

論文95-32A-9-11

ISAR 데이터로 부터 이동 표적의 탐지 및 표적 신호 성분의 추출

(Moving Targets Detection and Signiture Extraction Method from ISAR Data)

楊勳其 *

(Hoongee Yang)

요약

본 논문은 잡음이 많이 섞여 있는 ISAR 데이터로 부터 이동표적을 효과적으로 탐지하는 방법과 표적의 속도나 영상정보 등을 얻는데 요구되는 잡음이 상당히 제거된 표적의 신호 성분을 효과적으로 추출하는 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 2 차원 데이터 구조를 갖는 ISAR 데이터가 코히어런트한 여러 단계의 처리과정을 거치면서 신호 성분이 동위상이 된 상태에서 적분되도록 하는 것이다. 그러므로 변환된 2차원 평면상에서 신호가 모인 곳에서는 신호대 잡음비가 크게 개선되어 탐지가 가능하게 된다. 신호대 잡음비가 개선된 정도를 수학적으로 유도했으며 잡음이 더해진 ISAR 데이터를 시뮬레이트 시켜서 제안된 방법의 성능을 조사하였다.

Abstract

This paper presents a method not only to detect moving targets from ISAR data corrupted by heavy clutter but to effectively extract the moving targets' signatures that are necessary for acquiring the velocities and images of the targets. In this method, input ISAR data are coherently processed such that echoes due to the moving targets are transformed to be in-phase and then integrated. It is shown that targets' signatures are localized in the transformed two-dimensional domain, leading to dramatic improvement of signal-to-noise (SNR) ratio. The extent of the improved signal-to-noise ratio is analyzed and results implemented with simulated ISAR data are presented.

I. 서론

Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) 는 지상에 고정된 레이더가 이동하는 표적에 일련의 펄스 신호를 송수신한 후 수신 데이터를 처리하여 표적의 영상 이미지를 획득하는 발전된 형태의 레이더이다^[1]

^[2]^[3]. 레이더의 이동으로 개구면을 합성하는 Synthetic Aperture Radar(SAR)와는 달리 ISAR에서는 펄스 신호들을 송수신하는 동안 표적의 이동거리가 합성된 개구면이 된다. 그 이유를 기하학적으로 생각해 보면 간단히 이해할 수 있다. 즉 정지한 레이더가 이동표적에 신호를 송수신하여 얻은 데이터나 표적이 고정되어 있고 레이더가 표적속도에 의해 보상된 속도로 이동하면서 송수신하여 얻은 데이터는 궁극적으로 같기 때문이다. 그러므로 ISAR의 신호처리 과정은 SAR 신호처리 과정과 동일하다고 말할 수 있지만 ISAR 신호처리를 위해서는 표적의 속도에 대한 정

* 正會員, 光云大學校 電波工學科

(Dept. of Radio Science and Engineering, Kwangwoon Univ.)

接受日字: 1995年3月4日, 수정완료일: 1995年9月1日

보가 필요하다^[4]. 속도에 대한 정보 없이 ISAR 데이터로부터 이동표적을 탐지하고 영상을 획득하는 방법이 미해군연구소에서 발표되었지만 이 방법은 실제 속도와 유사한 초기값을 알고 있을 때 적용이 가능하며 계산량이 상당히 많아 실시간적 구현에 어려움이 있었다^[5]. 최근에 ISAR 데이터로부터 이동 표적의 속도 정보를 얻는 방법이 제안되었는데 이 방법은 이동 표적이 야기시키는 속도에 비례해서 도플라 천이가 발생하므로 이것을 효과적으로 추출하여 속도값을 얻는 것이다. 그러나 실제로 신호대 잡음비가 충분히 좋지 않은 경우는 많은 오차를 야기시키는 문제점이 있었다^[6] [17][8].

