

# 저고도 비행체의 위치 추적 모사알고리즘에 관한 연구

김민년\*, 채규수\*, 임중수\*  
\*백석대학교 정보통신학부  
e-mail:myki@bu.ac.kr

## Simulation Study on the Low-angle Radar Tracking

Min-Nyun Kim\*, Gyoo-Soo Chae\*, Joong-Soo Lim\*

\*Dept of Information and Communication Baeksuk University

### 요 약

본 논문은 전파의 다중경로에 의한 추적레이더의 추적 오차에 대한 분석과 모사 알고리즘 개발에 관한 것이다. 일반적으로 알려진 저고도 추적 레이더의 연구내용을 분석 하였고 이를 바탕으로 Matlab 을 이용한 추적오차 계산용 수치해석 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서는 고도 오차의 요인들을 분석하고 안테나 빔 폭, 확산계수, 지면의 반사계수 등을 고려한 오차 계산방법을 제시 하였다. 시뮬레이션 결과들이 이론적인 예측 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

### 1. 서론

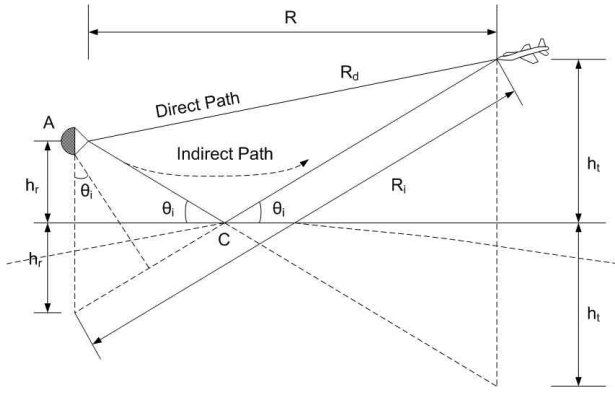
추적 레이더는 표적의 상대적인 위치 즉, 거리, 고각, 방위각, 속도 등을 계산하는데 사용된다. 그리고 얻어진 파라미터를 사용하여 표적의 경로를 예측하게 된다. 추적 레이더는 거리/속도 추적 방식과 각도 추적 방식을 사용한다. 일반적으로 단일표적 추적(single-target tracking) 레이더와 다중표적 추적(multi-target track-while-scan) 레이더로 구분된다. 일반적으로 추적 레이더는 매우 좁은 빔폭의 안테나를 사용한다. 표적정보의 분해능은 안테나 빔폭, 송신 펄스폭 및 도플러 대역폭 등에 따라 결정되는데 이들 변수들의 값은 탐지레이더의 변수값에 비해 상대적으로 작다. 추적이 시작되면 추적레이더는 안테나 빔을 연속적으로 이동표적을 향하여 방사하여 방위각, 고각, 거리 그리고 도플러 주파수 값을 측정하여 오차가 최소화되도록 안테나 빔의 방향과 거리관문을 제어한다. 각도 오차를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 현대에는 모노펄스기법을 가장 많이 사용하고 있다. 모노펄스 방향 탐지 방식은 일반적으로 위상비교 방향 탐지 방식과 진폭비교 방향 탐지 방식이 있다. 추적 레이더의 운용 상황에서 지면/해면의 다중경로 간섭, 대기의 전파 특성, 클러터 등에 의해 표적인식이 방해받게 된다[1]. 산악지형과 섬이 있는 해수면 등의 비정형 지형의 전파전파(wave propagation)

모델 연구는 레이더파가 전파되는 실제 전파 환경에서 발생하는 지형 특성을 고려하기 위해 필수적이다. 전파의 전파 특성에 대한 연구는 우리나라와 같이 바다와, 평지, 산악으로 복합된 지형에 나타날 수 있는 고주파 신호의 직접파/반사파의 전파 특성을 분석할 필요가 있다.

특히, 다중표적 추적, 급 기동 표적 추적, 저고도 비행표적 추적 등 고난이도의 추적레이더 계측 시 추적실패 가능성이 존재한다[1-8]. 그래서 비행시험 계측 전에 보유중인 다수의 계측 레이더의 추적 상황을 미리 모사함으로써 실제 비행시험 수행 시 계측 성공률을 높이고 다수의 계측 레이더를 보다 효과적으로 운용할 수 있다.

