

## 다중경로 추적오차 모사 알고리즘 연구

김민년<sup>1</sup>, 임중수<sup>1</sup>, 채규수<sup>1\*</sup>, 예성혁<sup>2</sup>, 류충호<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>백석대학교 정보통신학부, <sup>2</sup>국방과학연구소

### Simulation Study on the Multipath Tracking Errors

Min-Nyun Kim<sup>1</sup>, Joong-Soo Lim<sup>1</sup>, Gyoo-Soo Chae<sup>1\*</sup>, Sung-Hyuck Ye<sup>2</sup>  
and Chung-Ho Ryu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Information Communication Eng., Baekseok University

<sup>2</sup>Agency for Defense Development

**요약** 본 논문에서는 다중경로에 의한 추적레이더의 추적 오차를 분석하였다. 기존에 소개된 저고도 추적 레이더의 연구내용을 분석 하였고 이를 바탕으로 Matlab을 이용한 추적오차 계산용 수치해석 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서는 고도 오차를 계산 할 때 안테나 빔 폭과 지면의 반사계수를 고려하여 좀 더 정밀한 오차 계산방법을 제시하였다. 제시된 시뮬레이션 결과들이 이론적인 예측 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

**Abstract** This paper describes the radar tracking errors due to the presence of surface reflected waves. We investigate the previous studies on tracking errors and developed a tracking error estimation program using Matlab. We suggest an accurate error prediction method by considering the antenna beamwidth and surface reflection coefficient. The presented results well agree with theoretical predictions.

**Key Words** : Low-angle radar, Tracking error, Multipath, Reflection coefficient,

### 1. 서론

미래 전장에서 운용될 정밀타격 무기체계의 비행시험 수행 시 다양한 환경에서의 레이더 계측이 수행되어야 한다. 다중표적 추적, 급 기동 표적 추적, 저고도 비행표적 추적 등 고난이도의 추적레이더 계측 시 추적실패 가능성이 존재한다. 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 있는 방안을 도출해야 한다.

주요 추적오차 요인인 다중경로간섭(multipath interference), 안테나 빔 형성, 클러터 및 중요 이벤트 등은 레이더 추적 상태를 결정하는 중요 요소이므로 이에 대한 정확한 해석과 예측이 필수적으로 요구된다[1-8]. 추적 레이더는 표적의 상대적인 위치 즉, 거리, 고각, 방

위각, 속도 등을 계산하는데 사용된다. 그리고 얻어진 파라미터를 사용하여 표적의 경로를 예측하게 된다.

추적 레이더는 매우 좁은 빔폭의 안테나를 사용한다. 표적정보의 분해능은 안테나 빔 폭, 송신 펄스폭 및 도플러 대역폭 등에 따라 결정되는데 이들 변수들의 값은 탐지레이더의 변수값에 비해 상대적으로 작다. 추적이 시작 되면 추적레이더는 안테나 빔을 연속적으로 이동표적을 향하여 방사하여 방위각, 고각, 거리 그리고 도플러 주파수 값들을 측정하여 오차가 최소화되도록 안테나 빔의 방향과 거리관문을 제어한다. 각도 오차를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 현대에는 모노펄스기법을 가장 많이 사용하고 있다. 기존에 여러 문헌에서 소개된 저고도 추적 레이더의 연구내용[2-7]을 분석 하였고 이를 바탕으로 Matlab를 이용한 추적오차 계산용 수치해석 프로그램을 개발하였다.

본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*교신저자 : 채규수(gschac@bu.ac.kr)

접수일 09년 08월 05일

수정일 09년 09월 07일

게재확정일 09년 09월 16일

## 2. 다중경로 전파 및 추적 오차

추적 레이더의 운용 상황에서 지면/해면의 다중경로 간섭, 대기의 전파 특성, 클러터 등에 의해 표적인식이 방해받을 수 있다.

레이더 신호가 공간에서 방사될 때, 레이더 신호는 레이더 송신기의 출력, 송신 안테나 이득, 공간을 통과하면서 발생하는 전파 손실의 영향을 받으며 탐지하고자 하는 표적이 있는 곳까지 전달된다. 이때, 표적 또는 표적의 수신 단에서 수신되는 신호의 세기는 식 (1)과 같다.