본 논문은 신호대 잡음비가 상당히 낮은 ISAR 데이터로부터 이동 표적을 효과적으로 탐지하고 또한 인식이나 영상획득과 같은 후처리 과정에 필수적인 표적 신호 성분을 추출하는 방법을 제시하고자 한다. 레이더 이론에서 표적을 탐지하는 일반적인 방법은 수신 신호에 송신 신호를 곱하고 관찰하는 시간 동안 적분한 후 얻어진 값을 문턱값과 비교함으로써 존재 유무를 판정하는 likelihood ratio test 방법을 사용하고 있다^[9]. 하지만 이것은 인코히어런트한 방법이므로 위상정보를 무시해서 비효율적이며 수신된 신호가 일차원 데이터 구조인 경우에 적합하다.

ISAR 데이터는 SAR 데이터와 마찬가지로 2차원 구조를 가지며 위상 성분을 지니고 있으므로 신호 성분을 동위상이 되게한 후 적분함으로써 2 차원 평면상에서 신호성분을 증폭시키므로써 신호대 잡음비를 개선할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이차원 평면에 균등하게 분포되어 있는 잡음은 코히어런트한 신호처리 과정 동안에 분포가 변하지 않게 되므로 신호가 모여있는 부분에서는 신호대 잡음비가 크게 개선되며 이 부분을 효과적으로 필터링하면 표적에 관한 여러가지 정보를 얻게 된다. 2장에서는 수신된 ISAR 데이터의 2차원 구조에 대해서 설명하며 3장에서는 제안하고 있는 표적의 탐지 및 신호추출 과정을 설명하고 시뮬레이션 결과는 4장에서 제시한다.

II. ISAR 데이터 및 입력 신호대 잡음비

그림 1 및 그림 2 은 2 차원 (x, y) 평면상의 ISAR 시스템이다. 레이더는 $(0, .0.)$ 에 위치해서 펄스 신호 $p(t)$ 를 송신하고 표적들로 부터 산란되어 오

는 신호를 수신한다. 레이더는 이 송수신 과정을 $[-u_0, u_0]$ 시간 동안에 일정한 시간 간격으로 유한한 횟수만큼 행하게 되며 그 동안 표적들은 각각 일정한 속도로 이동한다고 가정하자 (데이터 획득시간인 $2u_0$ 는 일반적으로 2, 3 초내의 짧은 시간이므로 이 가정은 타당하게 받아들여 짐).

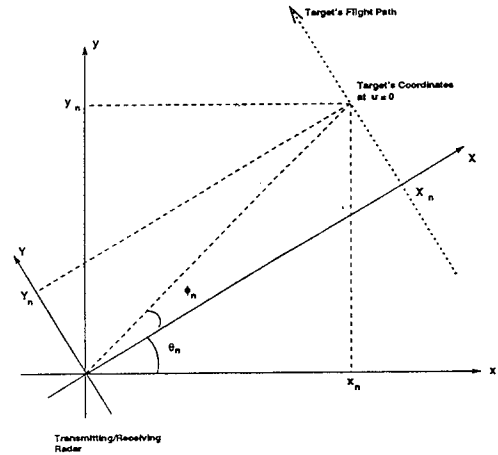


그림 1. $u=0$ 에서의 ISAR 시스템

Fig. 1. ISAR system geometry at $u=0$.

여기서 u 는 레이더가 펄스를 보내는 시간들을 나타내는 변수이고 t 는 펄스를 보낸 후 수신되는 신호의 시간을 나타내는 변수로 사용한다. 레이더빔 내에 유한개의 이동 표적이 있으며 n 번째 이동 표적의 속도는 (A_n, B_n) 라고 하자. 수신 신호를 표현하기 위해서 시간을 나타내는 2 개의 변수를 사용한다.

