

레이다 표적 인식에서 표적에 대한 2차원 산란점 추출 및 ISAR 영상 형성에 대한 성능 개선

Performance Improvement for 2-D Scattering Center Extraction and ISAR Image Formation for a Target in Radar Target Recognition

신 승 용 · 임 호 · 명 로 훈

Seung Yong Shin · Ho Lim · Noh Hoon Myung

요 약

본 논문에서는 표적에 의해서 산란된 산란파에 대한 2차원 산란점 추출 및 2차원 ISAR(Inverse SAR) 영상 형성에 대해서 기술하였다. 표적에 대한 2차원 산란점과 ISAR 영상을 획득하는 방법에는 일반적으로 2-D IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)가 널리 사용되고 있다. 그러나 이는 영상의 해상도 면에서 질이 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 푸리에 변환을 바탕으로 한 방법의 단점을 보완하기 위해서 여러 가지 고해상도 신호처리의 방법이 개발되어 왔다. 본 논문에서는 2차원 산란점 추출 및 ISAR 영상을 형성하기 위해서 2-D MEMP 알고리즘과 2-D ESPRIT 알고리즘에 대해서 기술하고 있다. 이러한 각 알고리즘에 대한 성능을 나타내기 위해서 이상적인 점 산란체와 F-18 전투기에 대한 산란파를 이용하여 2차원 산란점을 예측하고 2차원 ISAR 영상을 획득하였다.

Abstract

This paper presents techniques of 2-D scattering center extraction and 2-D ISAR(Inverse SAR) image formation for scattering wave which is scattered by a target. In general, 2-D IFFT is widely used to obtain 2-D scattering center and ISAR image of targets. But, this method has drawbacks, that is poor in a resolution aspect. To overcome these shortcomings with the FT(Fourier Transform)-based method, various techniques of high resolution signal processing were developed. In this paper, algorithms of 2-D scattering center extraction and ISAR image formation such as 2-D MEMP(Matrix Enhancement and Matrix Pencil), 2-D ESPRIT(Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques) are described. In order to show the performances of each algorithm, we use scattering wave of the ideal point scatterers and F-18 aircraft to estimate 2-D scattering center and obtain 2-D ISAR image.

Key words : Scattering Center Extraction, ISAR Image, MEMP, ESPRIT, MSSP

I. 서 론

현대전에 있어서 레이더를 이용하여 미지의 표적을 정확하고 빠르게 인식 및 구별하는 것은 매우 중요한 요소로 인식되고 있다. 탐지된 미지의 표적에

의해서 산란된 신호를 분석하여 표적의 종류를 알아내는 것이 표적 인식의 목적이며, 이는 표적의 위치와 속도뿐 아니라 표적이 무엇인지 정확하게 판단을 할 수 있도록 해야 한다. 미지의 표적을 인식하고 구별하는 방법으로는 크게 산란점 추출을 이용하는 방

「이 연구는 KAIST RDRC(전파탐지 특화연구센터)와 삼성 탈레스의 협약(MOU)을 통한 삼성탈레스의 연구비 지원으로 연구되었음.」
한국과학기술원 전자전산학과(Department of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST)

· 논문 번호 : 20070518-19S

· 수정완료일자 : 2007년 7월 27일

법과 ISAR 영상을 이용하는 방법이 있다. 표적에 대한 2차원 산란점과 ISAR 영상은 표적을 이루는 산란점의 위치와 크기의 정보를 제공하기 때문에 오래 전부터 표적 인식 단계에 널리 이용되고 있다. 표적에 대한 산란점과 ISAR 영상은 일반적으로 레이다에 대한 산란 신호를 모델링하거나 표적을 인식하는데 널리 사용되고 있다. 특히, 2차원 산란점은 표적을 이루고 있는 산란점의 위치와 크기를 정확하게 예측할 수 있다는 장점이 있기에 자동 표적 인식(ATR: Automatic Target Recognition)을 하는데 있어서 유용한 정보를 제공하고 있다. 일반적으로 표적을 인식하는데 있어서 1차원 산란점이 많이 이용된다. 그러나 표적 인식을 하는데 있어서 1차원 산란점을 이용하면, 이는 표적의 down-range 방향의 정보만을 제공하기 때문에 표적에 대한 레이다의 관측 각도에 따라서 영향을 많이 받는다. 그러나 2차원 산란점을 이용하여 표적을 구분하면 표적의 down-range 방향과 cross-range 방향의 정보가 모두 존재하기 때문에 관측 각도에 대한 의존도가 많이 줄어들게 된다. 따라서 표적을 인식하는데 2차원 산란점을 이용하면 표적을 인식하고 구분할 때 성능이 개선된다.

레이다의 산란파를 이용하여 표적에 대한 2차원 산란점 및 ISAR 영상을 획득하는 방법에는 가장 널리 사용되고 있는 방법이 2-D IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 이용한 방법이다. 2-D IFFT의 방법은 주파수 영역과 시간 영역의 관계가 명확하게 구분되어 있으며, 구현이 간단하고 계산 시간이 매우 빠르다는 장점을 가지고 있는 반면에 영상의 해상도 면에서 질이 많이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 영상의 해상도를 높이기 위해서는 레이다의 주파수 대역폭이 커야 하고 관찰 각도가 넓어야 한다는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위해서 지금까지 여러 가지 고해상도 신호 처리의 방법들이 개발이 되어왔다. 표적의 2차원 산란점을 추출하기 위한 고해상도 신호 처리의 방법 중에서 대표적인 것이 2-D MEMP, 2-D ESPRIT의 방법이 있다.

본 논문에서는 2차원 산란점 추출 및 ISAR 영상을 획득하기에 앞서 2차원 레이다 산란파에 대한 수학적 모델을 제시하고, 제시한 고해상도 신호처리 알고리즘을 구현하도록 한다. 그리고 구현한 2차원

산란점 추출 알고리즘의 성능을 나타내기 위해서 이상적인 점 산란체에 대한 산란파를 생성하여 이에 대한 결과를 나타내었으며, 또한 실제의 전투기와 비슷한 크기를 가진 표적 F-18 전투기에 대한 산란파를 획득하여 2차원 산란점 및 ISAR 영상을 예측한 결과를 나타내었다.

II. 본 론

2-1 표적의 2차원 레이다 산란파에 대한 수학적 모델

레이다 시스템의 관점에서 볼 때, 표적은 일반적으로 표적에 상응하는 산란점의 공간적인 분포로써 표현이 가능하다. 또한, 측정 레이다의 주파수를 고주파로 제한한다면, 표적에 대한 산란파는 그림 1에서 보는 것과 같이 여러 유한개의 산란점들에 의해 산란된 전자파의 합으로 나타낼 수 있다^[1]. R. T. Compton은 2차원 산란점에서 산란되는 신호의 크기가 주파수에 따라서 다르게 나타나게 되더라도 이러한 변수는 2차원 산란점 형성에는 거의 영향을 미치지 못한다고 보았다. 즉, 측정 레이다의 주파수를 고주파로 제한하던, 주파수의 대역폭이 좁고 관측 각도가 작을 때에는 표적의 각 산란점은 비분산적인 특징을 가진다^[2]. 이러한 사실을 바탕으로 주파수 영역에서 N_1 개로 샘플링하여 $f_m(m=1, 2, \dots, N_1)$ 을 얻고 관측 각도 영역에서 N_2 개로 샘플링하여 $\theta_n(n=1, 2, \dots, N_2)$ 을 얻어서 산란파를 표현하면 식 (1)으로 나타낼 수 있다^[10].

