP(High Resolution Range Profile)를 발생시키기 위해 stretch processing을 이용하였다. HRRP로부터 표적의 산란점(scattering center)을 찾기 위해 스펙트럼 추정 방법(spectral estimation technique)인 Relaxation(RELAX) 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘으로부터 얻은 1차원 산란점의 정보를 이용하여 미사일의 길이를 추정하였다.

Abstract

A signal processing technique is introduced in this paper in order to estimate the lengths of missile targets. To measure the length of a target, it is necessary to know the information on the target's location and aspect angle. Chirp waveforms and stretch processing are used to estimate the location and angle of a missile as well as HRRP(High Resolution Range Profile). RELAX(relaxation) algorithm, which is one of the spectral estimation techniques, were 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 length of a missile.

Key words : Target Discrimination, Missile Defense System, Target Recognition, RELAX

I. 서 론

북한은 경제적 어려움에도 불구하고 다양한 사거리의 미사일을 지속적으로 개발하고 있다. 미래 장에 있어 주된 위협 중의 하나인 전구 탄도 미사일(TBM: Theater Ballistic Missile)은 북한을 비롯한 제

3세계 국가들의 자체 개발 또는 도입에 의한 확산으로 지역 안보에 큰 위협이 되고 있다. 이러한 위협으로부터 대비하기 위해서는 현재 미국에서 사용 중인 패트리엇 시스템과 유사한 미사일 방어 시스템(missile defense system, MD system)이 구축되어야 한다^{[1],[2]}.

「이 연구는 (주)삼성 탈레스와 2012년도 두뇌 한국 21 사업에 의하여 지원되었음.」

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

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

· Manuscript received October 19, 2012 ; Revised January 24, 2013 ; Accepted January 29, 2013. (ID No. 20121019-01S)

· Corresponding Author : Kyung-Tae Kim (e-mail : kkt@postech.ac.kr)

미사일 방어 시스템을 구축하기 위해서 중요한 요소 중 한 가지는 단연 요격 미사일이라고 할 수 있다. 요격 미사일이 표적을 요격하기 위해서는 표적의 궤적, 고도별 속도 및 가속도 등의 정보가 필요하며, 이러한 정보들은 표적을 식별함으로써 알 수 있다.

본 논문에서 관련 논문을 참고하여 표적의 비행 궤적, 고도별 속도 및 가속도를 설정하여 표적의 이동 시나리오를 설정했다^[1].

일반적으로 레이더 수신 신호를 바탕으로 만들게 되는 HRRP(High Resolution Range Profile)는 정합 필터링(matched filtering)을 사용하여 만들어진다. 이 신호를 이산 신호로 만들기 위해 사용되는 스펙트럼 추정 기법(spectral estimation technique)을 사용할 때 주파수 영역에서 하게 된다. 하지만 주파수 영역에서 스펙트럼 추정 기법을 사용하면 해상도가 저하되는 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 정합 필터링 대신에 stretch processing을 적용한 후 시간 영역 스펙트럼 추정 기법을 사용하였다^[2].

스펙트럼을 추정하기 위해서 RELAX 알고리즘을 사용하였고, 이 알고리즘을 사용하여 얻은 이산 신호 거리측면도의 첫 번째 피크(peak)와 마지막 피크 사이의 거리를 계산하여 표적의 길이를 추정하였다. 미사일들의 길이가 다르므로 미사일의 정확한 길이를 추정한다면 이 길이 정보를 바탕으로 다양한 표적을 식별할 수 있다.

본 논문은 위의 기법을 이용하여 표적의 길이를 추정하는 알고리즘을 개발했으며, 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 표적의 길이를 추정하는 알고리즘과 RELAX 알고리즘에 대하여 소개한다. III장은 제안된 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과를 보여주며, IV장은 결론을 나타낸다.

II. 본 론

2-1 표적의 길이 추정 알고리즘

본 논문에서 제안한 표적의 길이 추정 알고리즘을 단계별로 나타내면 아래와 같다.