이 경우 $u=0$ 인 순간에 n 번째 표적의 위치가 (x_n, y_n) 라면 u 순간의 좌표는

$$(x, y) = (x_n + A_n u, y_n + B_n u).$$

가 된다. 그러므로 n 번째 표적으로 부터 반사되어 돌아오는 신호의 round-trip delay 는

$$\frac{2\sqrt{(x_n + A_n u)^2 + (y_n + B_n u)^2}}{c},$$

와 같이 표현되며 여기서 c 는 전파의 속도이다. 그러므로 u 순간에 송신된 펄스 신호로부터 수신되는 신호는

$$s(u, t) = \sum_n \frac{g_n}{R_n^2(u)} p\left[t - \frac{2R_n(u)}{c}\right] + s_c(t) + s_N(u, t) \quad (1)$$

와 같이 표현되며 여기서 g_n 는 n 번째 표적의 반사계수 및 안테나 이득과 전파전송 감쇄를 내포하는 변수이고 $R_n(u)$ 는

$$R_n(u) \equiv \sqrt{(x_n - A_n u)^2 + (y_n - B_n u)^2}$$

와 같이 정의된 레이더로부터 n 번째 표적까지의 거리이며 $s_c(t)$ 는 u 에 무관한 static clutter 성분이고 $s_N(t)$ 는 variance가 σ^2 인 가우시안 잡음에 의한 성분이다. 곧 설명되겠지만 $s_c(t)$ 는 필터링 과정을 통해서 적당히 제거가 가능하며 $s_N(u, t)$ 이 여기서 고려되고 있는 잡음이다. u 순간에 n 번째 표적으로부터 수신된 신호대 잡음비는

$$\left(\frac{S_n}{N}\right)_i = \frac{g_n^2}{R_n(u)^4 \sigma^2} \approx \frac{g_n^2}{R_n^4 \sigma^2} \quad (2)$$

와 같이 되며 여기서 R_n 은 $u=0$ 에서 레이더와 n 번째 표적 간의 거리, 즉

$$R_n \equiv \sqrt{x_n^2 + y_n^2} = R_n(0) \quad (3)$$

로 정의된 값이다.

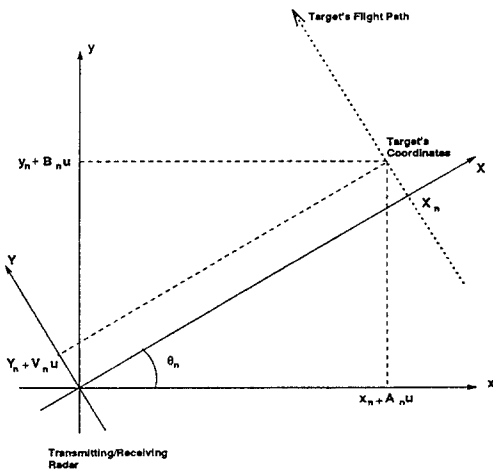


그림 2. 임의의 u 에서의 ISAR 시스템
Fig. 2. ISAR system geometry at arbitrary u .

Ⅲ. 코히어런트 detection 알고리즘

1. Temporal 푸리에 프로세싱.

(1) 식의 양변을 t 에 관해서 푸리에 변환하면

$$s(u, \omega) \equiv F(\omega) \sum_n g_n \frac{\exp[j2k\sqrt{(x_n + A_n u)^2 + (y_n + B_n u)^2}]}{(x_n + A_n u)^2 + (y_n + B_n u)^2} + s_c(\omega) + s_N(u, \omega) \quad (4)$$

와 같이 되며 여기서 k 는 wave number 이고 편이상 $s(u, t)$ 및 $s_N(u, t)$ 의 t 에 관한 푸리에 변환을 $s(u, \omega)$ 및 $s_N(u, \omega)$ 로 각각 나타내었다. n 번째 표적의 속도벡터를 아래의 두 변수에 의해 변수치환을 하자.

$$\theta_n \equiv \arctan\left(\frac{A_n}{B_n}\right) \quad (5)$$

$$V_n \equiv \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

그리고 n 번째 표적에 대해서 다음과 같은 회전 변환을 하면

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(4)는 다음과 같이 정돈시킬 수 있다.