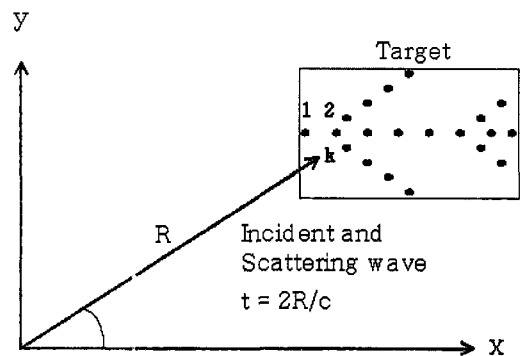


그림 1. 표적에 대한 2차원 산란점 모델
Fig. 1. The model of 2-D scattering center for a target.

$$x(m, n) = \sum_{k=1}^K s_k e^{-\frac{j2\pi f_m}{c} (x_k \cos \theta_k + y_k \sin \theta_k)} + u(m, n) \quad (1)$$

여기서 $u(m, n)$ 은 잡음에 의한 성분으로 분산과 평균이 0(zero)인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이다. 위의 식 (1)에서 얻은 데이터에서 내삽(interpolation) 과정을 적용한 다음 f_x 방향으로 M 개, f_y 방향으로 N 개의 데이터를 얻으면 최종적으로 식 (1)의 주파수-각도 영역(frequency-angular domain)의 데이터가 다음의 식 (2)와 같이 직교 좌표(Cartesian coordinate)의 영역의 데이터로 표현이 된다.

$$x(m, n) = \sum_{k=1}^K s_k e^{-j2\pi(f_x x_k + f_y y_k)} + u(m, n) \quad (2)$$

위의 식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = Ax + u \quad (3)$$

여기서 벡터 x, A, s, u 는 열벡터로서 다음과 같이 나타낸다.

$$x = [x_{11}, x_{21}, \dots, x_{M1}, x_{12}, \dots, x_{MN}]^T$$

$$A = [a(x_1, y_1), a(x_2, y_2), \dots, a(x_K, y_K)]^T$$

$$s = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T$$

$$u = [u_{11}, u_{21}, \dots, u_{M1}, u_{12}, \dots, u_{MN}]^T \quad (4)$$

여기서 T 는 행렬의 전치(transpose)를 나타내며, A 는 $MN \times K$ 행렬로써 주어진다. 그리고 $a(x_k, y_k)$ 는 각 신호에 대한 모드 벡터(mode vector) 또는 방향 벡터(direction vector)라고 한다.

2-2 2-D MEMP 알고리즘

Matrix Pencil(MP) 방법은 오래전부터 사용되고 있는 Pencil-Of-Function(POF)의 접근 방법을 기초하고 있으며, 신호 처리 분야에서 새로운 알고리즘으로 알려져 있다. 여기서 "Pencil"은 1960년도에 Felix R. Gantmacher에 의해서 처음으로 사용되었다^[3]. POF의 접근 방법과 MP 알고리즘은 같은 원리에서 시작하지만 MP 방법이 POF의 방법보다 계산 면에서 더욱 효율적이다. 또한 MP 알고리즘은 Generalized Pen-

cil-Of-Function(GPOF)의 접근 방법으로 알려져 있다.

MP 알고리즘을 이용하여 표적의 산란점을 추출하기 위해서는 산란파에 대한 Hankel 행렬을 만들고 이에 대한 matrix pencil pair를 구하여, 여기에 특이값 분해를 적용함으로써 신호에 대한 극점을 예측하여 산란점을 추출하는 방법이다^{[4],[5]}.

2-D MEMP 방법은 1차원 ESPRIT 방법을 2차원으로 확대하여 신호에 대한 극점을 구하는 방법이다. 2-D MEMP 알고리즘을 적용하여 2차원 산란점을 추출하기 위해서는 먼저 주어진 2차원 레이다 산란파에 대한 강화 행렬(enhanced matrix)을 다음의 식 (5)와 같이 만들어야 한다^[5].

$$X_{em} = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & \dots & X_{M-P} \\ X_1 & X_2 & \dots & X_{M-P+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{P-1} & X_P & \dots & X_{M-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 X_{em} 은 $P \times (M - P + 1)$ 크기의 Hankel block 행렬을 나타내며, 위의 강화 행렬의 각 원소에 해당하는 행렬 X_m 또한 Hankel 행렬을 나타내며 다음의 식과 같이 나타낸다.

$$X_m = \begin{bmatrix} x(m, 0), x(m, 1) \dots x(m, N - Q) \\ x(m, 1), x(m, 2) \dots x(m, N - Q + 1) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ x(m, Q - 1), x(m, Q) \dots x(m, N - 1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

다음으로 강화 행렬에 대해서 특이값 분해(singular value decomposition)를 적용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$SVD[X_{em}] = U \Sigma V^H = U_s \Sigma_s V_s^H + U_n \Sigma_n V_n^H \quad (7)$$

여기서 U, V 는 특이 벡터 행렬이고, Σ 는 특이값들의 행렬로써 다음과 같이 나타낸다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \sigma_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 특이값들은 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_R \geq 0$ 의 관계를 가지고 있다. 이때 산란점의 개수를 L 개로 가정하면 U , Σ , 및 V 는 신호 공간에 관련된 L 개의 principal 성분을 나타내고, U_n , Σ_n 및 V_n 은 잡음 공간에 관련된 non-principal 성분을 나타낸다.

표적의 down-range 성분에서의 극점을 추출하기 위해서는 레이다 산란파에 대한 강화 행렬 X_{em} 의 특이 벡터 행렬 U 의 첫 번째 열부터 $(P-1) \times M$ 번째 열까지 행렬을 U_{s1} 이라 하고, $(M+1)$ 번째 열부터 $(P \times M)$ 번째 열까지의 행렬을 U_{s2} 하여, matrix pencil pair 형태로 분리하여 나타내야 한다. 그리고 구한 U_{s1} 과 U_{s2} 을 이용하여 다음의 식 (9)와 같은 행렬로서 재구성한다.

$$F_1 = U_{s1}^+ U_{s2} \quad (9)$$

여기서 +는 Pseudo-inverse를 의미한다. 또한 cross-range 성분에서의 극점을 추출하기 위해서는 먼저 순열 행렬(permutation matrix)을 정의해야 하며, 이는 아래의 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$P = [\begin{matrix} e(1) & e(1+M) & \dots & e(1+(k-1)M) \\ e(2) & e(2+M) & \dots & e(2+(k-1)M) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e(M) & e(M+M) & \dots & e(M+(k-1)M) \end{matrix}]^T \quad (10)$$

여기서 $e(i)$ 는 i 번째 위치에서만 1을 가지고 나머지 원소는 영(zero)이 되는 $1 \times KM$ 크기의 벡터이다. 순열 행렬을 구하고 난 다음, 순열 행렬과 강화 행렬 X_{em} 의 특이 벡터 행렬 U 의 조합으로 이루어진 행렬 $U_{sp} = PU$ 을 구해야 한다. 그리고 앞에서 구한 것과 같이 행렬 U_{sp} 의 첫 번째 열부터 $(P-1) \times M$ 번째 열까지 행렬을 U_{sp1} , $(M+1)$ 부터 $(P \times M)$ 번째 열까지 행렬을 U_{sp2} 로 하여 matrix pencil pair 형태인 U_{sp1} 과 U_{sp2} 로 분리하여 구한다. 구한 U_{sp1} 과 U_{sp2} 을 이용하여 다음의 식 (11)과 같은 행렬로서 재구성한다.