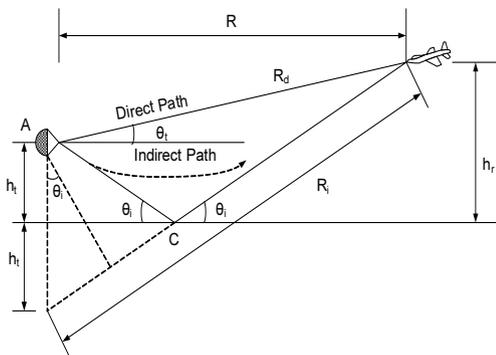
$$P_R = \frac{P_t G_t A_e}{4\pi R^2} \quad (1)$$

여기서,  $P_t$ 는 레이더 송신기 출력,  $G_t$ 는 송신 안테나 이득,  $A_e$ 는 수신 안테나의 유효 개구면적,  $R$ 은 탐지거리이다. 그리고 안테나 유효 개구면적을 이득 값으로 바꾸면,

$$P_R = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} = P_t G_t G_r \left[ \frac{c^2}{(4\pi R f)^2} \right] \quad (2)$$

로 표현 할 수 있다. 여기서,  $\lambda$ 는 고주파 신호의 파장,  $c$ 는 전파의 속도이다.

대지 반사파는 한 번 대지에서 반사한 다음 수신점에 도달되는 전파를 말하며, 대지의 기울기나 전기적 특성이 지역에 따라서 일정치 않을 뿐만 아니라 도전율이 완전 도체와 같지 않기 때문에 광학적 반사를 하지 못하고 발산한다. 그림 1은 수평면 반사 다중경로 전파의 전파 개념도를 보여 주고 있다[1].



[그림 1] 평면반사 다중경로 전파의 전파

대지를 완전 도체평면으로 가정하고 안테나의 높이 ( $h_t$ ), 목표물의 높이( $h_r$ ), 안테나와 목표물의 직선거리( $R$ )를 알면 목표물 위치에서의 반사 전계를 구할 수 있다.

직접파와 대지반사파의 전계를  $E_D$ ,  $E_R$ 라고하면 식 (3), 식 (4)와 같이 되고, 반사계수를 1로 가정하면 이들의 합성계수는 식 (5)와 같다

$$E_D = |E_D|e^{j\phi_1} \quad (3)$$

$$E_R = |E_R|e^{j\phi_2} \quad (4)$$

$$E = E_D + E_R = E_D(e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2}) \quad (5)$$

식 (6)에 나타난 전파계수(F)는 자유공간의 조건을 만족하지 않는 전파의 전달특성을 표현 하고자 할 때 사용된다.

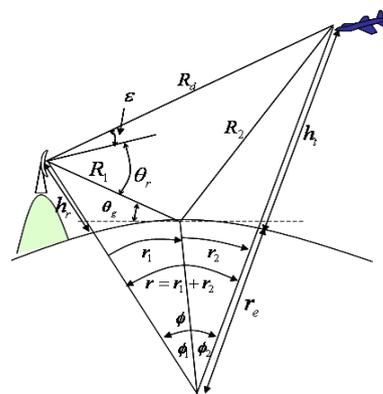
$$F = |E/E_0| \quad (6)$$

목표물에 도착하는 신호는 식 (7)과 같이 표현 된다.

$$F = |f(\theta_t) + f(-\theta_i)\rho D e^{-j\alpha}| \quad (7)$$

여기서,  $f(\theta)$ 는 안테나의 전압 패턴,  $\theta_t$ 는 목표물을 보는 고각,  $\theta_i$ 는 입사각,  $\rho$ 는 지표면 반사계수의 크기,  $D$ 는 확산(Divergence)계수 그리고  $\alpha$ 는 반사파의 위상이다.

레이더의 다중경로 전파모델을 좀 더 정확하게 구현하기 위해 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. 그림 2에서 지구 곡률을 고려한 전파의 다중경로 상황이 나타나 있다.