$$s(u, \omega) \equiv F(\omega) \sum_n g_n \frac{\exp[j2k\sqrt{X_n^2 + (Y_n + V_n u)^2}]}{X_n^2 + (Y_n + V_n u)^2} + s_c(\omega) + s_N(u, \omega) \quad (7)$$

식(7)은 (X, Y) 평면에서 n 번째 표적이 $u=0$ 순간에 (X_n, Y_n) 을 지나면서 Y 축과 평행한 방향으로 V_n 의 속도로 이동하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 또는 표적이 정지해 있고 레이더가 V_n 의 속도로 Y 축을 이동하는 것으로도 해석가능하다. 여기서 (X, Y) 평면은 θ_n 에 따라 변하므로 각 표적에 따라 다르게 정의되는 이차원 평면이다.

2. 도플라 프로세싱.

식(7)의 양변을 $u \in [-u_0, u_0]$ 에 관해서 푸리에 변환하면^[10]

$$S(k_u, \omega) = F(\omega) \sum_n \frac{g_n \exp(-j\frac{\pi}{4})}{V_n \cos \phi_n} \left(\frac{\pi f_0}{2u_0 k R_n^3}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[j\sqrt{4k^2 - \left(\frac{k_u}{V_n}\right)^2} X_n + \frac{k_u}{V_n} Y_n\right] \quad (8)$$

$$I_n\left(\frac{k_u}{k}\right) + S_c(\omega) \text{sinc}(k_u u_0) + S_N(k_u, \omega)$$

과 같이 되며 여기서 f_0 는 펄스 반복 주파수, 즉 u 축에서 단의 시간당 송신 펄스 횟수를 나타내며 $I_n(\cdot)$

$$I_n\left(\frac{k_u}{k}\right) = \begin{cases} 1 - \frac{k_u}{k} \in [2V_n \sin \phi_n - \frac{2u_0 V_n^2 \cos^2 \phi_n}{R_n}, \\ 2V_n \sin \phi_n + \frac{2u_0 V_n^2 \cos^2 \phi_n}{R_n}] ; \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

와 같이 정의된 윈도우 함수이며 R_n 과 ϕ_n 은

$$R_n \equiv \sqrt{X_n^2 + Y_n^2} = \sqrt{x_n^2 + y_n^2},$$

$$\phi_n \equiv \arctan\left(\frac{Y_n}{X_n}\right) \quad (10)$$

와 같이 정의된다. n 번째 표적의 성분은 $\frac{k_u}{k}$ 축상에서

$$H_n \equiv 2V_n \sin \phi_n \quad (11)$$

에 중심을 두고 있으며 대역폭은

$$2W_n \equiv \frac{4u_0 V_n^2 \cos^2 \phi_n}{R_n} \quad (12)$$

가 되며 이때 H_n 과 W_n 은 k 또는 ω 에 무관한 함수이다. 식(8)에 의하면 static clutter 의 신호성분이 k_u 축상에서 차지하는 영역은 $\text{sinc}(k_u u_0)$ 함수에 의해 결정되며 기저대역을 차지하고 있고 n 번째 표적의 신호성분이 차지하는 영역은 H_n 에 중심을 두고 대역폭이 $2W_n$ 인 대역통과신호이므로 H_n 이 충분히 크다면 rejection 밴드가

$$\left[-\frac{\pi}{u_0}, \frac{\pi}{u_0}\right]$$

인 highpass 필터에 의해서 static clutter 신호 성분이 제거 가능하다.