$$F_2 = U_{sp1}^+ U_{sp2} \quad (11)$$

F_1 과 F_2 을 구하고 나면, 두 행렬을 대각 행렬로 변형하기 위해서 두 행렬의 선형 결합으로 이루어진 행렬을 구하고, 여기에 고유치 분해를 하여, 다

음과 같이 변환 행렬 T 를 구한다⁷⁾.

$$\beta F_1 + (1-\beta) F_2 = T^{-1} D T \quad (12)$$

또한 F_1 과 F_2 를 고유치 분해하여 각 행렬에 해당하는 고유 벡터를 구한다.

$$\begin{aligned} F_1 &= E_1 \Lambda_1 E_1^H \\ F_2 &= E_2 \Lambda_2 E_2^H \end{aligned} \quad (13)$$

이렇게 변환 행렬 T 와 F_1 과 F_2 의 고유 벡터 E_1 과 E_2 가 구해지고 나면 다음과 같은 형태의 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} P_1 = T^{-1} E_1 \\ P_2 = T^{-1} E_2 \end{cases} \quad (14)$$

위에서 구한 P_1 , P_2 행렬의 각 열의 성분에서 값을 가지는 위치를 p_1 , p_2 라 한다. 주어진 p_1 과 p_2 의 위치에서 앞에서 구한 F_1 과 F_2 의 고유치를 구함으로써 신호의 극점을 구할 수 있으면, 이를 이용하여 각 산란점을 위치를 얻을 수 있다. 또한, 산란 강도는 최소 자승법(least square method)을 적용하여 간단하게 구할 수 있다.

2-3 2-D ESPRIT 알고리즘

ESPRIT 알고리즘은 Paulraj와 Roy 그리고 Kailath에 의해서 처음으로 제안되었으며, 주어진 데이터의 샘플로부터 생성된 두 개의 행렬에 의해 확장된 신호의 부공간이 회전성에 따른 불변성(shift-invariance)을 가진다는 사실을 바탕으로 개발된 방법이다. 2차원 ESPRIT 알고리즘을 구현하기 위해서는 주어진 2차원 산란파에 대한 강화 행렬을 다음의 식과 같이 만들어야 한다⁸⁾.

$$X_{em} = \begin{bmatrix} X_0 & X_1 & \dots & X_{M-P} \\ X_1 & X_2 & \dots & X_{M-P+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{P-1} & X_P & \dots & X_{M-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 X_{em} 은 $P \times (M-P+1)$ 크기의 Hankel block 행렬을 나타내며, 강화 행렬의 각 원소에 해당

하는 행렬 X_m 또한 Hankel 행렬을 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$X_m = \begin{bmatrix} x(m,0), x(m,1) \cdots x(m, N-Q) \\ x(m,1), x(m,2) \cdots x(m, N-Q+1) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ x(m, Q-1), x(m, Q) \cdots x(m, N-1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

위에서 구한 강화 행렬에 대해서 특이값 분해를 적용하여 다음의 식 (17)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} SVD[X_{em}] &= U \Sigma V^H \\ &= U_s \Sigma_s V_s^H + U_n \Sigma_n V_n^H \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 U , V 는 특이 벡터 행렬이고, Σ 는 특이값의 행렬로써 다음의 식 (18)으로 주어진다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sigma_R \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 특이값들은 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_R \geq 0$ 의 관계를 가지고 있다. 이때 산란점의 개수를 L 개로 가정하면 U_s , Σ_s 및 V_s 는 신호 공간에 관련된 L 개의 principal 성분이고 U_n , Σ_n 및 V_n 은 잡음 공간에 관련된 non-principal 성분을 나타낸다. 표적의 down-range 성분에서의 극점을 추출하기 위해서는 U 행렬의 첫 번째 열부터 $(P-1) \times M$ 번째 열까지의 행렬을 U_{s1} 이라 하고, $(M+1)$ 번째 열부터 $(P \times M)$ 번째 열까지의 행렬을 U_{s2} 으로 분리한다. 따라서 앞에서 구한 U_{s1} 과 U_{s2} 를 이용하여 다음과 같은 행렬로써 재구성한다.

$$F_1 = U_{s1}^+ U_{s2} \quad (19)$$

여기서 +는 Pseudo-inverse를 의미한다. 또한, 표적의 cross-range 성분에서의 극점을 추출하기 위해서는 순열 행렬(permutation matrix)을 구해야 하며, 이는 앞에서 나타난 식 (10)과 같이 주어진다. 순열 행렬을 구하고 난 다음에는 순열 행렬과 Hankel block 형태의 행렬 X_{em} 의 특이 벡터 행렬 U 의 조합으로 이

루어진 행렬 $U_{sp} = PU$ 을 구해야 한다. 다음으로 앞에서 구한 것과 같이 행렬 U_{sp} 의 첫 번째 열부터 $(P-1) \times M$ 번째 열까지 행렬을 U_{sp1} 이라 하고, $(M+1)$ 부터 $(P \times M)$ 번째 열까지 행렬을 U_{sp2} 로 하여 matrix pencil pair 형태인 U_{sp1} 와 U_{sp2} 로 분리하여 구한다. 구한 U_{sp1} 과 U_{sp2} 를 이용하여 다음의 식 (20)과 같은 행렬로써 재구성한다.

$$F_2 = U_{sp1}^+ U_{sp2} \quad (20)$$

따라서 재구성한 F_1 과 F_2 를 구하고 나면 두 행렬을 대각 행렬로 변형하기 위해서 두 행렬의 선형 결합으로 이루어진 행렬을 구하고 나서, 여기에 고유치 분해를 하여 다음과 같이 변환 행렬 T 를 구한다.

$$\beta F_1 + (1-\beta) F_2 = T^{-1} D T \quad (21)$$

그리고 다음의 식 (21)에서 나타난 것과 같이 F_1 , F_2 과 변환 행렬 T 의 결합으로 이루어진 행렬 Φ_1 , Φ_2 행렬을 구한다^[8].

$$\begin{cases} \Phi_1 = T F_1 T^{-1} \\ \Phi_2 = T F_2 T^{-1} \end{cases} \quad (22)$$

위에서 구한 Φ_1 , Φ_2 행렬의 주 대각 성분으로부터 각 신호에 대한 극점을 구할 수 있다. 이렇게 구한 극점을 이용하여 각 산란점의 위치와 산란 강도를 구할 수 있다.

