항공기 위상 배열 레이더에서 시간 영역의 지상클러터 생성 모델

Time-Domain Model of Surface Clutter for Airborne Phase-Array Radar

김 태 형 · 김 은 희 · 김 선 주*

Tae-Hyung Kim · Eun-Hee Kim · Seon-Joo Kim*

요 약

항공기용 펄스 도플러 위상 배열 레이더에 관한 시간 영역에서의 클러터 생성 모델을 제시한다. 구형의 지구라는 가정에서 클러터 패치의 기하학적 위치를 고려하여 시간 영역의 지표면 클러터 신호를 생성하였으며, 부배열 단위로 클러터 신호를 생성하였다. 이렇게 생성한 부배열 단위의 클러터 신호는 DBF(Digital Beamforming), ABF(Adaptive Beamforming), STAP(Space-Time Adaptive Processing) 등의 다양한 레이더 응용에서 시뮬레이션 입력 신호로 사용되어질 수 있다.

Abstract

Time-domain clutter generation model for airborne pulse doppler phase-array radar is presented. Time-domain surface clutter signal is generated assuming earth of a sphere and considering geometry of a clutter patch, and generation of sub-array clutter signal is presented. The generated sub-array clutter signal can be used by simulation input signal in various radar applications of DBF(Digital Beamforming), ABF(Adaptive Beamforming), Stap(Space-Time Adaptive Processing) and etc.

Key words : Airborne Radar, Time-Domain Clutter Model, Phase-Array, Pulse Doppler

I. 서 론

항공기 레이더가 하방을 바라볼 때는 표적 반사 신호 외에도 지표면에서 반사되는 지면 클러터를 수신하게 된다. 클러터 환경에서 표적을 탐지하기 위해서는 클러터를 분석하고, 클러터를 억제하거나 클러터를 회피하기 위한 방법을 연구하게 된다^[1]. 시뮬레이션으로 클러터 생성 방법으로는 크게 주파수 영역에서 클러터를 생성하는 방법^[2]과 시간 영역에서 클러터를 생성하는 방법이 있다^[4]. 개인용 컴퓨터를

사용하여 소프트웨어적으로 클러터를 생성할 때, 주파수 영역에서 클러터 생성은 보통 클러터 생성 시간이 보다 적게 드는 특징이 있다. 그러나 주파수 영역에서 클러터 생성은 도플러 처리까지의 신호처리 과정을 수치적으로 예상하여 포함시킨다. 그러므로 도플러 처리 전 단계에서의 클러터의 영향을 분석하기 어렵고, 도플러 처리 다음 단계에서의 클러터 영향을 분석하는 데 이용할 수 있다. 시간 영역에서 클러터 생성은 레이더 반사파 단계부터 시간 영역에서 클러터를 모사함으로써 레이더 신호처리 전체 단계에

LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 28, 2013 ; Revised July 16, 2013 ; Accepted July 19, 2013. (ID No. 20130328-041)

· Corresponding Author : Tae-Hyung Kim (e-mail : thkim07@gmail.com)

서 클러터의 영향을 분석하는데 이용할 수 있다. 그러므로 STAP(Space-Time Adaptive Processing) 처리와 같이 클러터의 시간 영역에서 영향 분석이 필요한 응용에서는 시간 영역에서 클러터를 생성하여 시뮬레이션하는 것이 필요하다.

항공기의 속도 및 고도, 송신 빔의 시선각 방향, 지면과 항공기의 기하학적 관계를 고려하여 클러터를 시간 영역에서 생성하는 클러터 모델을 제시하였다. 제시한 클러터 생성 방법은 수신기 후단의 클러터 수신 신호를 표적 및 지면과 항공기의 기하학적 관계를 제한없이 고려하여 모사한다. 주엽 클러터와 부엽 클러터는 물론, 시간 영역에서 클러터를 모사하기 때문에 ICM(Internal Clutter Motion)에 기인한 시간에 따른 클러터의 변동을 어렵지 않게 고려하는 것이 가능하다.