3. Detection 및 표적신호 추출 방법

static clutter 신호성분이 제거되었다고 가정하고 아래의 매핑

$$h_u \equiv \frac{k_u}{k} \quad (13)$$

을 사용하여 ISAR 신호를 (h_u, ω) 평면에 다시 표현해 보면

$$Q(h_u, \omega) \equiv \frac{\sqrt{2u_0 k}}{\exp(-j\frac{\pi}{4})\sqrt{\pi f_0}} S(k_u, \omega)$$

$$= P(\omega) \sum_n \frac{g_n}{\sqrt{R_n^3 V_n \cos^2 \phi_n}} \exp$$

$$\left[j\frac{\omega}{c} \left[\sqrt{4 - \left(\frac{h_u}{V_n}\right)^2 X_n + \frac{h_u}{V_n} Y_n} \right] I_n(h_u) \right] \quad (14)$$

와 같이 된다. $S_N(k_u, \omega)$ 는 편의상 여기서 생략하였고 수식을 간소화 하기 위해서 ISAR 신호 대신에 ISAR 신호에 상수배를 곱한 $Q(h_u, \omega)$ 함수를 사용하였으며 $I_n(h_u)$ 는

$$I_n(h_u) = \begin{cases} 1 & h_u \in [H_n - W_n, H_n + W_n]; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

로 정의되어 있는 함수다.

식(14)를 ω 에 관해서 역푸리에 변환을 하면

$$Q_1(h_u, t) = \sum_n \frac{g_n}{\sqrt{R_n^3 V_n \cos^2 \phi_n}}$$

$$p\left[t - \sqrt{4 - \left(\frac{h_u}{V_n}\right)^2} \frac{X_n}{c} - \frac{h_u}{V_n} \frac{Y_n}{c}\right] I_n(h_u) \quad (15)$$

로 나타낼 수 있다. 식(15)에 의해서 $Q_1(h_u, t)$ 는 t 축상으로 $p(t)$ 의 펄스폭 만큼의 크기를 가지게 되고 h_u 축상으로 $2W_n$ 에 해당하는 간격에 신호가 모이게 되며 (h_u, t) 평면상에서 신호의 모양은 포물선의 일부분을 나타내는 모양을 가지고 있다. h_u 축에서 $[H_n - W_n, H_n + W_n]$ 구간내의 임의의 점에서 신호대 잡음비를 계산하면

$$\left(\frac{S_n}{N}\right)_0 \approx \frac{\pi}{2} \frac{f_0 g_n^2}{u_0 R_n^3 k V_n^2 \cos^2 \phi_n \sigma^2} \quad (16)$$

와 같이 되며 식(2)에서 보여준 입력 신호대 잡음비와 비교해 보면

$$\frac{\left(\frac{S_n}{N}\right)_0}{\left(\frac{S_n}{N}\right)_i} = \frac{\pi}{2} \frac{R_n f_0}{u_0 k V_n^2 \cos^2 \phi_n} \quad (17)$$

만큼의 신호대 잡음비가 개선된다. 즉 (u, t) 평면에 나타난 입력신호를 (h_u, t) 평면으로 일련의 변환을 행하면 식(17)에 나타난 만큼의 신호대 잡음비가 개선되며 특히 분자에 R_n 값이 있으므로 개선된 정도가 상당히 클 것으로 짐작할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

여기서는 2, 3장에서 제시한 신호처리 과정 및 수학적으로 유도된 결과의 유용성을 시뮬레이션을 통해서 조사한다. 시뮬레이션을 위해서 사용된 파라메타값은 다음과 같다. $(0, .0)$ 에 위치한 레이더는 $[0, 0.526]$ 초의 시간 동안에 1024 번의 펄스 신호를 보내고 반사되는 신호를 수신했으며 펄스 신호는 carrier 주파수가 90MHz 인 rectangular 펄스이다. 레이더 footprint 는 $(10000, .0)$ (m)에 중심을 둔 반경이 1024 m 인 원이며 그 안에서 두개의 표적이 서로 다른 속도로 이동하고 있다. 각 표적은 4개의 point scatterer로 구성되어 있으며 첫번째 표적은 속도 벡