[그림 2] 지구 곡률을 고려한 다중경로 반사

그림 2에서 반사파의 경로( $R_i$ )는  $R_1 + R_2$  이고 식 (8), (9)와 같이 표현된다.

$$R_1 = \sqrt{r_e^2 + (r_e + h_r)^2 - 2r_e(r_e + h_r)\cos\phi_1} \quad (8)$$

$$R_2 = \sqrt{r_e^2 + (r_e + h_r)^2 - 2r_e(r_e + h_t)\cos\phi_2} \quad (9)$$

그리고 직접파의 경로( $R_d$ )는

$$R_d = \sqrt{(h_r - h_t)^2 + 4(r_e + h_t)(r_e + h_r)\left(\sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)\right)^2} \quad (10)$$

로 표현되고 지구중심과 레이더 위치와 목표물이 지표면에서 만나는 위치 사이의 거리( $r$ )는

$$r = r_e \operatorname{acos}\left(\sqrt{\frac{(r_e + h_r)^2 + (r_e + h_t)^2 - R_d^2}{2(r_e + h_r)(r_e + h_t)}}\right) \quad (11)$$

로 표시된다. 그리고 레이더 신호가 지표면에 반사될 때 입사각( $\theta_g$ )은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\theta_g = a \sin\left(\frac{2r_e h_r + h_r^2 - R_1^2}{2r_e R_1}\right) \quad (12)$$

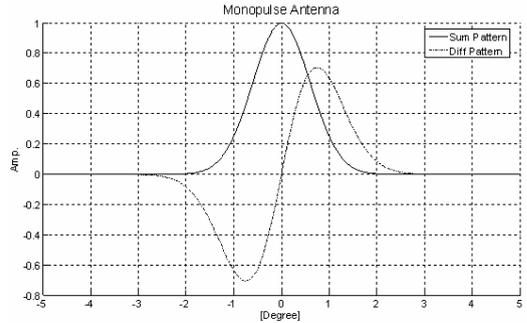
구형 지구표면에 반사되는 전파는 평면반사 일 때 보다 반사되는 전파가 실제 반사면보다 더 넓은 면적으로 반사되는 확산된다. 이 때 확산되는 전체 에너지는 평면 반사일 때보다 감소하게 된다. 확산계수는 식 (13)과 같이 표현되고 실제 논문에서 사용된 레이더 사이트 파라미터를 사용하여 거리에 따른 확산계수를 구한 결과가 그림 4에 나타나 있다.

$$D = \sqrt{\frac{r r_e \sin(\theta_g) \cos(\theta_g)}{\left(1 + \frac{h_r}{r_e}\right)\left(1 + \frac{h_t}{r_e}\right)\left(\frac{2r_1 r_2}{\cos(\theta_g)} + r_e r \sin(\theta_g)\right)}} \quad (13)$$

식 (14)에서는 지표면의 반사계수( $\Gamma_{(h, v)}$ )와 확산계수 (D), 지표면 거칠기( $S_r$ )를 고려한 전체 반사 계수가 나타나 있다. 본 논문에서는 지표면의 거칠기는 고려하지 않았다.

$$\Gamma_t = \Gamma_{(h, v)} D S_r \quad (14)$$

앞에서 언급된 일반적인 다중경로 전파모델을 이용하여 추적레이더의 추적 오차를 분석 하였다. 추적 오차에 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 (15), (16)은 그림 5의 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.

$$\Sigma(\theta) = e^{-a(\theta/\theta_b)^2} \quad (15)$$

$$\Delta(\theta) = c(\theta/\theta_b)e^{-b(\theta/\theta_b)^2} \quad (16)$$

식 (17), (18)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 3참조)이다.

$$S = A e^{j\omega t} \Sigma(\epsilon) + \rho_s A e^{j(\omega t + \phi_s)} \Sigma(\epsilon - \theta_0) \quad (17)$$

$$D = A e^{j\omega t} \Delta(\epsilon) + \rho_s A e^{j(\omega t + \phi_s)} \Delta(\epsilon - \theta_0) \quad (18)$$

식 (17), (18)의 합, 차 신호비의 실수 값(식 19)이 고도 오차이며 이 오차 값을 0으로 하는 오차 각을 식 (20)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 통해 식(20)의 해를 구하면 오

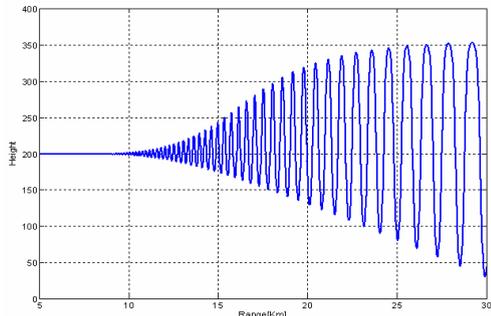
차 값( $\epsilon$ )을 식 (21)과 같이 구할 수 있다. 본 연구에서 이 수치해석 프로그램을 구현하여 다양한 시뮬레이션 결과를 얻었다.