II. 클러터 전력 계산 위한 기하학적 관계

2-1 관성좌표계와 클러터 좌표계

지면 클러터는 항공기의 자세 및 고도 H_a 와 항공기의 속도 $\vec{V}_a$ 및 전송파장 λ , 송신빔의 시선각, 안테나 송수신 패턴 등에 의존하여 생성된다. 클러터 관련 의존 요소들을 클러터 계산이 편리한 좌표계로 이동하여 생성하는 것이 유익하다. 클러터 계산의 편의를 위하여 관성 좌표계 (x_I, y_I, z_I) 에서의 항공기 속도 벡터가 좌표 변환에 의하여 x - z 평면상에 있도록 한, 다음과 같은 클러터 좌표계 (x, y, z) 를 사용한다.

그림 1처럼 관성 좌표계의 z_I 축에 대하여 관성 좌표계를 Ω 만큼 회전한 좌표계인 클러터 좌표계 (x, y, z)

그림 1. 관성 좌표계와 클러터 좌표계
Fig. 1. Inertia coordinates and clutter coordinates.

에서 항공기 속도 벡터를 다룬다. 이때 회전각도 Ω 는 다음과 같다.

$$\Omega = \tan^{-1}(v_{ay_I} / v_{ax_I}) \quad (1)$$

관성좌표계에서 정의된 항공기속도 $(v_{ax_I}, v_{ay_I}, v_{az_I})$ 를 클러터 좌표계로 좌표 변환하면 아래의 식과 같다.

$$\begin{pmatrix} v_{ax} \\ v_{ay} \\ v_{az} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Omega & \sin\Omega & 0 \\ -\sin\Omega & \cos\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ax_I} \\ v_{ay_I} \\ v_{az_I} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ax_I}\cos\Omega + v_{ay_I}\sin\Omega \\ -v_{ax_I}\sin\Omega + v_{ay_I}\cos\Omega \\ v_{az_I} \end{pmatrix} \quad (2)$$

즉, $(v_{ax}, v_{ay}, v_{az}) = (v_{ax_I}\cos\Omega + v_{ay_I}\sin\Omega, -v_{ax_I}\sin\Omega + v_{ay_I}\cos\Omega, v_{az_I})$ 이다(여기서 $-v_{ax_I}\sin\Omega + v_{ay_I}\cos\Omega = 0$ 이며, 식 (1)을 사용하였다.).

2-2 클러터 전력

항공기의 자세와 속도 및 안테나 빔의 각도 등에 의해 클러터 패치에 대한 반사 클러터 신호의 속도와 거리 성분 및 전력이 결정된다. 지면 c 지점에 대한 클러터 전력, CNR(Clutter to Noise Ratio)는 다음 식과 같이 계산한다.

$$CNR_c = C_K \frac{G_T G_R \sigma_0 \Delta S}{R_c^4 L} \quad (3)$$

여기서 C_K 는 상수로서 해당 레이더 시스템 특성(안테나, 송/수신기, 전송주파수 등)에 따라 결정된다. L 은 외부적인 loss들의 합이며, G_T 와 G_R 은 지면 patch(클러터 패치) 방향에 대한 송신과 수신 안테나 gain이다. ΔS 는 레이더 신호 반사를 하는 클러터 패치의 면적, σ_0 는 후방 산란 계수이며, $\sigma_0 \Delta S$ 는 표적 RCS와 같이 클러터 패치의 RCS 값에 해당한다. R_c 는 항공기에서 클러터 패치까지의 거리(slant range)이다.

σ_0 는 지면 특성과 레이더신호의 grazing angle에 의해 결정되며, 산악, 바다 등의 지면 특성에 따라 σ_0 에 대한 다양한 모델이 있지만, 본 논문에서는 constant gamma model^[2], $\sigma_0 = \gamma \sin(\alpha)$ 을 사용한다. 여기서 γ 는 상수이며 α 는 레이더신호의 grazing

그림 2. 클러터 계산을 위한 기하학적 정의
Fig. 2. Geometric definition for clutter calculation.

angle이다(그림 2).