터가 $(-900, -1500)$ (m/sec) 이고 측정시간의 반인 $u=0.213$ 초일때 $(9970, 10)$ (m) 지점을 지나고 있었고 두번째 표적은 속도 벡터가 $(450, 1800)$ (m/sec) 이고 $u=0.213$ 초일때 $(10200, 400)$ (m) 지점을 지나도록 시뮬레이트 하였다. 식(17) 에 의해서 이론적으로 신호 대 잡음비의 개선된 정도는 16.2 dB 이며 가우시안 잡음을 더해져서 하나의 point scatterer 의 신호 대 잡음비가 -3.03 dB 가 되도록 하였다. 그러므로 (k_u, t) 평면에서 기대되는 신호대 잡음비는 $16.2 - 3.03 = 13.17$ dB 정도임을 기대할 수 있다.

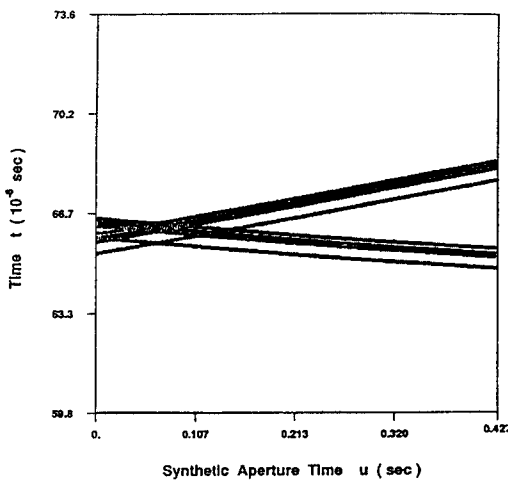


그림 3. (u, t) 평면에서의 잡음이 없는 ISAR 데이터
Fig. 3. Noise-free ISAR signature in the (u, t) domain.

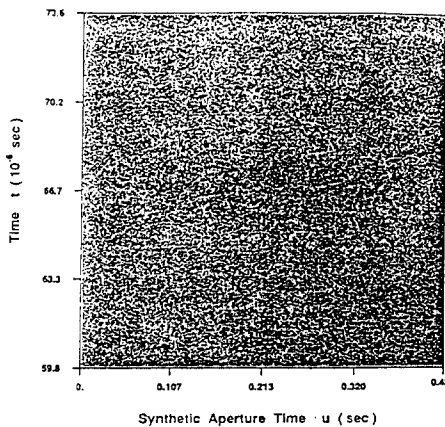


그림 4. (u, t) 평면에서의 가우시안 잡음이 더해진 ISAR 데이터.
Fig. 4. Noisy ISAR signature in the (u, t) domain.

그림 3은 잡음이 없을때 (u, t) 평면에 수신되는 ISAR 신호를 나타내었고 그림 4는 (u, t) 평면에 가우시안 잡음이 더해져서 신호성분이 거의 보이지 않는 상황을 나타낸 것이다.

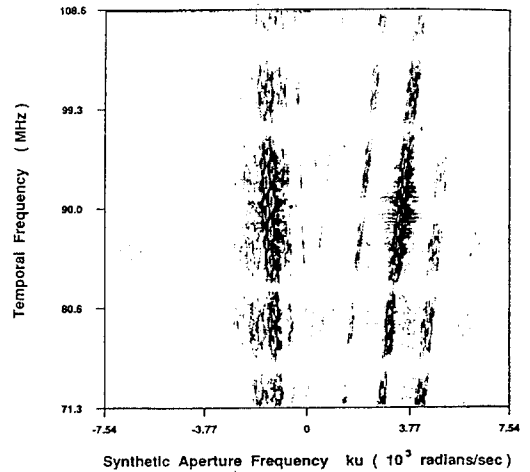


그림 5. (k_u, ω) 평면에서의 잡음이 없는 ISAR 데이터
Fig. 5. Noise-free ISAR signature in the (k_u, ω) domain.