### 2. 다중경로 전파 및 추적 오차

추적 레이더의 운용 상황에서 지면/해면의 다중경로 간섭, 대기의 전파 특성, 클러터 등에 의해 표적 인식이 방해받게 된다. 대지 반사파는 한 번 대지에서 반사한 다음 수신점에 도달되는 전파를 말하며, 대지의 기울기나 전기적 특성이 지역에 따라서 일정치 않을 뿐만 아니라 도전을이 완전 도체와 같지 않기 때문에 광학적 반사를 하지 못하고 발산한다. 그림 1은 수평면 반사 다중경로 전파의 전파 개념도를 보여 주고 있다.



[그림 1] 다중경로 전파의 전파

식 (3)에 나타난 전파계수(F)는 자유공간의 조건을 만족하지 않는 전파의 전달특성을 표현 하고자 할 때 사용된다. 전파계수는 송신 측과 수신 측의 경로를 분리해서 정의 하며 기본적인 정의는 다음과 같다.

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right| \quad (3)$$

여기서, E는 매질내의 전계이고 E<sub>0</sub>는 자유공간의 전계이다.

목표물에 도착하는 신호는 식 (4)와 같이 표현 된다.

$$F = |f(\theta_t) + f(-\theta_i)\rho_s D e^{-j\alpha}| \quad (4)$$

여기서, f(θ)는 안테나의 전압 패턴, θ<sub>t</sub>는 목표물을 보는 고각, θ<sub>i</sub>는 입사각, ρ<sub>s</sub>는 지표면 반사계수의 크기, D는 확산(Divergence)계수 그리고 α는 반사파의 위상이다.

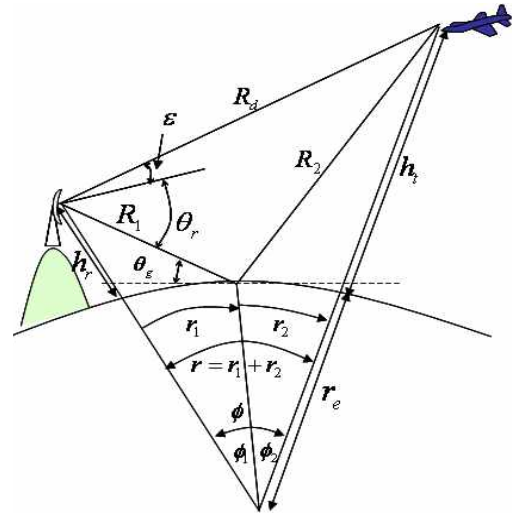
레이더의 다중경로 전파모델을 좀 더 정확하게 구현 하기위해 앞에서 소개된 평면지구 모델 대신 구형 지구모델을 사용할 필요가 있다[1]. 구형 지구 모델에서도 고려해야 할 요소들이 많지만 본 논문에서는 주로 확산 계수를 고려한 모델을 주로 다루고자 한다.

구형 지구표면에 반사되는 전파는 평면반사 일 때 보다 반사되는 전파가 실제 반사면보다 더 넓은 면적으로 반사되는 확산된다. 이 때 확산되는 전체 에너지는 평면 반사일 때보다 감소하게 된다. 확산계수는 식 (5)와 같이 표현되고 실제 논문에서 사용된 레이더 사이트 파라미터를 사용하여 거리에 따른 확

산계수를 구하였고 모사 알고리즘에 적용되었다.

$$D = \sqrt{\frac{r r_e \sin(\theta_g) \cos(\theta_g)}{\left(1 + \frac{h_r}{r_e}\right) \left(1 + \frac{h_t}{r_e}\right) \left(\frac{2r_1 r_2}{\cos(\theta_g)} + r_e r \sin(\theta_g)\right)}} \quad (5)$$

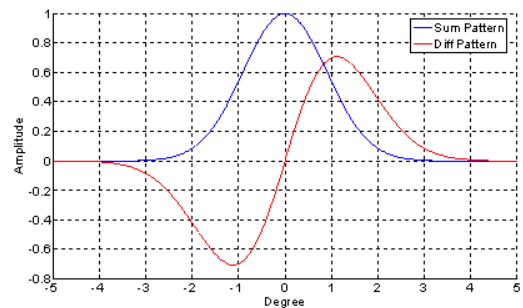
식 (6)에서는 지표면의 반사계수(Γ<sub>(h,v)</sub>)와 확산계수(D), 지표면 거칠기(s<sub>r</sub>)를 고려한 전체 반사 계수가 나타나 있다. 본 논문에서는 지표면의 거칠기는 고려하지 않았다.