2-3 지면 및 항공기의 기하학적 관계와 클러터 계산

다음 그림 2는 클러터 계산에 사용된 기하학적 정의이다. $\vec{V}_a$ 는 항공기의 속도 벡터, φ 와 θ 는 각각 클러터 좌표계에서 지면의 한 패치 지점 c 에 대한 방위각과 고각이다. R_a 는 항공기의 고도, R_j 는 등가 지구 반지름으로 기하학적 지구 반지름의 4/3배에 해당한다.

$V_c = v_x \cos(\theta) \cos(\varphi) - v_z \sin(\theta)$ 는 항공기에서 c 지점에 대한 속력이다.

그림 3에서 R_H 는 레이더 지평선(horizon)을 나타내며, $R_H^2 = R_a(2R_j + R_a)$ 이다. 그림 2의 오른쪽 삼각형을 참고하고, sine과 cosine theorems을 이용하면 다음과 같다.

그림 3. 등가 지구와 항공기의 기하학적 관계
Fig. 3. Geometric relationships between aircraft and the equivalent of the earth.

그림 4. 클러터 패치의 면적
Fig. 4. Area of clutter patch.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \frac{R_j}{R_a + R_j} \cos(\alpha) \\ \sin(\theta) &= -\frac{R_c^2 + R_H^2}{2R_c(R_a + R_j)} \\ \sin(\alpha) &= \frac{(R_a + R_j)^2 - R_j^2 - R_c^2}{2R_c R_j} \end{aligned} \quad (4)$$

그림 4와 같이 식 (3)의 클러터 패치 면적 ΔS 는

$$\Delta S = R_c \frac{\Delta R}{\cos(\alpha)} \Delta \varphi, \quad (5)$$

이다. 여기서 ΔR 은 레이더의 거리해상도이다. $\Delta \varphi$ 는 도플러 해상도를 고려하여 정할 수 있다. 도플러 해상도는 $\Delta f = f_{PRF}/N$ 이며, 속도 해상도는 $\Delta v = \lambda \Delta f/2$ 이다. 여기서 f_{PRF} 는 PRF 값, N 은 펄스수, λ 는 전송 파장이다. 그림 2의 아래 수식으로부터 다음의 수식이 나온다.

$$\cos(\varphi(V_c)) = \frac{V_c + v_z \sin(\theta)}{v_x \cos(\theta)} \quad (6)$$

$\cos(\varphi(V_c - \Delta v/2))$ 와 $\cos(\varphi(V_c + \Delta v/2))$ 을 고려하면,

$$\Delta \varphi(V_c) = a \cos(A_1(V_c)) - a \cos(A_2(V_c)) \quad (7)$$

이다. 여기서

$$\begin{aligned} A_1(V_c) &= \min(1, \max(-1, \cos(\varphi(V_c - \Delta v/2)))) \\ A_2(V_c) &= \min(1, \max(-1, \cos(\varphi(V_c + \Delta v/2)))) \end{aligned}$$

이다.

송신 펄스 하나에 대한 c 지점의 수신클러터는

$$C(t) = g_c \sqrt{Z_c} e^{-j2\pi f_t(2R_c/Q)} e^{j2\pi(2V_c f_t/Q)t} h(t - t_d) \quad (8)$$

이다. 여기서 g_c 는 c 지점 방향에 대한 complex gain,

$Z_c = CNR_c / (G_T G_R)$, f_i 는 송신주파수, Q 는 광속, $h(t)$ 는 모듈레이션 신호, $t_d = 2(R_c - V_c t) / Q$ 이다. 각 펄스의 송신 시작 시간 p/f_{PRF} 에서 ($p=1, \dots, N_p$, $N_p = \text{coherent}$ 펄스 수) t_d 를 고려하여 $h(t - t_d)$ 를 구하고, 식 (8)을 이용하여 구한 각 송신 펄스에서의 수신클러터들을 합하면 N 펄스 동안의 지면 c 지점에 대한 수신클러터가 된다.

식 (8)에서 c 지점에 대한 상수 Z_c 를 시간에 따라 변하는 크기 $Z_{sc}(j)$ 로 대체함으로써 ICM(Internal Clutter Motion)을 고려하여 모델링할 수 있다^[3].

