

## 원방계 조건하에서의 레이다 성능평가를 위한 시뮬레이터

길 민 영<sup>o</sup> · 명 로 훈

한국과학기술원

E-mail : road102@kaist.ac.kr , nhmyung@ee.kaist.ac.kr

### A Simulator for Radar Performance Evaluation in a Far-Field Test Range

Min-Young Kil · Noh-Hoon Myung

KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

#### Abstract

In this paper, a simulator for radar performance evaluation in a far-field test range is proposed, which can forecast maximum detection range, minimum detection range, number of test trials, resolution (range, azimuth, elevation) with input parameters before radar performance test and process results after. The proposed simulator is designed by Microsoft Foundation Class (MFC) of VC++ 6.0.

Key words : Radar, Performance Evaluation, Simulator, Detection, Resolution

#### I. 서 론

현재 국내에서 시행되고 있는 레이다 시험에는 시뮬레이터와 측정 장비를 이용한 부 체계 수준의 실내시험(1단계 시험)이 있고, 안테나 RF 방사와 실제 표적을 활용한 야외 체계시험(2단계 시험)이 있다. 실내 시험은 부 체계 이하의 개발단계에서 주로 활용되며 반복시험이 가능하나 안테나의 RF방사시험을 실시할 수 없으며, 야외 체계시험은 레이다 운용 환경에서 실제 표적을 사용하므로 시험의 신뢰성은 높으나 반복시험이 곤란하고 막대한 시험경비가 요구된다.

이런 제한 사항들을 극복하기 위한 방안 중에 하나가 전자시험장의 야외 레이다 시험방법이다. 전자시험장의 야외 레이다 시험방법은 안테나의 RF방사를 하면서 표적은 고가의 실제표적 대신에 모의표적을 사용하므로 반복시험이 가능하고, 실제 표적 사용 시의 시험경비를 절감할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 전자 시험장의 역할은 야외 레이다 시험을 통해 레이다 시험의 정확성과 신뢰성을 향상시켜 2단계의 야외 시험을 생략 또는 최소화하여 시험을 위한 시간과 비용을 절감시키는 것이다 [1].

이렇게 모의표적을 통한 야외 레이다 시험을 위해서는 여

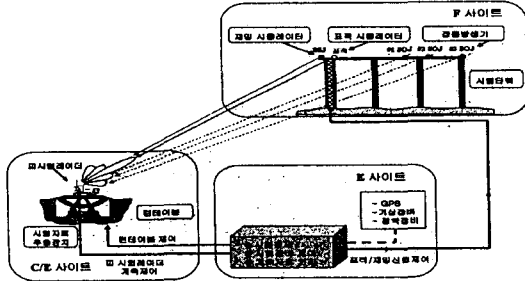
러 가지 구성장비 및 소프트웨어가 필요하다. 표적신호를 발생시키는 표적 시뮬레이터, 레이다의 대전자전 성능을 시험하기 위해 재밍 신호를 발생시키는 재밍 시뮬레이터, 잡음을 발생시키는 잡음 발생기, 시험자료 추출장치, 시험통제장치 및 광학장비, 모의표적을 3차원으로 묘사하기 위한 턴테이블, 그리고 마지막으로 측정한 데이터들을 처리하여 성능 파라미터와 특성을 Visual하게 보여줄 수 있는 시뮬레이터가 필요하다.

본 논문에서는 위에서 언급한 야외 레이다 시험을 위한 여러 구성요소 중 소프트웨어에 해당하는 분야로써, 레이다 성능 평가를 위해 데이터를 처리하고 각종 파라미터와 특성을 Visual하게 보여줄 수 있는 MFC 기반 시뮬레이터의 구현에 대해 기술하였다. 논문의 구성으로 본문에서 레이다 성능 파라미터에 대한 시험방법과 Numerical한 구현기법, 시뮬레이터 구현 및 결과(예상치/측정치)에 대하여 설명하였다.

#### II. 레이다 성능 파라미터 시험방법

(그림 1)의 레이다 시험평가 체계도에서 보는 바와 같이 실제 조건과 동일한 조건하에서 반복측정이 가능토록 Far-Field 조건을 만족하는 전자시험장에서 모의표적을 사용

하여 각종 레이더 성능 파라미터들을 측정하게 된다 [1].