2-4 MSSP(Modified Spatial Smoothing Preprocessing) 기법

본 논문에서는 표적의 2차원 산란점 및 ISAR 영상의 성능을 개선하기 위해서 2차원 산란 데이터에 MSSP 기법을 적용하였다. MSSP 기법은 SSP(Spatial Smoothing Preprocessing)의 성능을 개선한 방법으로 신호 성분들 사이에서의 coherence를 제거하는 효과를 가지고 있다. MSSP의 방법은 다음의 식 (23)로 나타낼 수 있다^[10]

$$R = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K (R_k + J R_k^* J) \quad (23)$$

여기서 R_k 는 $R_k = x_k x_k^H$ 으로 주어지며, H 는 com-

plex conjugate transpose를 의미한다. 또한 *는 complex conjugate를 나타내고, J 는 교환 행렬(exchange matrix)을 나타내며 다음의 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & & \vdots & \\ 1 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

따라서 이러한 MSSP 기법을 2차원 산란점을 추출하는 알고리즘에 다음과 같은 방법으로 적용하여 성능을 개선하였다.

$$X_{mem} = X_{em} + JX_{em}^*J \quad (25)$$

또한, 제안한 알고리즘을 연산하는데 있어서 계산 시간을 줄이기 위해서는 본 논문에서는 특이값 분해를 사용하는 대신에 고유치 분해(eigenvalue decomposition)를 이용하여 계산 시간을 줄였다. 일반적으로 표적의 산란점을 추출하기 위해서는 X_{em} 에 특이값 분해를 적용하여 특이 값과 특이 벡터 행렬을 구해야 하는데, 본 논문에서는 계산 시간을 줄이기 위해서 X_{em} 에 특이 값 분해를 적용하기 보다는 고유치 분해를 적용하였다. 이는 행렬 A 가 $A = US_{\Delta}H$ 으로 분해가 될 때, 특이 벡터 행렬 U 의 역은 AA^H 의 정규 직교의 고유 벡터로 구성이 된다. 따라서 AA^H 을 구하고 여기에 고유치 분해를 적용하여 고유 벡터를 구하면 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 H 는 complex conjugate transpose를 의미한다.

2-5 2-D ISAR 영상

표적에 대한 2차원 산란파에 대한 강화 행렬이 주어지면, 이에 특이값 분해를 적용하여 신호에 대한 특이 벡터 행렬과 잡음에 대한 특이 벡터 행렬을 구한다. 표적의 ISAR 영상을 얻기 위해서는 신호에 대한 특이 벡터 행렬 U_s 가 필요한 것이 아니라 잡음에 대한 특이 벡터 행렬 U_n 이 필요하다. 그러므로 잡음에 대한 특이 벡터 행렬 U_n 이 주어지면 2차원 ISAR 영상은 다음의 공간 스펙트럼 예측기를 이용하여 얻을 수 있다^{[9],[10]}.

$$P = \frac{a(x, y)^H a(x, y)}{a(x, y)^H U_n U_n^H a(x, y)} \quad (26)$$

여기서 $a(x, y)$ 는 각 신호에 대한 방향 벡터(direction vector)를 나타낸다.

III. 시험 결과

3-1 점 산란체에 의한 2차원 산란점 추출

제안한 2차원 산란점 추출 알고리즘의 성능을 평가하는데 있어서 일반적으로 이상적인 점 산란체(ideal point scatterers)로 구성된 표적의 산란 데이터는 주요한 지표가 된다. 따라서 본 논문에서는 그림 2에서 보여주는 것과 같이 산란점의 개수를 8개로 하여 이상적인 점 산란체의 표적을 구성하였다.

본 논문에서 나타낸 2차원 산란점 추출 알고리즘인 2-D MEMP와 2-D ESPRIT의 성능의 개선을 보여 주고 평가하기 위해서 사용한 파라미터는 다음과 같다. 주파수 영역에서 산란파를 얻기 위해 사용한 주파수는 9.25~9.75 GHz로 주파수의 대역폭을 500.0 MHz로 하였으며, 주파수의 개수를 60개로 샘플링을 하여 주파수의 간격을 8.475 MHz로 하였다. 또한, 관측 각도를 $-2.5^\circ \sim +2.5^\circ$ 로 각도의 간격을 0.085° 로 하였으며, 각도에 대한 샘플링 개수를 60개로 시험을 하였다. 그리고 표 1은 표적을 이루는 점 산란체의 위치와 크기를 나타내고 있다.

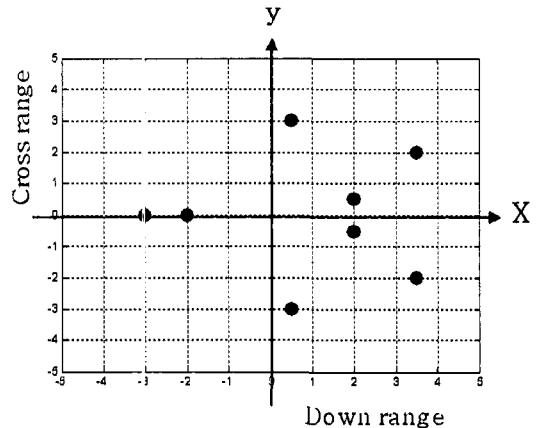


그림 2. 2차원 산란점 추출을 위한 점 산란체
Fig. 2. The point scatterers for 2-D scattering center extraction.

표 1. 2차원 산란점 추출을 위한 점 산란체의 위치와 크기

Table 1. Location and amplitude of point scatterers for 2-D scattering center extraction.

Number	Location [m]	Amplitude
1	(-3.0, 0.0)	1.0
2	(-2.0, 0.0)	1.0
3	(0.5, -3.0)	1.0
4	(0.5, 3.0)	1.0
5	(2.0, -0.5)	1.0
6	(2.0, 0.5)	1.0
7	(3.5, -2.0)	1.0
8	(3.5, 2.0)	1.0

본 논문에서 얻어낸 2차원 산란점 추출의 결과물은 주파수-각도 영역의 산란 데이터를 직교 좌표의 영역으로 내삽(interpolation) 과정을 수행하여 성능

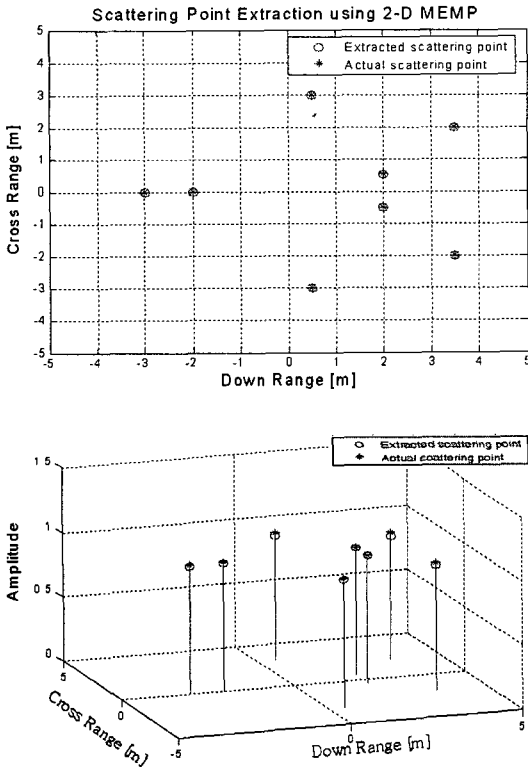


그림 3. 2-D MEMP 기법을 이용한 2차원 산란점 예측(noise-free)

Fig. 3. Estimation of 2-D scattering center using 2-D MEMP(noise-free).