III. 안테나 이득 고려 및 부배열 클러터 신호

식 (8)에서 complex gain g_c 는 지면 c 지점에 대한 안테나 이득을 고려한 항으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$g_c = g_T(L_\theta, c_\theta) g_R(L_\theta, c_\theta, b_n) \quad (9)$$

여기서 $g_T(L_\theta, c_\theta)$ 는 안테나의 빔 방향 L_θ 이고, c 지점 방향 c_θ 일 때 c 지점에 대한 안테나 전송 전압 이득이며, $g_R(L_\theta, c_\theta, b_n)$ 는 L_θ 이고, c_θ 일 때 부배열 b_n 의 ($b_n=1, \dots, N_{st}$) c 지점에 대한 안테나 수신 전압 이득이다.

그림 5와 같은 linear array 안테나 경우, $g_T(L_\theta, c_\theta)$ 는

$$\begin{aligned} g_T(L_\theta, c_\theta) &= AF(L_\theta, c_\theta, N_{at}) \\ &= \frac{1}{N_{at}} \sum_{n=1}^{n=N_{at}} \exp \left[-j \frac{2\pi f_t}{Q} n \Delta x (\sin(c_\theta) - \sin(L_\theta)) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

로 표현되고, $g_R(L_\theta, c_\theta, b)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} g_R(L_\theta, c_\theta, b) &= AF(L_\theta, c_\theta, N_{bn}) \exp \left[-j \frac{2\pi f_t}{Q} b_n \Delta s \sin(c_\theta) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10), (11)에서 N_{at} 는 일차원 array의 총 요소

그림 5. 일차원 array 안테나의 예
 Fig. 5. Example of linear array antenna.

(element) 개수, Δx 는 array 요소 사이의 간격, N_{bn} 는 b_n 번째 부배열의 요소 개수, Δs 는 부배열 사이간격,

$$AF(L_\theta, c_\theta, N_{bn}) = \frac{1}{N_{bn}} \sum_{n=1}^{n=N_{bn}} \exp \left[-j \frac{2\pi f_t}{Q} n \Delta x (\sin(c_\theta) - \sin(L_\theta)) \right]$$

이다.

식 (8)~(11)를 이용하여 각 부배열 b_n 에서 c 지점에 대하여 수신한 클러터 신호를 계산할 수 있다. 이렇게 지면위의 모든 지점들에 대해 부배열 b_n 에서 수신한 클러터 신호들을 계산하고, 모든 지점들에 대해 구한 부배열 b_n 에서 수신한 클러터 신호들을 합함으로서 부배열 b_n 에서 수신한 지면 클러터 신호를 계산할 수 있다. 이렇게 구한 부배열 지면 클러터 신호는 DBF(Digital Beamforming), ABF(Adaptive Beamforming), 그리고 STAP과 같은 신호처리 응용에 이용할 수 있다.

IV. 기하학적 관계를 고려한 클러터 계산

앞에서 언급하였듯이 식 (8)~(11)을 이용하면, 지구의 지면과 항공기와의 기하학적 관계를 고려하여 클러터를 계산할 수 있다. 클러터 계산은 클러터 좌표계를 기준으로 하는 것이 좋다. 클러터 계산에서 고려할 거리의 범위는 $\{R_a, R_H\}$ 다. 즉, 항공기의 고도에서 레이더 지평선까지의 범위이며, 이 거리 범위를 ΔR 의 거리 해상도로 쪼개어 클러터 계산 시 고려한다. 그리고 쪼개어진 각 거리에 대하여 도플러 해상도를 고려하여 $\Delta \varphi$ 의 해상도로 지면을 다시 쪼개고, 식 (5)로 쪼개진 지면의 면적을 구할 수 있다. 쪼개어진 각 거리에 대하여 방위각 방향으로 $\Delta \varphi$ 의 해상도로 지면을 쪼갤 때 범위는 $\{0, 360^\circ\}$ 으로 할 수도 있지만, $\{\varphi_{LA} - 90, \varphi_{LA} + 90\}$ 의 범위만 고려해도 될 것이다. 여기서 φ_{LA} 는 안테나 빔 방향의 방위각 값이다.