$$error = Re \left[ \frac{D}{S} \right] = \left[ \frac{D}{S} \right] \cos \phi_e \quad (19)$$

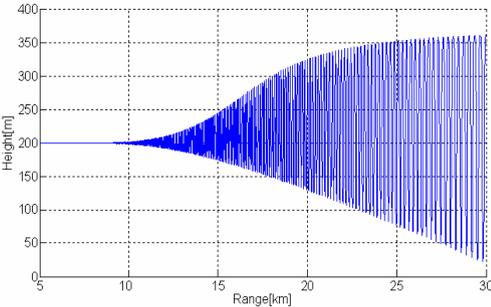
$$\begin{aligned} Re \left[ \frac{D}{S} \right] &= \Delta(\epsilon) \Sigma(\epsilon) + \rho_s \Delta(\epsilon) \Sigma(\epsilon - \theta_0) \cos \phi_s \\ &+ \rho_s \Sigma(\epsilon) \Delta(\epsilon - \theta_0) \cos \phi_s \\ &+ \rho_s^2 \Delta(\epsilon - \theta_0) \Sigma(\epsilon - \theta_0) \cos \phi_s \\ &- \rho_s^2 \Delta(\epsilon - \theta_0) \Sigma(\epsilon - \theta_0) \sin \phi_s = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \epsilon &= \rho_s^2 (\theta_0 - \epsilon) \exp \left[ (a+b)(2\epsilon - \theta_0) \theta_0 / \theta_b^2 \right] \\ &+ \rho_s \cos \phi_s \left\{ (\theta_0 - \epsilon) \exp \left[ b(2\epsilon - \theta_0) \theta_0 / \theta_b^2 \right] \right. \\ &\left. - \epsilon \exp \left[ a(2\epsilon - \theta_0) \theta_0 / \theta_b^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

그림 4에서는 목표물 위치에서 신호의 오차 값에 거리 (R)를 곱하여 실제 목표물 위치에서의 고도 오차를 계산한 결과이다.



(a)



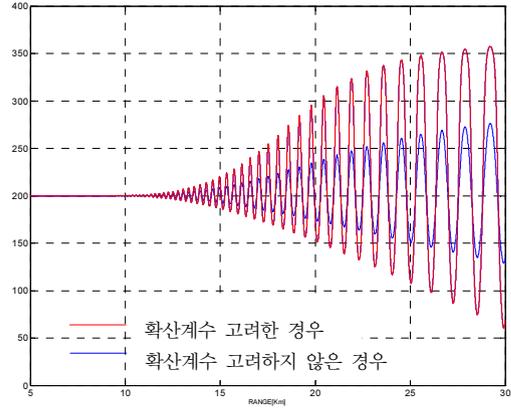
(b)

[그림 4] 합, 차 신호에 의한 오차 값

(a) @2GHz (b) @6GHz

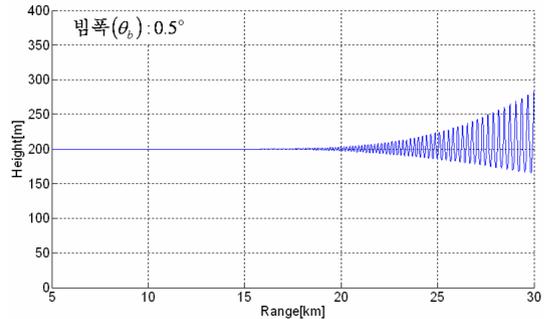
(해수 유전율 : 65+30.7i, 레이더 사이트 고도 : 230m,

비행체 고도 : 200m, 반사계수 : 0.9)