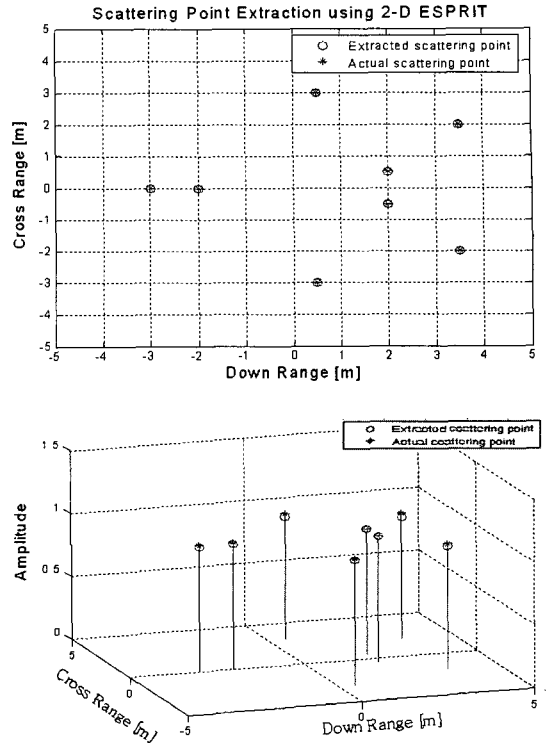


그림 4. 2-D ESPRIT 기법을 이용한 2차원 산란점 예측(noise-free)

Fig. 4. Estimation of 2-D scattering center using 2-D ESPRIT(noise-free).

을 개선한 결과들이다. 그림 3과 그림 4는 각각 2-D MEMP 알고리즘과 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 레이다 산란파에 대한 2차원 산란점을 예측할 결과이다. 여기서 레이다 산란파를 획득함에 있어서 잡음(noise)이 전혀 섞이지 않은 상태에 대한 결과이다. 그림에 대한 결과를 확인해 보면 잡음이 전혀 섞이지 않은 상태에서는 2-D MEMP 알고리즘과 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 산란점을 추출하면 산란점의 위치와 산란 강도를 정확하게 추출해 낼 수 있다. 그림 5와 그림 6은 레이다 산란파를 획득함에 있어서 신호 대 잡음비(SNR)가 0 dB가 되도록 잡음을 첨가하여, 제한한 2-D MEMP 알고리즘과 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 산란파에 대한 2차원 산란점을 예측한 결과이다. 이에 대한 결과를 확인해 보면 신호대 잡음비가 0 dB인 상태에서는 산란점의 위치를 정확하게 추출해 낼 수 있으며, 또한 산란 강도도 거의 정확한 값으로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 5와 6은 2차원 산란점을 예측

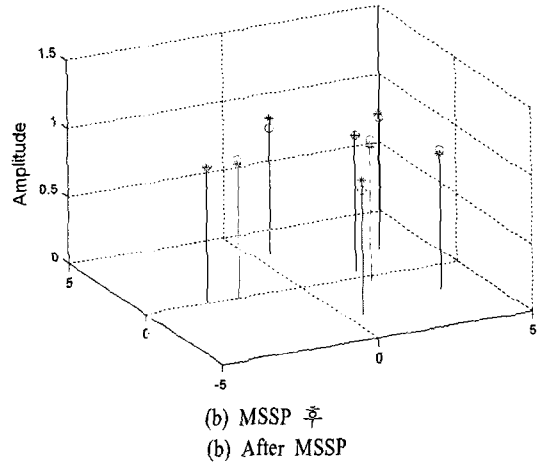
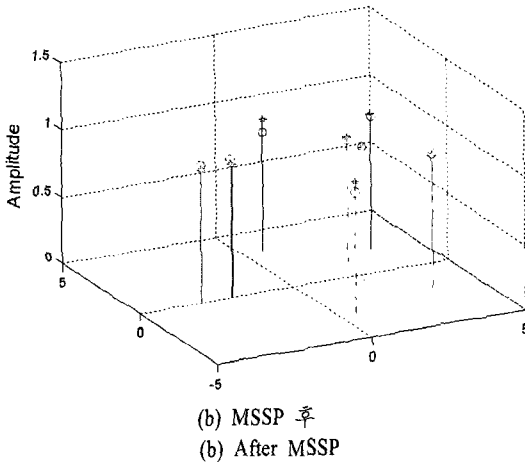
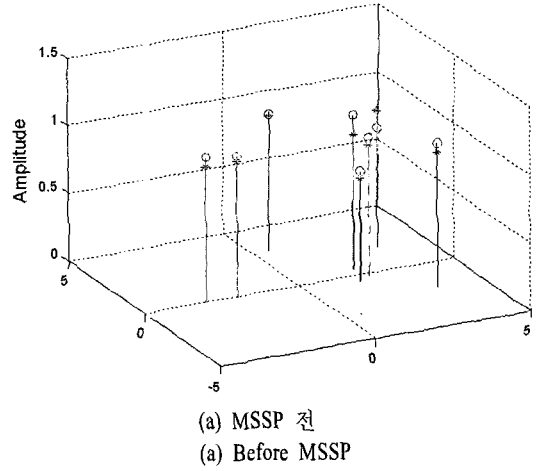
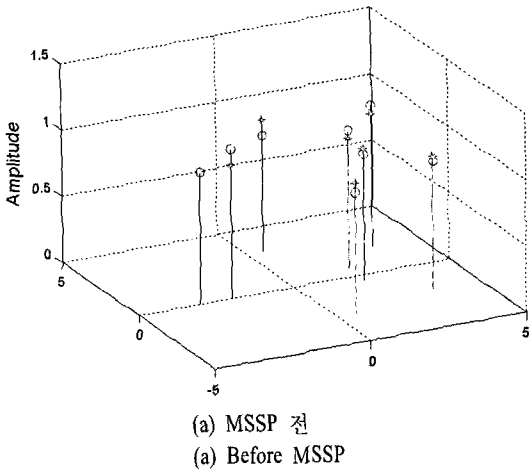


그림 5. 2-D MEMP 기법을 이용한 2차원 산란점 예측
Fig. 5. Estimation of 2-D scattering center using 2-D MEMP.

그림 6. 2-D ESPRIT 기법을 이용한 2차원 산란점 예측
Fig. 6. Estimation of 2-D scattering center using 2-D ESPRIT.

함에 있어 MSSP를 적용하기 전과 적용한 후에 대한 결과를 나타냄으로서 MSSP를 적용하면 산란점을 예측함에 있어서 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

3-2 표적에 의한 2차원 산란점 추출

본 논문에서 제안한 2차원 산란점 추출 알고리즘인 2-D MEMP와 2-D ESPRIT의 성능을 검증하기 위해 다음으로 사용한 표적은 F-18 전투기로서, 이에 대한 레이더 산란 데이터를 획득하여 시험을 하였다. 표적 F-18 전투기에 대한 산란 데이터를 획득하기 위한 파라미터는 다음과 같이 주어진다. 산란 데이터를 얻기 위해 사용한 운용 주파수는 800~999 MHz로 주파수의 대역폭을 199 MHz로 하였다.

산란 데이터를 얻기 위해 주파수의 개수를 200개로 샘플링을 하여, 주파수의 간격을 1 MHz로 하였다. 또한, 관측 각도를 $-10.0^{\circ} \sim +10.0^{\circ}$ 로 하여 각도의 간격을 0.5° 로 하였으며, 각도의 개수를 41개로 샘플링 하여 시험을 하였다.