(그림 1) 레이더 시험평가 체계도

레이더의 성능을 평가하기 위한 요소는 크게 탐지능력, 추적능력, 정확도, 분해능, 대전자전 성능으로 나뉜다. 탐지능력의 경우 최대 탐지거리와 최소 탐지거리를 구함으로써 레이더의 성능을 확인하게 되고 추적능력은 추적 가능한 최대 표적 수와 표적이 교차될 때 추적가능한지 여부 등에 대해 시험하게 된다. 정확도의 경우 표적에 대해 거리와 방위각, 고각, 속도에 대해 Bias error와 Noise error에 대해 측정하여 정확도를 평가하고 분해능은 표적 간의 거리, 방위각, 고각, 속도에 대해 서로 구분이 가능한 정도를 평가한다. 마지막으로 대전자전의 경우 표적에 대해 레이더가 운용되고 있을 경우 적 또는 아군의 재밍에 의한 감소효과를 평가한다.

이런 모든 성능평가들은 시행횟수와 관련이 있기 때문에 Bernoulli trials와 밀접한 관계가 있다. 따라서 특정 신뢰도( $P_c$ )와 탐지확률( $P_d$ )이 결정되면 시행횟수(M)를 식(1),(2)과 같이 결정할 수 있다.

$$M = \frac{4\epsilon_n^2 P_d (1 - P_d)}{L^2} \quad (1)$$

$$\epsilon_n = \arg\Phi\left(\frac{1 - \alpha}{2}\right) \quad (2)$$

예를 들어 시행횟수  $P_d=0.8$ , 신뢰도( $P_c$ )=90%( $\alpha=0.1$ ),  $L=0.05$ 일 경우  $\epsilon_n = \arg\Phi\left(\frac{0.9}{2}\right) = 1.65$ 이므로 식(1)에 의해  $M = \frac{4 \cdot 1.65^2 \cdot 0.8 \cdot (1 - 0.8)}{0.05^2} = 696.96$ 이며 횟수는 정수이므로 697회가 된다 [2].

### 2-1 최대/최소 탐지거리

최대 탐지거리와 최소 탐지거리는 레이더의 입력 파라미터로부터 시험평가 전에 대략적으로 예상할 수 있는 성능 파

라미터이다. 최대 탐지거리는 특정  $P_d$ 와  $P_{fa}$ 가 결정되면 식(3)과 같은 실험공식에 의해 non-fluctuating target에 대한 SNR값을 구할 수 있다 [3].

$$SNR_{max} = a + 0.12ab + 1.7b \quad (3)$$

where  $a = \ln[0.62/P_{fa}]$  and  $b = \ln[P_d/(1 - P_d)]$

그리고 레이더 방정식으로부터 식(4)와 같이 최대탐지거리를 유도할 수 있다.

$$R_{max} = \left\{ \frac{P_t f_r T_i G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 B F L SNR_{max}} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

여기서

- $P_t =$  transmitted power (W)
- $B =$  receiver bandwidth (Hz)
- $F =$  system noise figure
- $k =$  Boltzman's constant ( $1.38 \times 10^{-23} J/^{\circ} K$ )
- $T_0 =$  standard temperature ( $290^{\circ} K$ )
- $f_r =$  PRF (Hz)       $T_i =$  dwell time (sec)
- $G =$  antenna gain       $\lambda =$  wave length (m)
- $\sigma =$  RCS of target ( $m^2$ )       $L =$  system loss

또한 안테나 이득을 구해야 하는데 안테나 이득은 식 (5)와 같이 구할 수 있다 [3].

$$G = 10^{(0.1 \cdot G_{wdB})} \quad (5)$$

- Gain  $G_{wdB} = G_{dB} - 2GL_{loss}$
- Gain Loss (dB) :  $GL_{loss}$  (weighting function)
- Gain  $G$  (in dB)  $G_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(G_0)$
- Gain for uniform distribution :  $G_0$   
 $= 1.4 \cdot D_{AZ} \cdot D_{EL} \cdot 10000$
- antenna size in elevation :  $D_{EL}$
- antenna size in azimuth :  $D_{AZ}$