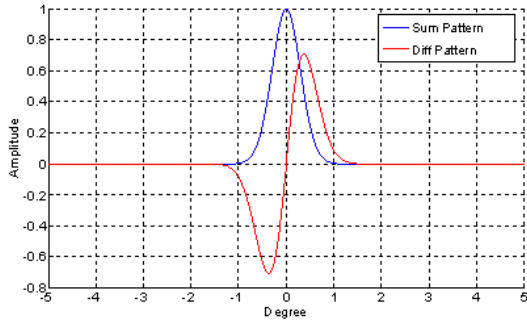


[그림 2] 원형지구 모델의 다중경로 전파

$$\Gamma_t = \Gamma_{(h,v)} D S_r \quad (6)$$

앞에서 언급된 일반적인 다중경로 전파모델을 이용하여 추적레이더의 추적오차를 분석 하였다. 추적레이더가 도입된 이래로 추적오차에 대한 많은 연구가 있었고 레이더로 수신되는 합 신호와 차 신호를 이용하여 추적오차를 계산 할 수 있다[5].





[그림 3] 사용된 합, 차 신호패턴

그림 3에서는 본 논문에서 사용된 합, 차 신호패턴을 보여주고 있으며 식 (7), (8)은 그림 4의 신호 패턴을 얻은 수식이다[5]. 여기서  $\theta_b$ 는 3dB 빔 폭이며 본 논문에서는  $1^\circ$ 로 사용하였다. 그리고  $\theta$ 는 안테나 off-sight 각도 이고 a, b, c는 각각 1.386, 1.56, 0.9를 사용하였는데[5] 이 수치들은 안테나 빔 패턴의 모양을 결정하는 파라미터 들이다. 식 (9), (10)은 직접파와 반사파의 합, 차 신호를 나타내고 있다. 그리고 식 (11)은 다중경로 신호에 대한 오차를 표시하고 있다.

$$\Sigma(\theta) = e^{-a(\theta/\theta_b)^2} \quad (7)$$

$$\Delta(\theta) = c(\theta/\theta_b)e^{-b(\theta/\theta_b)^2} \quad (8)$$

$$\Sigma_d = \frac{P_t G_t G_r \Sigma \theta}{4\pi R^2}, \quad \Sigma_r = \frac{P_t G_t G_r \Sigma \psi \rho^2}{4\pi(R_1 + R_2)^2} \quad (9)$$

$$\Delta_d = \frac{P_t G_t G_r \Delta \theta}{4\pi R^2}, \quad \Delta_r = \frac{P_t G_t G_r \Delta \psi \rho^2}{4\pi(R_1 + R_2)^2} \quad (10)$$

$$\epsilon_r = \frac{\Delta_d + \Delta_r e^{j\phi_r}}{\Sigma_d + \Sigma_r e^{j\phi_r}} \quad (11)$$

식 (12), (13)에서는 레이더로 수신되는 신호의 합, 차 패턴이 나타나 있다. 여기서  $\epsilon$ 는 고도오차,  $\rho_s$ 는 지표면 반사계수,  $\theta_0$ 는 ( $\epsilon + \theta_r$ , 그림 3 참조)이다.

$$S = Ae^{jut} \Sigma(\epsilon) + \rho_s Ae^{j(\omega t + \phi_s)} \Sigma(\epsilon - \theta_0) \quad (12)$$

$$D = Ae^{jut} \Delta(\epsilon) + \rho_s Ae^{j(\omega t + \phi_s)} \Delta(\epsilon - \theta_0) \quad (13)$$