Step 1 : 각 표적의 3D CAD 모델에 따라 산란원 모델을 만들고, 미리 조사한 이동 궤적을 가지는 표적의 이동 시나리오에 따라 신호를 생성한다.

Step 2 : 거리측면도를 생성하고, 이에 RELAX 알고리즘을 적용하여 산란원을 추출한다.

Step 3 : 추출된 산란원들 중 양끝의 산란원을 이용하여 표적의 길이를 추정한다.

Step 4 : 추정된 길이 정보를 바탕으로 표적을 식별한다.

그림 1은 Step 1에서 모델링한 표적중 대포동 미사일의 3D CAD 모델을 나타낸 것이고, 그림 2와 그림 3은 각각 미사일 사거리별 고도 특성과 시간대별 속도 특성을 나타낸 것이다. 각각의 포물선은 사거리 300, 500, 1,000 km를 나타낸다^[1].

Step 1에서는 그림 1~3의 정보를 바탕으로 하여 표적의 산란원 모델과 이동 시나리오를 구현하였다. Step 2에서 거리측면도를 생성할 때 표적과 레이더와의 각도에 차이로 인해 실제 길이와 거리측면도로부터 얻은 길이가 달라진다. 그러므로 표적과 레이

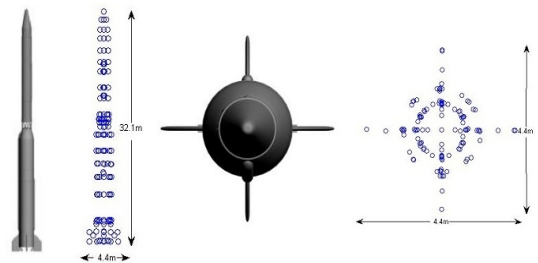


그림 1. 대포동 미사일의 3D CAD 모델
Fig. 1. 3D CAD model of Taepodong 2 missile.

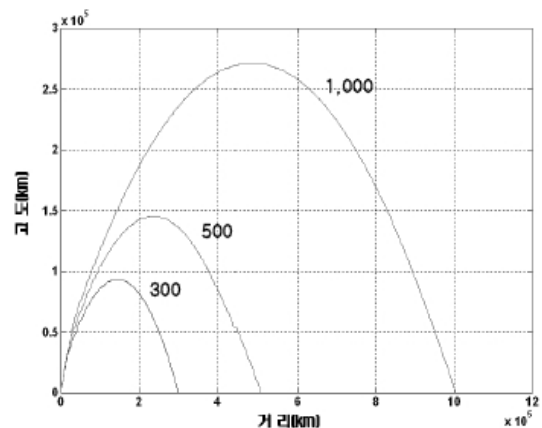


그림 2. 시간에 따른 미사일의 고도
Fig. 2. Altitudes of missiles with time.

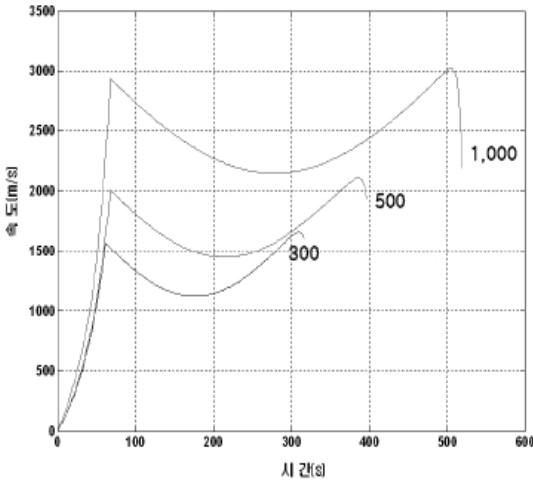


그림 3. 시간에 따른 미사일의 속도
Fig. 3. Velocity of missiles with time.