$\{R_a, R_H\}$ 범위에서 해상도 ΔR 로 거리를 분할하고, 각 분할 거리의 지면을 $\{\varphi_{LA} - 90, \varphi_{LA} + 90\}$ 범위에서 해상도 $\Delta \varphi$ 로 분할하여, 클러터 계산에서 고려할 모든 지면을 분할할 수 있다. 이렇게 분할한 각 지면의 클러터 신호를 식 (8)~(11)을 이용하여 구하고, 각 지면의 클러터 신호를 모두 합하면, 지구와 항공기의 기하학적 관계를 고려한 클러터 신호가 된다.

V. 시뮬레이션 결과

식 (3)의 C_K 와 L 는 레이더 시스템에 의해 결정되는 고유한 상수이며, 시뮬레이션을 위해 임의로 값을 설정하였다. 시나리오 설정 값은 다음과 같다. 항공기의 고도 $R_a=5,000$ [m]로, 항공기는 속도 200 m/s로 1° 정도 아래로 향하여 정북으로 비행한다. 안테나의 빔의 방향은 방위각 쪽으로 0° , 고각 쪽으로는 -20° 이다. coherent 펄스의 개수는 128로 하였으며, 펄스의 폭은 $7.68 \mu\text{s}$ 로 sampling rate는 5 MHz로 하였다. PRI는 $96 \mu\text{s}$ 를 사용하였다. 그리고 펄스 압축을 수행하지 않았으며, $\Delta R=38$ m 정도로 두었다. Array 안테나는 2차원 planar 안테나로 504개(가로 24개, 세로 21개)의 요소를 가지며, 2차원 planar에서 가로 6개, 세로 7개를 한 묶음으로 하여 부배열은 12개(가로 4개, 세로 3개)로 구성하였다. 후방 산란계수를 구하기 위해 사용한 constant gamma model에서 $\gamma=0.1$ 로 두어 클러터 전력을 계산하였다. γ 의 값이 커질수록 계산되는 클러터 전력의 값이 커진다. $\gamma=0.1$ 은 중간 정도의 클러터 상황에 해당한다. 만약 $\gamma=0.2$ 로 설정하면 클러터 전력이 3 dB 정도 높아지게 된다.

그림 6과 7은 시뮬레이션 결과로서 12개의 부배열 중 하나에 대하여 만들어진 클러터 신호를 도플러 처리하여 거리/도플러 맵 형식으로 클러터 신호

그림 6. 거리/도플러 맵으로 표현한 부배열 하나에 대한 시뮬레이션 클러터 전력 결과

Fig. 6. Range/Doppler map of clutter signal simulated for a sub-array.

그림 7. 그림 6을 3D로 표현한 클러터 전력 결과
Fig. 7. 3D view of Fig. 6.

전력을 표현하였다. 그림 6과 7에서 주엽/부엽 클러터가 잘 표현되는 것을 볼 수 있다. 부엽 클러터는 파형의 펄스 폭이 커서 거리 쪽으로 다소 두껍게 보이지만, 펄스 압축을 하면 거리 쪽으로 해상도가 좋아져서 보다 세밀한 부엽 클러터 형태를 얻을 수 있다. 그리고 파형의 펄스 폭에 비해 해상도 ΔR 을 너무 작게 써서 다소 클러터 영상이 겹쳐서 획득된 듯 보인다. ΔR 을 펄스 폭에 맞추면 클러터 영상이 몇 줄이 겹쳐서 보이는 현상이 없어진다.

12개의 부배열에 대하여 만들어진 각각의 클러터 신호들은 거의 비슷한 전력 값들을 가진다. 그림 8

그림 8. 12개의 부배열 클러터 신호를 SUM해 수신 빔을 형성하여 나온 클러터 신호의 전력을 거리/도플러 맵으로 표현

Fig. 8. Range/Doppler map of clutter signal generated by summing 12 sub-array clutter signals.

그림 9. 그림 8을 3D로 표현한 클러터 전력 결과
Fig. 9. 3D view of Fig. 8.