식 (12), (13)의 합, 차 신호비의 실수 값(식 15)이 고도 오차이며 이 오차 값을 0으로 하는 오차 각을 식 (16)과 같이 구할 수 있다. 실제 고도 오차( $\Delta h$ )는  $\epsilon R$ 로 나타낼 수 있다. 오차 값은 실제 목표물까지의 거리(R)와의 곱으로 표현된다. 수치해석을 통

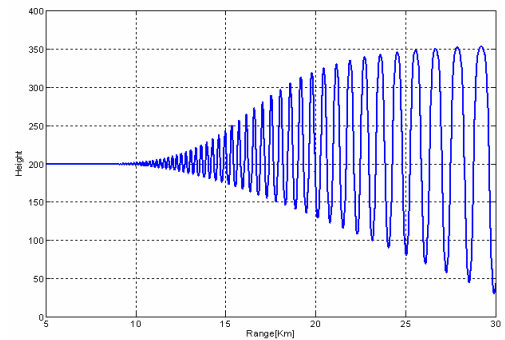
해 식(20)의 해를 구하면 오차 값( $\epsilon$ )을 식 (16)과 같이 구할 수 있다. 본 연구에서 이 수치해석 프로그램을 구현하여 다양한 시뮬레이션 결과를 얻었다.

$$error = Re \left[ \frac{D}{S} \right] = \left[ \frac{D}{S} \right] \cos \phi_e \quad (14)$$

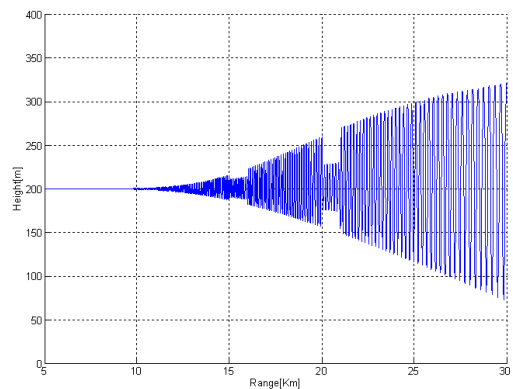
$$Re \left[ \frac{D}{S} \right] = \Delta(\epsilon) \Sigma(\epsilon) + \rho_s \Delta(\epsilon) \Sigma(\epsilon - \theta_0) \cos \phi_s + \rho_s \Sigma(\epsilon) \Delta(\epsilon - \theta_0) \cos \phi_s + \rho_s^2 \Delta(\epsilon - \theta_0) \Sigma(\epsilon - \theta_0) \cos \phi_s - \rho_s^2 \Delta(\epsilon - \theta_0) \Sigma(\epsilon - \theta_0) \sin \phi_s = 0 \quad (15)$$

$$\epsilon = \rho_s^2 (\theta_0 - \epsilon) \exp \left[ (a+b)(2\epsilon - \theta_0) \theta_0 / \theta_b^2 \right] + \rho_s \cos \phi_s \left\{ (\theta_0 - \epsilon) \exp \left[ b(2\epsilon - \theta_0) \theta_0 / \theta_b^2 \right] - \epsilon \exp \left[ a(2\epsilon - \theta_0) \theta_0 / \theta_b^2 \right] \right\} \quad (16)$$

그림 4은 식 (16)을 이용해 구한 오차 값에 거리(R)를 곱하여 실제 목표물 위치에서의 고도 오차를 2GHz에서 계산 한 결과이다.



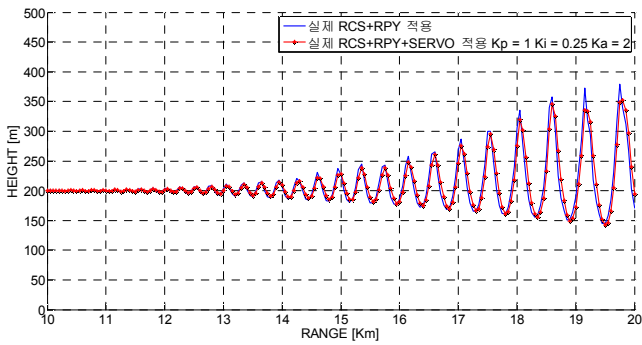
[그림 4] 합, 차 신호에 의한 오차 값 2GHz  
(해수 유전율 : 65+30.7i, 레이더 고도 : 230m, 비행체 고도 : 200m, 반사계수 : 0.9)