이제 최대탐지거리  $R_{max}$ 에서의  $SNR_{max}$ 를 알 수 있으므로 모든 거리에서의 SNR 값을 알 수 있다면 거리에 관한 모든 구간에서의 탐지확률을 예상할 수 있다.

$$P_d = \int_{v_r}^{\infty} \frac{r}{\psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\psi^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\psi^2}\right) dr \quad (6)$$

식(6)에서  $A$ 는 amplitude이고 power는  $A^2/2$ 이며  $SNR = A^2/2\psi^2$ ,  $(V_T^2/2\psi^2) = \ln(1/P_{fa})$  이므로 다시 정리하면 식(7)이 된다 [4].

$$P_d = \int_{\sqrt{2\psi^2 \ln(1/P_{fa})}}^{\infty} \frac{r}{\psi^2} I_0\left(\frac{rA}{\psi^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\psi^2}\right) dr$$

$$= Q\left[\sqrt{\frac{A^2}{\psi^2}}, \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)}\right] \quad (7)$$

여기서  $Q$ 는 Marcum's Q-function이며 식(7)은 식(8)에서 보는 바와 같이 Parl's algorithm을 적용하여 numerical integration technique을 통해 쉽게 계산할 수 있다 [5].

$$Q[a, b] = \begin{cases} \frac{\alpha_n}{2\beta_n} \exp\left(-\frac{(a-b)^2}{2}\right) & a < b \\ 1 - \left(\frac{\alpha_n}{2\beta_n} \exp\left(-\frac{(a-b)^2}{2}\right)\right) & a \geq b \end{cases} \quad (8)$$

여기서

$$\alpha_n = d_n + \frac{2n}{ab} \alpha_{n-1} + \alpha_{n-2}$$

$$\beta_n = 1 + \frac{2n}{ab} \beta_{n-1} + \beta_{n-2}$$

$$d_{n+1} = d_n d_1$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} 1 & a < b \\ 0 & a \geq b \end{cases}$$

$$d_1 = \begin{cases} a/b & a < b \\ b/a & a \geq b \end{cases}$$

초기값  $\alpha_{-1} = 0.0$ ,  $\beta_0 = 0.5$ ,  $\beta_{-1} = 0.0$  이고  $\beta_n > 10^p$  이 될 때까지 반복해서 계산되며 이때  $p > 3$ 을 만족하면 된다. 그리고 최대 탐지거리  $R_{max}$ 를 기준으로 임의의 거리에서의 SNR 값을 구하는 식은 식(9)와 같다.

$$(SNR)_R = (SNR)_{R_{max}} + 40 \log \frac{R_{max}}{R} \quad (9)$$

따라서 거리  $R$  과  $P_d$ ,  $P_{fa}$ ,  $SNR$  간의 관계식을 구하였으므로 가장 이상적인 조건하에서 모든 거리에 대한  $P_d$  값을 예측 가능하다. 뒤에서 다시 언급하겠지만 위에서 제시한 과정은 시뮬레이터에서 기본 입력 파라미터를 통해 최대탐지거리 및 거리별 탐지확률에 대한 예상치를 구할 때 사용된다.

최소 탐지거리 또한 식(10)과 같이 성능시험 전에 예측 가능하다.

$$R_{min} = c(\tau_T + \tau_M) / 2 \quad (10)$$

여기서

$c$  = the velocity of light

$\tau_T$  = the transmit pulse width

$\tau_M$  = the greater of  $\tau_D$  and  $\tau_A$

$\tau_D$  = the duplexer recovery time

$\tau_A$  = the recovery time of the phase shifters

### 2-2 탐지 정확도(거리, 방위각, 고각, 속도)

탐지 정확도 시험은 실제 거리, 방위각, 고각, 속도에 대한 레이더의 탐지 정확도를 측정하는 것으로 레이더 시스템의 calibration 오차나 내부 손실로 인해 발생하는 Bias error와 레이더 신호에 섞여 들어오는 Noise와 측정환경의 변화로 인해 발생하는 Noise error를 측정하게 된다. 시행횟수는 식(1),(2)에 의해 결정된다. 시험 시에 탐지확률을 결정하게 되는데 적어도 0.9 이상의 확률을 갖게 되는 거리, 방위각, 고각, 속도를 결정하여 비교적 안정된 탐지확률을 갖도록 해야 한다. 즉, 최대 탐지거리/방위각/고각/속도 보다는 작게 설정한다.