시험을 하기 위한 표적은 그림 7에서 보여주듯이 F-18 전투기로서 18.357×13.124 [m] 크기이며, 높이는 4.241 [m]로 실제의 전투기와 비슷한 크기로 모델링하여 표적에 대한 산란 데이터를 획득하였다. 표적 F-18에 대한 산란 데이터를 획득할 때 본 연구에서는 고주파 해석 기법인 PO/PTD를 이용하여 산란 데이터를 얻었다. 그림 8은 2-D MEMP 알고리즘을 이

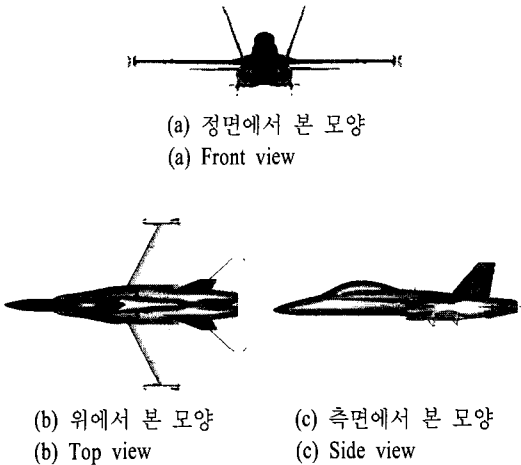


그림 7. 2차원 산란점을 얻기 위한 표적(F-18)
 Fig. 7. The target(F-18) for 2-D scattering center extraction.

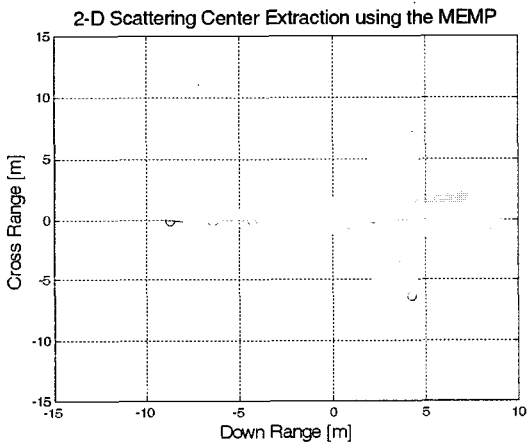


그림 8. 2-D MEMP 기법을 이용한 표적 F-18에 대한 2차원 산란점 예측
 Fig. 8. Estimation of 2-D scattering center for F-18 target using 2-D MEMP.

용하여 표적에 대한 2차원 산란점 추출에 대한 결과이다. 그리고 그림 9는 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 표적에 대한 2차원 산란점 추출에 대한 결과를 나타낸 것이다. 위의 결과를 보면 고해상도 신호처리 방법인 2-D MEMP 알고리즘과 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 표적에 대한 산란점을 추출함에 있어서 산란점의 위치와 산란 강도를 정확하게 추출할 수 있음을 볼 수 있다. 또한, 산란점의 분포가 표적 F-18의 앞부분과 제트 엔진(jet engine) 부분에서

많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3-3 점 산란체에 의한 2차원 ISAR 영상 획득

이상적인 점 산란체로 구성된 표적에 대한 산란 데이터를 이용하여 얻어진 ISAR 영상은 제안한 알고리즘의 성능을 평가하는데 있어서 좋은 지표가 된다. 그리고 레이다 영상의 질을 평가하는데 있어서 가장 중요한 요소는 바로 해상도이다. 즉, 해상도가 높고 낮음을 평가하는데 있어서 가장 좋은 방법이 점 산란체를 구성하여, 이에 대한 ISAR 영상을 비교하여 평가하는 것이다. 본 논문에서 2차원 ISAR 영상을 구하기 위해 제안한 2-D MEMP 알고리즘과 2-D ESPRIT 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 사용한 파라미터는 다음과 같다. 주파수 영역에서 산란 데이터를 얻기 위해 사용한 운용 주파수는 9.0~11.0 GHz로 주파수의 대역폭을 2.0 GHz로 하였다.

또한 주파수의 개수를 201개로 샘플링을 하여 주파수의 간격을 10.0 MHz로 하였다. 그리고 관측 각도를 $-8.6^{\circ} \sim +8.6^{\circ}$ 로 하여 각도의 간격을 0.4° 로 하였으며, 각도에 대한 샘플링 개수를 44개로 하여 시험을 하였다.

그림 10은 2차원 ISAR 영상을 얻기 위한 표적으로서 9개의 이상적인 점 산란체로 구성이 되어 있으며, 표 2는 표적을 이루는 점 산란체의 위치와 크기

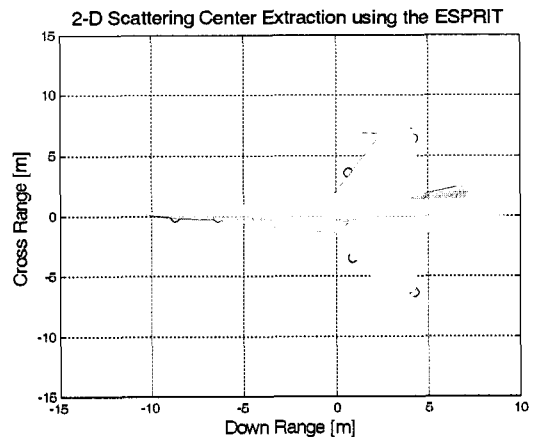


그림 9. 2-D ESPRIT 기법을 이용한 표적 F-18에 대한 2차원 산란점
 Fig. 9. Estimation of 2-D scattering center for F-18 target using 2-D ESPRIT.

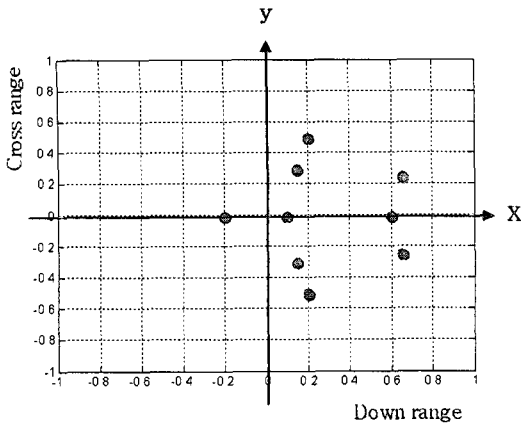


그림 10. 2차원 ISAR 영상을 얻기 위한 점 산란체
Fig. 10. The point scatterers for 2-D ISAR image.

를 나타내고 있다.

그림 11은 2차원 푸리에 변환을 이용하여 얻어진 ISAR 영상이다. 영상에서 보여주듯이 2차원 푸리에 변환을 이용한 ISAR 영상은 해상도가 좋지 않고 점 산란체의 영상이 많이 퍼져 있음을 볼 수 있다. 그리고 ISAR 영상만을 봐서는 산란점이 몇 개인지 구별할 수조차 없다.

그러나 고해상도 신호처리의 방법인 2-D MEMP 알고리즘을 이용하여 얻은 ISAR 영상인 그림 12와 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 얻은 ISAR 영상인 그림 13을 보면 영상에 대한 해상도가 매우 좋을 수 확인할 수 있으며, 표적을 이루는 산란점의 개수

표 2. 2차원 ISAR 영상을 위한 점 산란체의 위치와 크기

Table 2. Location and amplitude of point scatterers for 2-D ISAR image.