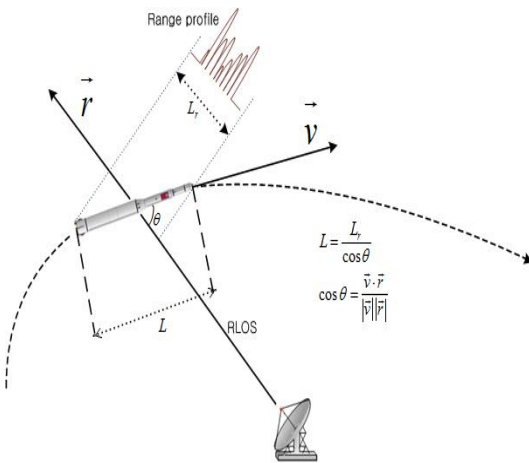


그림 4. 레이더와 표적의 각도 추정 개념도
Fig. 4. Concept of an angle between the radar and the target.

더의 각도를 계산해 이 각도만큼 길이를 보상해 주야 실제 길이를 추정할 수 있다.

그림 4에서 미사일이 속도 \vec{v} 로 이동하고 있고, 레이더의 가시선 방향(RLOS: Radar's Line of Sight)이 \vec{r} 일 때, 두 벡터 \vec{v} 와 \vec{r} 사이의 각도 θ 는 식 (1)과 같이 계산할 수 있고, 실제 길이 L 은 식 (1)로부터 구한 $\cos\theta$ 값을 이용하여 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다^[2].

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

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

표적으로부터 얻은 신호는 stretch processing을 통해 deramping된 신호가 되며, 이 신호에 RELAX 알고리즘을 적용함으로써 그림 5와 같은 이산 신호를 얻을 수 있다. 이 신호를 step 3 과정을 통해 첫 번째 피크와 제일 마지막 피크와의 길이를 계산하여 길이 L_r 을 계산할 수 있으며, 식 (1), (2)를 이용하여 실제 길이 L 을 구할 수 있다.

2-2 RELAX

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

원 신호 y 를 다음과 같이 정의한다.

$$y = \sum_{i=1}^K a_i w(f_i) \quad (3)$$

$$w(f_i) = [1 \ e^{j2\pi f_k} \ \dots \ e^{j2\pi(N-1)f_k}]^T \quad (4)$$

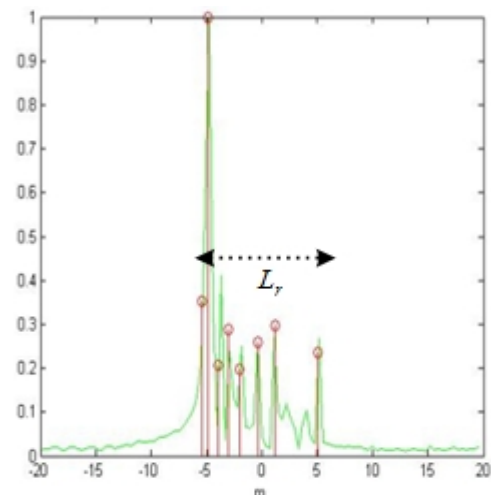


그림 5. 표적의 길이 추정
Fig. 5. Estimation of the target's length.

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.

$$C_3(f_1, a_1, \dots, f_K, a_K) = \left\| \mathbf{y} - \sum_{k=1}^K \mathbf{w}(f_k) a_k \right\|^2 \quad (5)$$

원 신호에서 한 개의 PSF를 뺀 \mathbf{y}_k 을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{y} - \sum_{i=1, i \neq k}^K \hat{a}_i \mathbf{w}(f_i) \quad (6)$$

나머지 계수들은 주어졌다고 가정하면 식 (5)의 비용함수를 최소화하는 계수들은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{a}_k = \frac{\mathbf{w}^H(f_k) \mathbf{y}_k}{N} \Big|_{f_k = \hat{f}_k} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{f}_k &= \arg \min_{f_k} \left\| \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{w}(f_k) \mathbf{w}^H(f_k)}{N} \right] \mathbf{y}_k \right\|^2 \\ &= \arg \max_{f_k} |\mathbf{w}^H(f_k) \mathbf{y}_k|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

위 식을 만족하는 \hat{f}_k 는 제로 패딩(zero padding) 후의 \mathbf{y}_k 를 FFT한 신호에서 최대 극값을 가진 극점의 위치로 쉽게 구할 수 있다. 계수들을 순차적으로 구하는 방법은 다음과 같다.