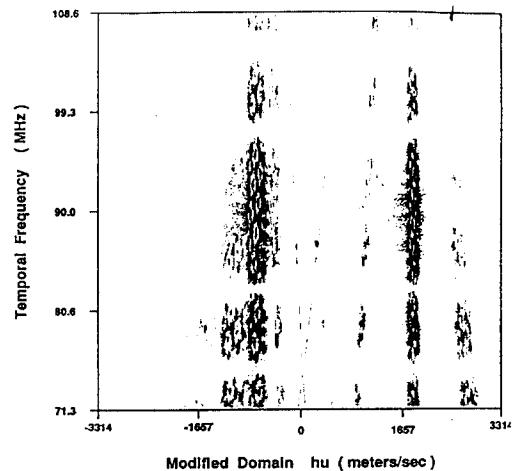


그림 6. (h_u, ω) 평면에서의 잡음이 없는 ISAR 데이터
Fig. 6. Noise-free ISAR signature in the (h_u, ω) domain.

그림 5와 6은 잡음이 없는 ISAR 데이터를 (k_u, ω) 및 (h_u, ω) 평면에 나타낸 것이며 그림 7은 잡음이 없는 데이터를 변환하여 (h_u, t) 평면에 나타낸 것이고 그림 8은 잡음이 더해졌던 데이터를 변환하여 (h_u, t)

평면에 나타낸 것이다. 그림 4에서 거의 보이지 않았던 표적신호 성분이 (h_u, t) 평면에서는 눈에 띄게 나타난 것을 알 수 있다. 표적에 대한 더욱 자세한 정보를 얻기 위해서는 그림 9에 나타낸 것과 같이 (h_u, t) 평면에서 필터링을 한후 지금까지 변환의 역변환 과정을 통해서 (u, t) 평면의 데이터를 얻을 수 있으며 이 데이터는 잡음이 적을때 수신된 ISAR 데이터와 같게 된다.

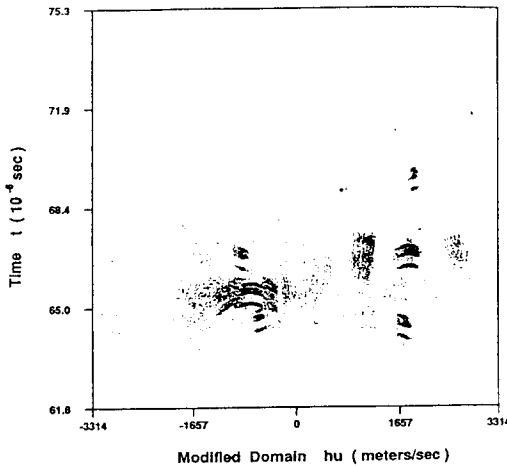


그림 7. (h_u, t) 평면에서의 잡음이 없는 ISAR 데이터

Fig. 7. Noise-free ISAR signature in the (h_u, t) domain.

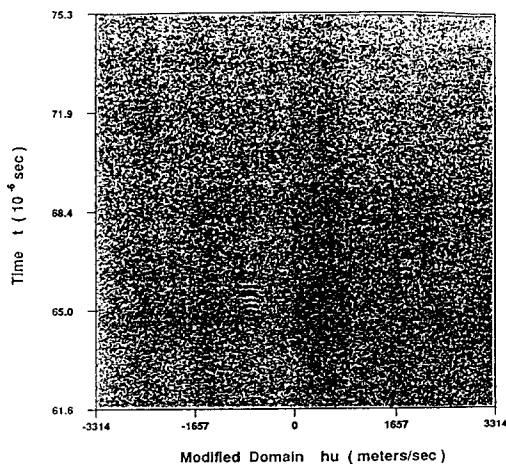


그림 8. (h_u, t) 평면에서의 가우시안 잡음이 더해진 ISAR 데이터

Fig. 8. Noisy ISAR signature in the (h_u, t) domain.