거리 정확도의 경우 시행횟수가 결정되면 식(12), (14)에 의해 Bias error와 Noise error를 구하게 된다.

$$\hat{R} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_i \quad (11)$$

$$b_R = R_0 - \hat{R} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_R^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (R_i - \hat{R})^2 \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_R = \sqrt{\hat{\sigma}_R^2} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (R_i - \hat{R})^2} \quad (14)$$

여기서

$R_0$  = real value  $b_R$  = Bias error

$\hat{\sigma}_R^2$  = variance of noise error

$\hat{\sigma}_R$  = rms value of noise error

방위각, 고각, 속도 정확도의 시험도 거리 정확도와 동일한 방법으로 결정된다.

### 2-3 탐지 분해능(거리, 방위각, 고각, 속도)

탐지 분해능의 시험은 분리된 두개의 모의 표적을 가지고 거리, 방위각, 고각, 속도 상에서 분리된 표적으로 탐지 가능한 한계를 측정하는 것으로써 거리와 방위각, 고각 분해

능은 식(15), (16)에서와 같이 시험 전에 입력 파라미터에 의해 분해능 값을 예측하게 된다.

$$\begin{aligned} \delta_R &= c\tau/2 \\ \delta_R &= c\tau_c/2 \\ \delta_R &= c/(2B) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$\tau = \text{pulse width (no compression)}$

$\tau_c = \text{compressed pulse width}$

$B = \text{echo waveform's bandwidth}$

$$\delta_\beta \approx \theta_{3EL} \quad (16)$$

$$\delta_\gamma \approx \theta_{3AZ}$$

여기서

$\theta_{3EL} = 3dB \text{ beamwidth (elevation)}$

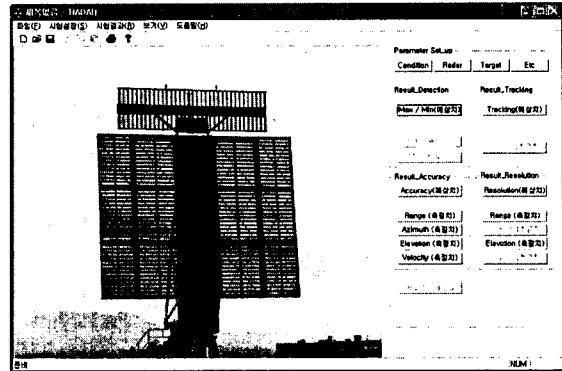
$\theta_{3AZ} = 3dB \text{ beamwidth (azimuth)}$

측정 시행횟수는 식(1),(2)에 의해 결정되며 추적성능과 대전자전 성능 또한 시행횟수에 의해 측정되고 데이터를 처리한 후 시뮬레이터에서 visual하게 측정결과를 표시해준다.

### III. 시뮬레이터의 설계 및 구현

(그림 2)의 레이더 성능평가 시뮬레이터는 MFC 기반으로 설계되었으며 입력 파라미터는 시험조건 창, 레이더 제원 창, target 제원 창으로 구성되어있다. 시험결과 창은 크게 4분야로써 detection, tracking, resolution, accuracy part로 구분되어있다. 각 결과 창은 예상치와 측정치로 나뉘며 시험 전 입력파라미터를 통해 예상치를 알 수 있고 측정 후에는 데이터를 처리하여 각 성능 파라미터별 결과를 제시한다. 측정 결과에 대한 데이터는 데이터 추출장치로부터 정해진 시행횟수 만큼 측정이 이루어지고 난 후 텍스트 파일 형식으로 전송을 받아서 처리하도록 프로그램을 설계하였다. 아직은 하드웨어와의 연동을 통한 측정은 하지 못한 상태이며 이후의 측정결과는 기존에 측정되었던 데이터[1]에 기초하여 시뮬레이션한 결과이다.