Number	Location [m]	Amplitude
1	(-0.2, 0.0)	0.30+j0.40
2	(0.1, 0.0)	0.70+j0.80
3	(0.6, 0.0)	0.35+j0.20
4	(0.15, 0.3)	0.50+j0.60
5	(0.15, -0.3)	0.50+j0.60
6	(0.2, 0.5)	0.25+j0.50
7	(0.2, -0.5)	0.25+j0.50
8	(0.65, 0.25)	0.20+j0.35
9	(0.65, -0.25)	0.20+j0.35

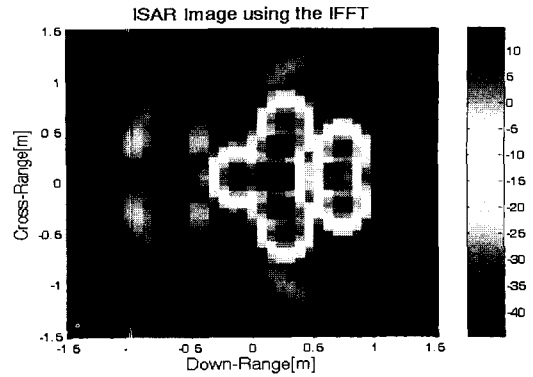


그림 11. 2-D IFFT를 이용한 이상적인 점 산란체에 대한 2차원 ISAR 영상

Fig. 11. The ISAR image of ideal point scatterers using the 2-D IFFT.

또한 정확하게 구별할 수 있는 것을 알 수 있다.

3-4 표적에 의한 2차원 ISAR 영상 획득

본 논문에서 ISAR 영상을 획득하기 위한 알고리즘인 2-D MEMP와 2-D ESPRIT의 성능을 검증하기 위해 사용한 표적은 F-18 전투기로서, 이에 대한 레이더 산란 데이터를 획득하여 시험을 하였다. 표적 F-18 전투기에 대한 산란 데이터를 획득하기 위한 파라미터는 다음과 같이 주어진다. 산란 데이터를 얻기 위해 사용한 운용 주파수는 800.0~999.0 MHz로 주파수의 대역폭을 199.0 MHz로 하였으며, 주파수의 개수를 200개로 샘플링을 하여, 주파수의 간격

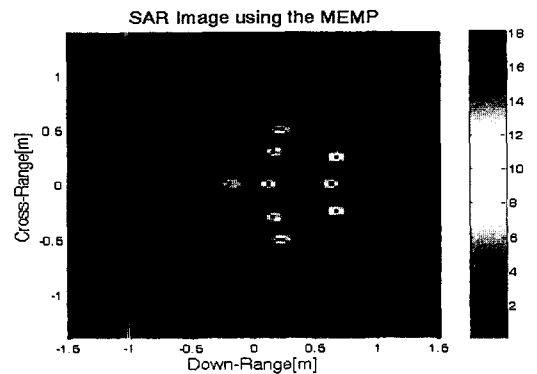


그림 12. 2-D MEMP를 이용한 이상적인 점 산란체에 대한 2차원 ISAR 영상

Fig. 12. The ISAR image of ideal point scatterers using the 2-D MEMP.

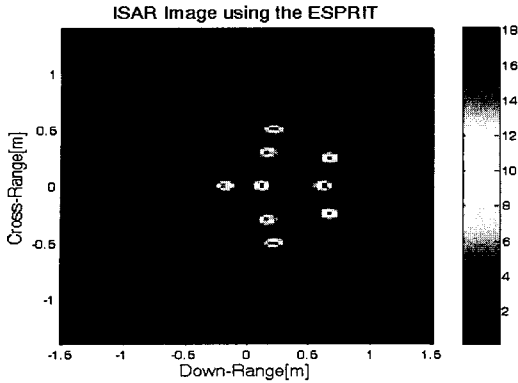


그림 13. 2-D ESPRIT을 이용한 이상적인 점 산란체에 대한 2차원 ISAR 영상
Fig. 13. The ISAR image of ideal point scatterers using the 2-D ESPRIT.

을 1.0 MHz로 하였다. 또한, 관측 각도를 $-10.0^{\circ} \sim +10.0^{\circ}$ 로 각도의 간격을 0.5° 로 하였으며, 각도의 개수를 41개로 샘플링하여 시험을 하였다.

시험을 하기 위한 표적은 F-18 전투기로서 18.357×13.124 [m] 크기이며, 높이는 4.241 [m]로 실제의 전투기와 비슷한 크기로 모델링하여 표적에 대한 산란 데이터를 획득하였다. 표적 F-18에 대한 산란 데이터를 획득할 때 본 논문에서는 고주파 해석기법인 PO/PTD를 이용하여 산란 데이터를 얻었다.

그림 14는 표적에 대한 ISAR 영상을 얻기 위해서 2-D IFFT 알고리즘을 이용한 결과이다. 영상에서 보여주듯이 2-D IFFT 알고리즘의 방법은 해상도의 질이 좋지 않고 점 산란체의 영상이 많이 퍼져 있음을 볼 수 있다. 그리고 영상만을 봐서는 산란점이 어떻게 구성되는지 알 수 없다. 그러나 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 얻은 F-18에 대한 ISAR 영상인 그림 15에서 보여주는 것과 같이 고해상도 신호처리 알고리즘을 이용한 ISAR 영상을 보면 표적에 대한 영상이 뚜렷하게 나타나며 영상에 대한 해상도가 매우 뛰어남을 볼 수 있다. 그리고 산란점이 어떻게 구성되는지를 정확하게 알 수 있다. 또한, 그림 15를 보면 ISAR 영상을 획득함에 있어서 MSSP를 적용하기 전보다 MSSP를 적용하여 ISAR 영상을 얻으면 영상의 해상도 면에서 성능이 개선됨을 볼 수 있다. 위의 그림의 결과를 보면 ISAR 영상의 분포가 표적 F-18의 앞부분과 날개에서 약하게 나타나며, 제트 엔진(jet engine) 부분에서 강하게 나타나는 것을 확

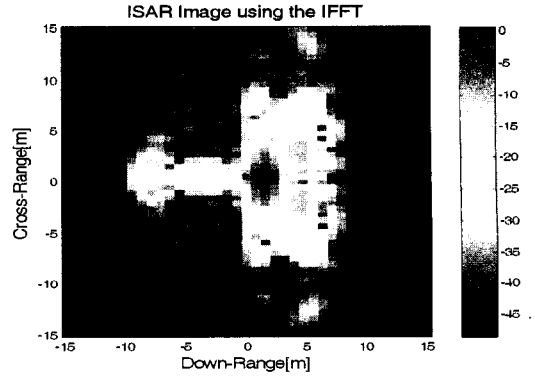


그림 14. 2-D IFFT을 이용한 F-18에 대한 2차원 ISAR 영상
Fig. 14. The ISAR image of F-18 target using the 2-D IFFT.