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

Step 2 : $K=2$ 로 놓는다. \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 식 (6)에 넣어 \mathbf{y}_2 를 계산하고, \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 얻는다. 이렇게 얻은 \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 다시 식 (6)에 넣어 \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 재계산한다.

Step 3 : $K=3$ 로 놓는다. 과정 2에서 얻은 $\{\hat{f}_i, \hat{a}_i\}_{i=1}^2$ 을 식 (6)에 넣어 \mathbf{y}_3 를 얻고 \hat{f}_3 과 \hat{a}_3 을 계산한다. 그 다음 $\{\hat{f}_i, \hat{a}_i\}_{i=2}^3$ 을 식 (6)에 넣어 \mathbf{y}_1 를 얻고 \hat{f}_1 과 \hat{a}_1 을 다시 계산한다. 그리고 $\{\hat{f}_i, \hat{a}_i\}_{i=1,3}$ 을 식 (6)에 넣어 \mathbf{y}_2 를 얻고 \hat{f}_2 과 \hat{a}_2 을 다시 계산한다.

이후 과정 : 위의 과정을 원하는 K 값이 될 때까지 혹은 아래에 설명한 특정 조건을 만족할 때까지 반복한다.

위 과정을 통해 산란원의 위치와 크기를 얻을 수 있다. 만약 전체 산란원의 개수 K 를 알고 있다면 K 개의 산란원의 위치와 크기를 얻어낸 후 RELAX 과정을 종료하면 된다. 그러나 실제 상황에서 산란원의 개수를 미리 아는 것은 불가능하다. 따라서 RELAX 기법을 종료할 조건을 정해 주어야 한다. RELAX 기법은 식 (6)에서 알 수 있듯이 각 과정에서 얻은 산란원의 계수로 만든 PSF를 계속 빼 나가는 구조를 가지고 있다. PSF들의 합은 원본 신호를 재현하는데 FFT나 노이즈의 영향으로 과정이 진행되면서 원본 신호와 조금씩 오차가 생기게 된다. 이러한 오차가 누적되거나 모든 산란원의 위치를 찾게 되면 RELAX 기법은 실제로 존재하지 않는 극값을 추정하게 된다. 이렇게 되면 식 (6)에서 PSF를 뺄 때 전체 파워가 오히려 상승하게 된다. 식 (6)에서 $\mathbf{y}_k = [y_{k1} \ y_{k2} \ y_{k3} \ \dots \ y_{kN}]$ 라 한다면 잔여 파워(Residual Power)는 아래와 같이 정의된다.

$$Residual\ Power = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N |y_{nk}|^2} \quad (9)$$

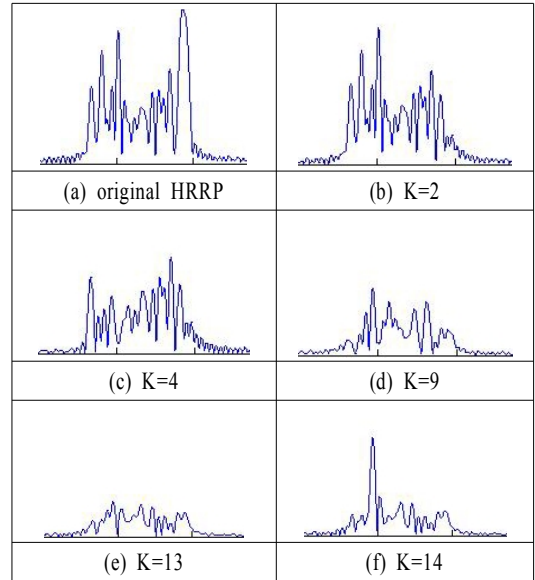


그림 6. RELAX 알고리즘의 종료조건
Fig. 6. The condition for the finish of RELAX algorithm.