(표 1)과 같이 시험조건 설정 창에서는 탐지확률, 오경보율, 신뢰도 수준, system loss, sampling rate, noise figure 등을 입력하고 레이더 제원 설정 창에서는 transmitted power, bandwidth, wave length, Pulse Repetition Frequency(PRF), pulse width, dwell time, pulse number of integration 등을 입력한다. 표적제원 설정 시에는 radar cross section (RCS), target의 방위각/고각 정렬 각도, 속도 등을 입력한다.



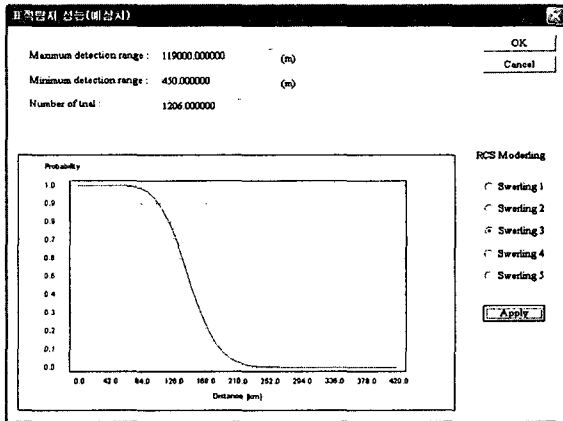
(그림 2) 레이더 성능평가 시뮬레이터 메인화면

(그림 3)은 (표 1)의 파라미터 값을 적용하여 식(3)~(10)의 과정을 거쳐 레이더의 최대/최소 탐지거리, 시행횟수, 거리별 탐지확률을 구한 예상치 (swerling 3 적용)이다. 표적탐지 성능(예상치) 창에서 RCS 모델링 (swerling 1~5)에 따른 최대탐지 거리의 변화와 거리별 탐지확률을 확인 가능하다. 예상되는 최대탐지거리는 119km, 최소 탐지거리는 450m가 되며 기준탐지확률 0.8과 신뢰도 수준 0.97을 만족하기 위한 측정 시행횟수는 1,206회가 된다. RCS 모델링은 swerling 1~5 모델을 적용하였다.

(표 1) 적용된 입력 파라미터

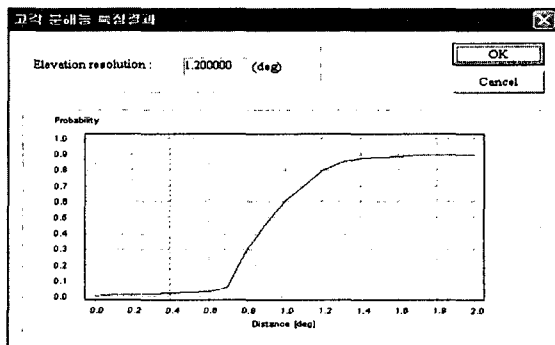
시험조건 입력 파라미터			
$P_d$	0.8	$P_c$	0.97
$P_{fa}$	1e-006	sampling rate	0.05
noise figure	10 dB	system loss	10 dB
size of SS_elevation	2	size of SS_azimuth	2
레이더 제원 입력 파라미터			
$PW_t$	100000 W	$B$	2000000 Hz
wave length	0.03 m	$PRF$	37500 Hz
pulse width	1e-006 sec	dwell time	0.0036 sec
Az_BW	1°	El_BW	1°
duplexer recovery time	1e-006 sec	recovery time of phase shifter	2e-006 sec
gain loss	1.1 dB	pulse number	1
표적 제원 입력 파라미터			
RCS	1 m <sup>2</sup>	velocity	3000 m/sec
azimuth of target	-45°, 0°, 45°	elevation of target	-45°, 0°, 45°

고각방향으로 임의의 두 표적에 대한 분리 탐지 가능여부를 시험하는 고각 분해능 측정결과(매 각도별 측정시행횟수 1,200회)는 (그림 4)와 같으며 기준 탐지확률( $P_d=0.8$ )에 의한 고각 분해능 값은 1.2° 이었다.