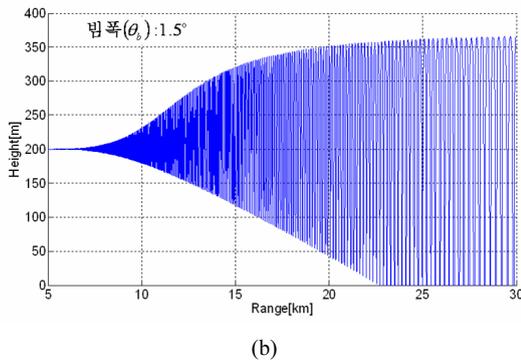


[그림 5] 확산계수에 다른 고도오차 비교

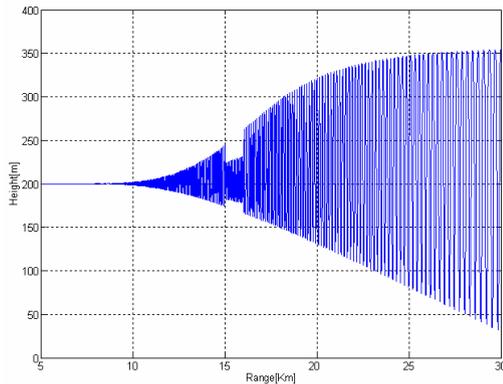
그림 5에서는 식 (14)에 나타난 반사 계수를 고려 할 때 확산 계수를 고려하지 않은 경우(기존 방법)와 본 논문에서 제안한 방법과의 비교가 나타나 있다. 전체적으로 확산 계수를 고려한 본 논문의 방법으로 구한 고도오차가 더 많이 나고 있음을 알 수 있고 실제 실험 결과와도 유사한 특징을 보이고 있다. 실제 측정 데이터에서도 거리가 25km이상 인 경우 150m정도의 오차를 보이고 있음을 보았다. 그림 6에서는 안테나의 빔 폭이 변하는 경우 오차 값을 나타내고 있다. 안테나의 빔 폭에 따라 반사되는 위치가 다르게 되므로 오차 값에 큰 영향을 주는 요소가 된다. 기존의 연구[5]에서는 고려되지 않았고 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하여 결과를 얻었다. 그림 7에서는 반사계수의 상태에 따른 오차 값을 나타내고 있다. 레이더와 목표물 사이의 바다위에 섬이 존재 하는 경우를 가정하여 결과를 나타내었다. 섬의 반사계수를 0.6 정도로 가정하였기 때문에 반사파의 영향이 수면 반사보다 상대적으로 적을 것으로 예상 할 수 있고 실제 결과도 동일하게 나타났다.



(a)



[그림 6] 거리에 따른 안테나 빔 폭의 차이에 의한 오차 값  
(a) 3dB-빔 폭 0.5° (b) 3dB-빔 폭 1.5°



[그림 7] 반사계수의 변화에 따른 오차 값  
(15-16km 사이에 지면 반사계수 0.6인 섭이 존재 하는 경우)

### 3. 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. 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, Chapman & 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.
- [7] A. Sinha, Y. Bar-shalom, W. D. Blair, and T. Kirubarajan, "Radar measurement extraction in the presence of sea-surface multipath," *IEEE Trans. on Aerospace & Electronic Systems*, Vol. 39, no. 2, April 2003.
- [8] David K. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Artech House, Norwood, MA, 2005.

김민년(Min-Nyun Kim)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 대우전자 전략기술연구소
- 2003년 6월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 2002년 3월 : 백석대학교 정보통신학부 전임강사

<관심분야>

초고주파, 레이더, 전파산란, 광파

임 중 수(Joong-Soo Lim)

[정회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학 학과 (공학사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학 학과 (공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
- 1980년 8월 ~ 2003년 12월 : 국방과학연구소
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이더 및 전자전 장비 설계/분석

류 충 호(Chung-Ho Ryu)

[정회원]



- 2000년 2월 : 부산대학교 전자공학(공학사)
- 1999년 11월 ~ 2001년 5월 : LG 전자
- 2001년 7월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

<관심분야>

레이더 자료 및 신호처리, 표적 추적 및 자료 융합

채 규 수(Gyoo-Soo Chae)

[중신회원]



- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학 학과 (공학석사)
- 2000년 12월 : Virginia Tech (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile (RF manager)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

안테나 설계, 초고주파 이론

예 성 혁(Sung-Hyuck Ye)

[정회원]



- 1995년 2월 : 광운대학교 전자공학과(공학사)
- 1997년 2월 : 광운대학교 전자공학과(공학석사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원

<관심분야>

마이크로파 회로 및 시스템, 안테나, 레이더