과 9는 12개의 부배열에 대하여 시뮬레이션으로 만들어진 클러터 신호를 이용하여 안테나 송신 빔 방향으로 수신 빔을 형성한(DBF) SUM 신호의 전력을 표현한 것이다.

그림에서 보듯이 각각의 부배열 클러터 신호보다는 수신 빔을 형성하여 구한 클러터 신호의 CNR이 좋은 것을 볼 수 있다. 형성한 수신 빔의 패턴(주엽 빔 폭, sidelobe level 등의 변화)과 부배열 신호의 합성에 의한 전력 값 상승이 반영되어 그림 8과 9에 나타난 것이다. 주엽/부엽 클러터 형태는 그림 6, 7과 그림 8, 9가 같은 것을 볼 수 있다.

그림 10과 11은 부배열을 고려하지 않고 안테나 전체 배열 소자에 대하여 수신한(전체 안테나에 의해 형성되는 빔 패턴을 고려하여 만들어진) 신호를 단순히 합하여 구한 클러터 신호를 도플러 처리하여 거리/도플러 맵을 구한 것이다. 주엽/부엽 클러터 형태는 다른 그림들과 같은 것을 볼 수 있다. 다만 빔 패턴의 차이에 의한 조금의 차이들을 볼 수 있다. 그림 8과 9에 비해서는 그림 10과 11의 CNR이 다소 낮은 것을 볼 수 있다. 그리고 안테나 전체 배열 소자로부터 수신한 신호의 합이므로, 그림 6과 7에 비해서는(안테나의 일부 배열 소자에 대하여 수신한 클러터 신호의 합에 비해서는) 그림 10과 11의 클러터 전력이 높은 것을 볼 수 있다.

그림 6에서 9까지는 ICM 모델링을 넣지 않았지만 2-3절에서 설명하였듯이 식 (8)에 ICM 모델링을 첨가할 수 있다. 그리고 12개의 부배열 클러터 신호에

그림 10. 통배열 클러터 신호의 전력을 거리/도플러 맵으로 표현
Fig. 10. Range/Doppler map of clutter signal simulated for a whole array.

그림 11. 그림 10을 3D로 표현한 클러터 전력
Fig. 11. 3D view of Fig. 10.

서 12개보다 적은 개수의 수신 빔들(여러 각도의 수신 빔들)을 형성하여 클러터 신호들을 형성할 수 있으며, 이렇게 형성한 여러 빔에서 클러터 신호들을 STAP 처리의 응용에 이용할 수 있다.

VI. 결 론

항공기 pulse Doppler 위상 배열 레이더에 관한 시간 영역의 지상 클러터 생성 시뮬레이션 모델을 보였다. 이 모델은 지구의 지면과 항공기, 표적의 임의의 기하학적 관계를 모두 고려하여 볼 수 있다. 그리고

본 논문의 클러터 모델에서 ICM을 적용하여 모델링하는 방법을 제시하였다.

또한 위상 배열 레이더의 부배열에서 획득되는 클러터 신호를 모델링하는 방법을 보였다. 이렇게 구한 부배열 클러터 신호는 DBF, ABF, STAP 등의 신호처리 응용에서 성능 분석 및 시험 등에 이용할 수 있다.

References

[1] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd Edition, Mc-

Grow-Hill, 1990.

[2] G. Morris, L. Harkness, *Airborne Pulsed Doppler Radar*, 2nd Edition, Artech House, Inc., 1996.

[3] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGraw-Hill, Inc., 2005.

[4] Rui Duan, Xuegang Wang, and Zhuming Chen, "Space-time clutter model for airborne bistatic radar with non-Gaussian statistics", *Radar Conference, 2008. RADAR '08. IEEE*, pp. 1-6, 2008.

김 태 형

1999년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)
2010년 11월: 국방과학연구소 연구원
2010년 12월~현재: LIG넥스원(주) ISR연구센터 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 패턴인식

김 선 주

1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신모듈 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계, 항공기 레이더

김 은 희

1999년 3월: 한국과학기술원 정밀공학과 (공학석사)
2004년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
2007년 10월~현재: LIG넥스원(주) ISR연구센터 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레

이더 시스템