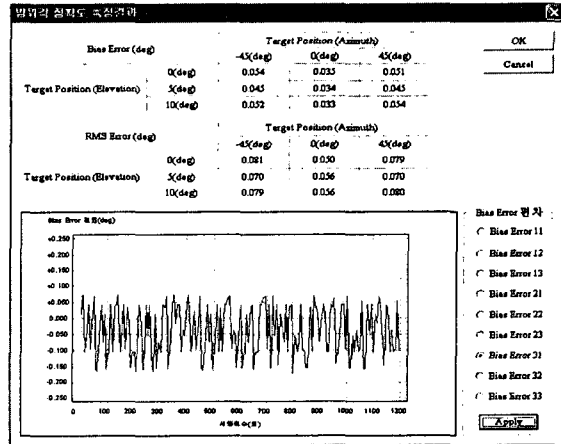
(그림 3) 최대/최소 탐지거리 예상치(swerling 3 적용)

정확도 측정결과는 거리, 방위각, 고각, 속도에 대해 측정을 실시하게 되는데 그중에서 방위각 정확도 측정결과를 그림 5에 제시하였다. 방위각 정확도 측정은 레이더와 표적 간 위치설정에 있어서 표적의 방위각을  $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ 로 변화시키고 고각은  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ 로 변화시키면서 측정하여 총 9가지의 결과를 도출하였다. 방위각과 고각 설정은 시험 전 결정하여 측정할 수 있다. 측정 시행횟수는 1,200회이며 real value에 대한 bias error 편차를 그래프에 도시하였다. (그림 5)에서 위에 제시된 표는 bias error 편차들의 평균값을 의미하고 아래 표는 식(14)을 적용하여 계산한 root mean square(RMS) error 값을 의미한다. 그림에서 보듯이 bias error값은 0.33~0.54의 범위를 갖고 RMS error 값은 0.050~0.081의 범위를 갖는다. 제시된 그래프는 9가지 측정결과 중에서 bias error31, 즉 표적의 고각이  $10^\circ$ , 방위각이  $-45^\circ$ 인 경우 1,200회에 대한 각각의 bias error 편차를 표시한 것이다.



(그림 4) 고각 분해능 측정결과

요약하자면, 지금까지 레이더 성능평가를 위한 각종 레이더 성능 파라미터와 시뮬레이터의 설계에 어떻게 적용 되었으며 특정 입력파라미터에 의한 결과 값 및 그래프가 어떻게 구현되는지 알아보았다.



(그림 5) 방위각 정확도 측정결과

#### IV. 결론

본 논문은 야외 레이더 시험을 위한 레이더 성능평가 시뮬레이터를 제안하고 있다. 제안된 시뮬레이터는 레이더 성능시험 전 최대/최소 탐지거리, 시행횟수, 분해능(거리, 방위각, 고각) 등은 입력 파라미터를 통해 예측치를 제시해주고 성능시험 후에는 데이터를 처리하여 성능 파라미터를 visual 하게 제시해주는 것이 특징이다. 지금까지 레이더의 성능평가를 위한 시험이 실내시험 수준에 머물고 있었지만 현재 여러 분야에서 야외 레이더 시험시스템 구축 마련을 위한 많은 노력을 기울이고 있는 것으로 알고 있다. 앞으로 야외 레이더 시험 시스템이 구축될 경우 좀더 발전시키면 하드웨어와 접목되어 활용이 가능하다고 본다.

**Acknowledgement :** 본 연구는 국방과학연구소(ADD)의 연구비 지원하에 KAIST 전파탐지 특화연구센터(RDRC)에 의해 연구가 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] 이원길, "전자시험장의 레이더 시험체계를 활용한 대전자전 연구방안", 국방과학연구소, 2004.12.
- [2] M. Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1990.
- [3] M. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 2001.
- [4] B. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Chapman&Hall/CRC, Boca Raton, Florida, 2000.
- [5] Parl, S., "A New Method of Calculating the Generalized Q Function", *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. IT-26, No. 1, pp.121-124, January 1980.

**M E M O**