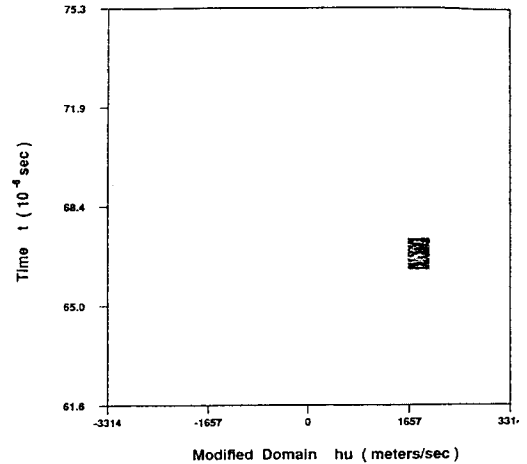


그림 9. (h_u, t) 평면에서의 신호추출 필터링
Fig. 9. Filtering in the (h_u, t) domain.

V. 결 론

본 논문은 코히어런트한 신호처리 과정을 통해서 잡음 레벨이 신호레벨 보다 큰 경우에도 효과적으로 표적을 detection 하고 표적 신호 성분만을 효과적으로 추출할 수 있는 방법을 제안했다. 수학적 유도 및 시뮬레이션 결과로 부터 제안된 신호처리 과정이 신호대 잡음비를 크게 개선시키는데 효과적임을 알 수 있었다. 추출된 신호성분은 표적을 인식하는데 효과적으로 쓰일 수 있을 것으로 기대되며 앞으로 수행될 연구에서는 이 데이터를 이용해서 물체를 인식하는 방법을 연구하고자 한다.

※ 본 연구는 학술진흥재단 신진교수 연구비지원에 의하여 연구되었음(과제번호 : 학진 300-829).

참 고 문 헌

- [1] M.I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [2] D. Ausherman, A. Kozma, J. Walker, H. Jones and E. Poggio, "Developments in radar imaging," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 20, No. 4, pp.363-398, July 1984.
- [3] D. Munson, J. O'Brien and W. Jenkins, "A tomographic formulation

- of spotlight mode synthetic aperture radar," *Proc. IEEE*, Vol.7, No.8, pp.917-925, August 1983.
- [4] R.K. Raney, "Synthetic aperture imaging radar and moving targets," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol.7, No.3, pp. 499-506, May 1971.
- [5] R. P. Bocker, S. A. Jones, "Using the burst derivative measure to improve the computational efficiency of ISAR motion compensation algorithms," *Technical Document 2278*, NOSC Radar branch, San Diego, April 1992.
- [6] H. Yang and M. Soumekh, "Blind-velocity SAR/ISAR imaging of a moving target in a stationary background," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol 2, No.1, pp. 80-95, January 1993
- [7] H. Yang and M. Soumekh, "Target motion estimation and compensation in SAR/ISAR imaging," *Proc. ICASSP's 92*, San Francisco, March 1992.
- [8] 양훈기, 김은수 "Inverse SAR 에서 속도를 모르는 움직이는 물체의 이미징 알고리즘," *통신학회 논문지*, 제 19 권 제 5 호, pp. 796-804, 1994. 5.
- [9] H.L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory*, John Wiley & Sons, pp. 238-243, 1971.
- [10] P. Morse and H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics*, New York: McGraw Hill, 1968.

— 저 자 소 개 —



楊 勳 基(正會員)

1985년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1987년 5월 뉴욕주립대 전기공학과 졸업(공학석사). 1992년 5월 뉴욕주립대 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년 3월 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 조교수. 대학부설 신기술연구소 시스템연구부 연구원. 주관심분야는 레이더 및 광신호처리, 디지털 신호처리, inverse scattering 등임