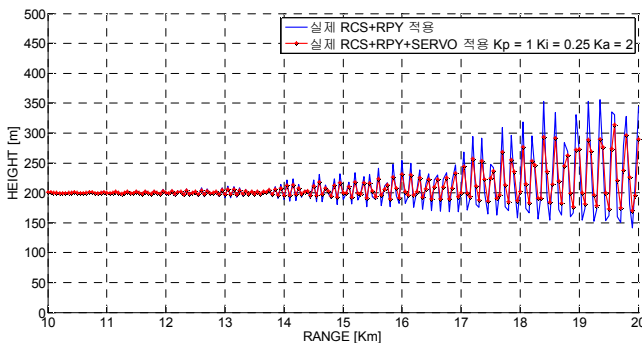
[그림 5] 반사면의 변화에 따른 오차 값  
(8.5km, 11km 사이에 지면 반사계수 0.6인 섬이 존재 하는 경우)

### 3. 추적 레이더를 적용한 위치 추적

실제 비행체를 추적 하는 레이더는 추적을 위한 자체적인 알고리즘이 존재한다. 본 논문에서는 모노펄스 레이더를 가정하여 서보를 모델한 후  $\alpha-\beta$  필터를 적용하였다. 추가적으로 실제 비행체는 모양에 따른 RCS, RPY를 적용하였다. 그림 8, 9는 실제 비행체의 RPY 좌표값에 따른 RCS값을 적용하였고 추적 레이더의 서보와 알파베타 필터를 적용한 후 레이더의 추적 결과를 비교하였다.



[그림 6] 서보와 필터를 적용한 추적 결과  
(200m 상공 비행체 실제 RCS+RPY 적용 3GHz)



[그림 7] 서보와 필터를 적용한 추적 결과  
(200m 상공 비행체 실제 RCS+RPY 적용 6GHz)

### 4. 결론

본 논문에서는 다중경로에 의한 추적레이더의 추적 오차를 분석하였다. 기존에 여러 문헌에서 소개된 저고도 추적 레이더의 연구내용을 분석 하였고 이를 바탕으로 Matlab를 이용한 추적오차 계산용 수치해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 검증을 위해 기존 연구내용과 비교 하였고 결과가 잘 일치되었다. 본 연구에서는 고도 오차를 계산 할 때 안테나 빔 폭과 지면의 반사계수를 고려하여 좀 더 정밀한 오차 계산방법을 제시 하였다. 또한 실제 레이더 추적에 사용

되는 레이더 파라미터 값을 적용하여 가능한 실제에 가까운 계측 모사를 하였다. 기존 연구에서는 일반적인 오차 값의 경향을 예측하는 내용이었으나 본 연구에서 제시된 시뮬레이션 결과들은 실제 환경을 고려한 고도 오차 계산 방법이 제시된 것이다.

### 참고문헌

- [1] B. R. Mahafza, *Radar System Analysis and Design using Matlab*, 2nd Edition, Champman & Hall/CRC, 2005.
- [2] M. D. Aasen, "Methods for predicting interference effects in tracking radars," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 6, Issue 3, pp. 49-57, Oct. 1964.
- [3] D. B. Barton, "Low-angle radar tracking," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 6, June 1974.
- [4] W. D. White, "Low-angle radar tracking in the presence of multipath," *IEEE Trans. on Aerospace & Electronic Systems*, Vol. AES-10, no. 6, Nov. 1974.
- [5] A. V. Marstik, P. G. Smith, "Multipath limitations on low-angle radar tracking," *IEEE Trans. on Aerospace & Electronic Systems*, Vol. AES-14, no. 1, Jan. 1978.
- [6] V. G. Borkar, A. Renuka, A. Ghosh, and A. K. Kapoor, "Simulation method identifies multipath tracking errors," *Microwaves & RF*, pp. 55-62, Feb. 2001.