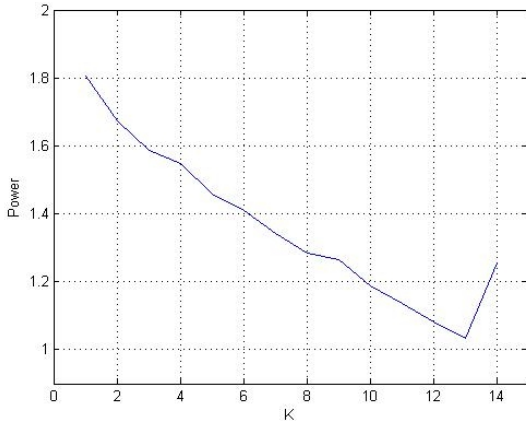


그림 7. 산란원 개수에 따른 신호의 residual power의 변화

Fig. 7. Residual power of HRRP with the number of scattering centers.

이러한 잔여 파워값은 산란점의 위치가 정확하다면 값이 작아지지만 실제 존재하지 않는 극값을 추정하게 되면 값이 커지게 된다. 이러한 경우, 더 이상의 산란원을 찾기는 불가능하므로 RELAX 기법을 종료한다. 그림 6에서 이러한 RELAX 과정과 종료 조건을 볼 수 있다. 그림 6(a)는 원본 HRRP이고, 그림 6(b)부터 6(e)까지 총 13개의 산란점을 찾아냈으며, 남은 신호의 파워가 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그림 6(f)를 보면 $K=14$ 일 때 가상의 산란원을 추정하였고, 신호의 파워가 오히려 늘어나게 된다. 그림 7은 산란원의 개수에 따른 신호의 파워가 13개의 산란원을 기점으로 증가하는 것을 보여준다. 시점에서 RELAX 과정은 멈추게 되고, 최종 산란원의 개수는 13개가 된다.

III. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 본 연구에서 제안한 알고리즘이 길이 식별에 적합한지를 평가하는 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에서는 그림 1과 같은 점 산란원으로 모델링한 3-D CAD 모델을 사용하였다. 시뮬레이션의 조건은 아래에 나타낸 표 1과 같고, 표 2는 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

그림 8은 미사일이 레이더의 가시선 방향으로 진행되는 경우의 거리측면도에 RELAX 알고리즘을 적용하여 얻은 산란원의 위치와 크기를 보여준다. 그

표 1. 시뮬레이션 조건

Table 1. Simulation condition.

중심 주파수	Ka band
대역폭	200 MHz
펄스폭	30 μ s
샘플링 주파수	500 MHz
PRF	2 kHz

표 2. 시뮬레이션 결과

Table 2. Simulation result.

표 적	실제 길이	추정 길이
Scud	10.2 m	9.8 m
Sahab 3	16 m	15 m
Taepodong 2	32.1 m	31 m

표 3. 관찰각에 따른 표적의 길이 추정

Table 3. Length estimation of target with observation angle.