인할 수 있다. 또한, MSSP 기법을 적용하고 난 후 제트 엔진(jet engine) 부분과 몸통 부분에서 영상이 더욱 더 선명하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

표적에 대한 2차원 산란점과 ISAR 영상은 표적을 이루고 있는 산란점의 위치와 크기의 정보를 제공하기 때문에 레이더의 산란 신호를 모델링하거나 자동 표적 인식을 하는데 있어서 널리 사용되고 있다. 그러므로 표적의 2차원 산란점과 ISAR 영상을 얻기 위해 지금까지 여러 가지 방향으로 연구가 진행되고 있다. 레이더 시스템에 의해서 획득한 산란파를 이용하여 표적의 2차원 산란점 및 ISAR 영상을 획득하는 방법에는 일반적으로 2-D IFFT를 이용한 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 2-D IFFT 방법은 계산 시간은 매우 빠르다는 장점이 있는 반면에 영상의 해상도 면에서 질이 많이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 이러한 해상도의 문제점을 개선하기 위해서 지금까지 여러 고해상도 신호 처리의 방법들이 개발이 되어 왔다. 2차원 산란점을 추출하기 위한 고해상도 신호처리의 방법들 중에서 대표적인 것이 2-D MEMP, 2-D ESPRIT의 방법이 있다.

본 논문에서는 2차원 산란점 및 ISAR 영상을 얻기 위해서 2차원 레이더 산란파에 대한 수학적 모델을 제시하였으며, 제시한 고해상도 신호 처리 알고리즘인 2-D MEMP와 2-D ESPRIT을 구현하였다. 그

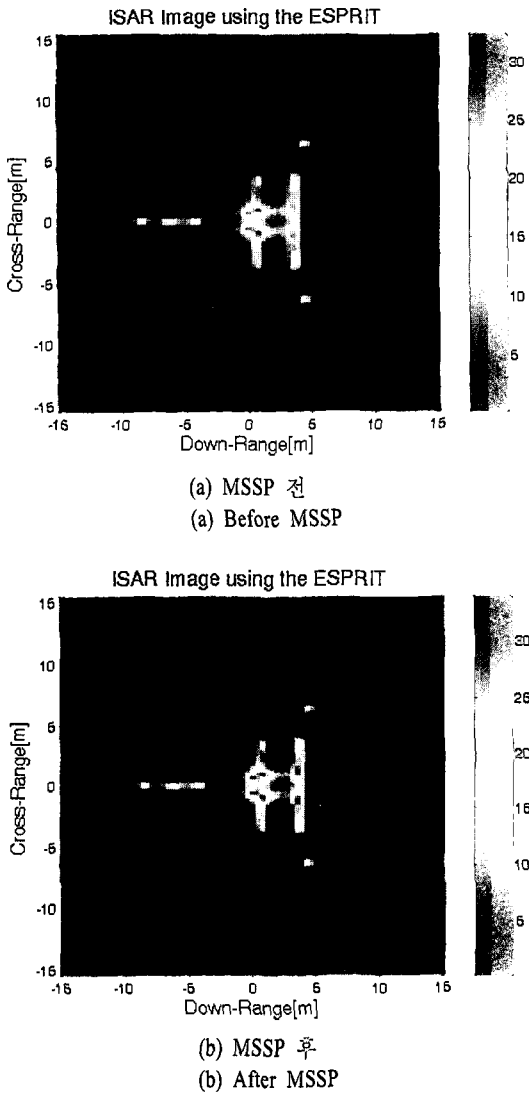


그림 15. 2-D ESPRIT 기법을 이용한 F-18에 대한 2차원 ISAR 영상
 Fig. 15. 2-D ISAR image for F-18 target using 2-D ESPRIT.

리고 제시한 2차원 산란점 추출과 ISAR 영상 형성 알고리즘의 성능을 나타내기 위해서 이상적인 점 산란체에 대한 산란파를 생성하여 이에 대한 결과를 나타내었으며, 또한 실제의 전투기와 비슷한 크기를 가진 표적 F-18에 대한 산란파를 획득하여 2차원 산란점 및 ISAR 영상을 예측한 결과를 나타내었다. 나타난 결과를 보면 고해상도 신호 처리의 방법인 2-D MEMP와 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용하여 표적의 2차원 산란점을 추출하는데 있어서 산란점의 위치

와 산란 강도를 정확하게 추출할 수 있음을 볼 수 있으며, ISAR 영상을 얻는데 있어서도 해상도가 높은 선명한 영상을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 그러나 이러한 고해상도 신호 처리의 방법은 계산 시간이 많이 걸린다는 단점이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 2-D MEMP와 2-D ESPRIT 알고리즘을 이용한 방법은 해상도 면에서 매우 뛰어난 성능을 보이지만 표적에 대한 산란점을 미리 예측을 해야 한다는 문제점을 가지고 있다. 여기서 산란점의 개수를 정확히 예측하지 못하면 영상이 왜곡되고 잡음의 영향 또한 많이 받는다. 그리고 본 논문에서 제시한 2-D MEMP와 2-D ESPRIT 알고리즘에 MSSP 기법을 적용하여 성능을 개선하였으며 신호처리 과정에서 특이값 분해 대신에 고유치 분해를 적용하여 계산 시간을 줄였다.

참고 문헌

- [1] L. C. Potter, D. M. Chiang, R. Carriere, and Michael J. Gerry, "GTD-based parametric model for radar scattering", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 10, Oct. 1995.
- [2] I. J. Guota, "High-resolution radar imaging using 2-D linear prediction", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 42, pp. 31-37 Jan. 1994.
- [3] W. C. Chen, "Identification of objects using complex resonances", *The University of Queensland Thesis report*, May 2003.
- [4] Y. Hua, T. K. Sarkar, "On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 39, no. 4, Apr. 1991.
- [5] Y. Hua, "Estimating two-dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 40, no. 9, pp. 2267-2280, Sep. 1992.
- [6] Y. Hua, E. Baqai, Y. Zhu, and D. Heilbronn, "Imaging of point scatterers from step-frequency ISAR data", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 195-205, Jan. 1992.
- [7] Stephan Fouquette, Mohamed Najim, "A new paring

step the MEMP method", *IEEE Conference Record of Thirty-first ASILOMAR Conference on Signal, System and Computer*, vol. 2, pp. 1715-1719, 1998.

- [8] Stephan Rouquette, Mohamed Najim, "Estimation of frequencies and damping factors by two-dimensional ESPRIT type methods", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 49, no. 1, pp. 237-245, Jan. 2001.
- [9] K. T. Kim, S. W. Kim, and H. T. Kim, "Two-dimensional ISAR imaging using full polarization and

super resolution processing techniques", *IEE Proceedings-Radar, Sonar, and Navigation*, vol. 145, no. 4, Aug. 1998.

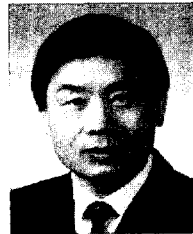
- [10] J. W. Odendaal, E. Barnard, and C. W. I. Pistorius, "Two-dimensional superresolution radar imaging using the music algorithm", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 42, pp. 1386-1391, Oct. 1994.

신 승 용



2002년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: 포항공과대학교 정보통신학과 (공학석사)
 2005년 3월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리, 산란점 추출 알고리즘, ISAR 영상 알고리즘, 구분기

명 로 훈



1976년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1982년 12월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학석사)
 1986년 8월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학박사)
 1986년 9월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 교수
 2006년 1월~2006년 12월: 전자과학회 학회장
 2004년 3월~현재: 전파탐지 특화연구센터 소장
 [주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이더 공학, 이동 및 위성 통신, EMI/EMC/EMS 등

임 호



2006년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 2006년 3월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 석사과정
 [주 관심분야] 전파 전파, 필터, 레이더 신호 처리, 산란점 추출 알고리즘