표 적	관찰각도 영역	
	0~70°	0~80°
Scud	9.9 m	9.7 m
Sahab 3	16 m	15 m
Taepodong 2	32 m	30.2 m

림 8에서 가장 왼쪽의 산란원 위치와 가장 오른쪽의 산란원 위치를 확인하면 미사일의 길이가 약 31 m임을 알 수 있다. 위의 표 2는 II장에서 소개한 방법으로 100회 시행한 결과의 평균값이다. 표 2에 나타난 시뮬레이션 결과를 참고하면 3가지 표적을 시뮬레이션하여 얻은 추정 길이와 실제 길이가 거의 일치함을 알 수 있고, 이 결과로부터 제안한 알고리즘을 이용함으로써 미사일의 길이를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

관찰각이 90° 부근이 되면 표적의 길이 추정을 할 수 없기 때문에 표 3에서 관찰각이 90° 부근을 제외한 나머지 부분에서의 추정 길이를 나타내었다. 표 3을 보면 알 수 있듯이 관찰각이 0~70°인 경우가 0~80°인 경우보다 표적의 길이 추정 정확도가 더 높다. 표 3으로부터 관찰각이 90°에 가까워질수록 표적의 길이 추정 정확도가 낮아짐을 알 수 있다.

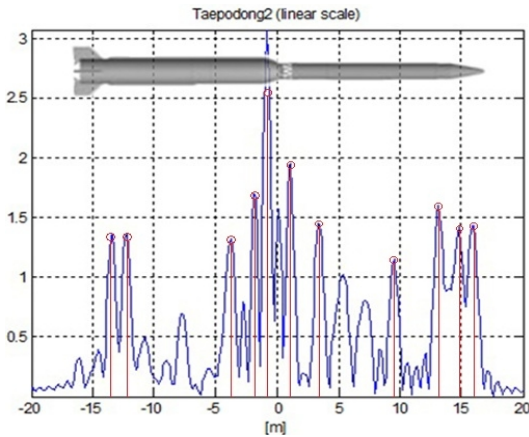


그림 8. RELAX를 이용한 대포동 2의 산란점 위치 추정

Fig. 8. Position estimation of a Taepodong 2 scattering centers using RELAX.

IV. 결 론

본 논문에서는 미사일의 HRRPs에 RELAX 기법을 이용하여 피크를 찾아내고, 양 끝의 피크를 이용하여 표적의 길이를 추정하였다. 시뮬레이션 결과로부터 제안한 알고리즘이 미사일의 길이 추정에 적합하다는 것을 알 수 있다. 추후 연구를 통해 시뮬레이션 결과로부터 얻은 표적의 길이 정보를 이용하여 길이

가 다른 표적들을 식별할 수 있을 것으로 예상된다. 그리고 관찰각이 90° 부근에서는 길이 식별 정확도가 떨어지는 문제점을 보완하기 위한 추후 연구 또한 필요할 것이라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] 권용수, 김정희, 이경행, "성공적 하층 미사일 방어 수행을 위한 시스템 요구능력 도출", 한국국방경영분석학회지, 37(2), pp. 11-24, 2011년 6월 30일.
- [2] 최각규, 한승규, 조희진, 김효태, 김경태, 송성찬, 나영진, "밀리미터파 탐색기에서 ESPRIT 기법을 이용한 탄도 미사일 탄두 식별 신호 처리 기법 개발", 한국전자과학회논문지, 23(2), pp. 266-269, 2012년 2월.
- [3] Jina Li, Petre Stoica, "Efficient mixed-spectrum estimation with applications to target feature extraction", *IEEE Trans. Singal Processing*, vol. 44, no. 2, Feb. 1996.
- [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.

조 희 진



동 표적 인식

2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2013년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)
 2013년 3월~현재: 국방기술품질원 대구1팀 연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리, 자

최 각 규



[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석

2006년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)
 2012년 8월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학박사)
 2012년 9월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 미래정보기술사업단 박사후 연구원

한 승 구



2007년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 3월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 통합 박사과정
[주 관심분야]레이더 영상, 레이더 신호 처리, 자동 표적 인식, 시간-주파수 분석

송 성 찬



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2002년 11월~현재: 삼성탈레스(주) ISR·PGM 연구소 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 및 송수신기 설계, 전자파 수치해석

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수
2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~현재: 방위사업청/국방과학연구소 지정 레이더/IR 표적식별특화연구실 실장
[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호 처리, 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정