

잡음재밍 효과에 대한 정량적 분석 기법

A Technique for the Quantitative Analysis of the Noise Jamming Effect

김성진* 강종진**
Kim, Sung-Jin Kang, Jong-Jin

ABSTRACT

In this paper, a technique for the quantitative analysis of the noise jamming effect is proposed. This technique based upon the mathematical modeling for noise jammers and the probability theory for random processes analyses the jamming effect by means of the modeling of the relationship among jammer, radar variables and radar detection probability under noise jamming environment. Computer simulation results show that the proposed technique not only makes the quantitative analysis of the jamming effect possible, but also provides the basis for quantitative analysis of the electronic warfare environment.

주요기술용어(주제어) : Noise Jammer Modeling, Radar Detection Probability, Quantitative Analysis, Radar Variables, Noise Jamming Effect

1. 머리말

현대전은 전자전이라 할 수 있을 만큼 전자전은 중요한 위치를 점하고 있으며, 1991년의 걸프전 및 최근의 이라크전을 통해 전자전의 능력과 중요성이 입증되었다.

현대전에 있어 함정에 위협을 줄 수 있는 가장 큰 요소는 의심할 여지없이 항공기나 대함유도탄과 같은 대공위협이다. 특히 대함유도탄은 통신전자기술의 발전과 항공역학의 발달로 초고속화, 스텔스화 및 장사정화 되고 있어 유도탄에 의한 공격체계와 유도탄에 대한 방어체계가 전자전의 핵심을 이루게 되었다. 함

정은 이러한 대공위협으로부터 피탐률을 줄이고 대응시간을 확보하여 생존성을 향상시키기 위해 재밍(jamming)을 가하거나 함정의 스텔스화, 즉 RCS를 감소하고 있는 추세이다.

본 논문에서는 잡음재밍 환경하에서의 레이더 방정식을 이용하여 SOJ(stand-off jammer), ESJ(escort stand-off jammer), SSJ(self-screen jammer)와 같은 다양한 잡음재머(noise jammer)를 모델링하고, 이를 통하여 각 잡음재밍 환경하에서의 주요 레이더 및 재머 변수들에 따른 레이더의 탐지확률 변화를 수치적으로 계산함으로써 잡음재밍 효과를 정량적으로 분석할 수 있는 기법을 제안한다. 이 기법은 전자전 환경을 해석하는데 기초를 제공할 수 있을 것이다.

† 2005년 7월 12일 접수~2005년 11월 21일 게재승인

* 동명정보대학교(TIT)

** (주)정우이엔지(JungwooEng Co., Ltd.)

주저자 이메일 : sjkim@tit.ac.kr

2. 잡음재밍 환경하에서의 레이더 모델링

가. 잡음재머 모델링

잡음재밍에는 세가지 종류가 있다. 표적으로부터 먼거리에서 재머가 재밍을 가해 표적을 엄호하는 SOJ, 표적과 거의 같은 거리에서 재밍을 가해 표적을 엄호하는 ESJ, 그리고 자신을 보호하기 위해 표적 자체에 재머를 장착하여 재밍을 가하는 SSJ가 있다^[1~2].

레이더 시스템에서의 탐지거리는 신호 대 간섭(잡음)비를 계산하여 얻을 수 있다. 그러나 잡음재머가 출현할 경우 재머전력이 레이더 시스템의 잡음전력보다 훨씬 크게 된다. 따라서 잡음재밍 환경하에서의 표적의 탐지는 표적에코신호전력 대 재밍신호전력 비로써 결정된다. 점표적에 대한 표적에코신호 전력을 P_{Rt} 라 하면 다음과 같이 표현할 수 있다^[1~6,14].

$$P_{Rt} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^4 L_t L_r} \quad [W] \quad (1)$$

여기서, P_t 는 레이더의 송신전력, G 는 안테나 이득, λ 는 파장, σ 는 표적의 RCS, R_t 는 레이더에서 표적까지의 거리, 그리고 L_t 와 L_r 은 각각 송신손실과 수신손실을 나타낸다.

G_j 의 안테나 이득을 갖는 재머의 유효방사전력은 다음과 같이 W/MHz로 주어지며, J_d 로 표시한다^[1,9].

$$J_d = \frac{P_j G_j}{(BW)_j} \quad [W/MHz] \quad (2)$$

여기서, P_j 는 재머의 송신전력이고, $(BW)_j$ 는 재머의 송신대역폭이다. 이 재머가 재밍을 가할 때 레이더에 수신된 재머전력 P_{Rj} 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} P_{Rj} &= \frac{J_d G_s \lambda^2 (BW)_r}{(4\pi)^2 R_j^2 L_r} \quad [W] \\ &= \frac{P_j G_j}{4\pi R_j^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_s}{4\pi} \cdot \frac{(BW)_r}{(BW)_j} \cdot \frac{1}{L_r} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, R_j 는 레이더에서 재머까지 거리, $(BW)_r$ 은 레이더의 수신대역폭, G_s 는 주엽 또는 부엽의 이득을 나타내며 주엽의 경우 G_s 는 G 가 된다. 식 (3)에서 첫 번째 인자는 레이더 수신안테나에서의 재머 전력밀도이고, 두 번째 인자는 레이더 수신안테나의 유효개구면이며, 세 번째 인자는 재머 송신대역폭 대 레이더 수신대역폭의 비이다. 네 번째 인자는 재머와 관련된 전송손실(수신손실만 해당됨)을 나타내고 있다. 식 (3)은 $(BW)_r / (BW)_j$ 인자를 제외하면 통신시스템으로부터 얻을 수 있는 방정식과 동일하다. 표적에코신호 전력(식 (1))과 레이더에 유입된 재밍신호 전력(식 (3))을 이용해서 다음과 같이 표적에코신호전력 대 재밍신호전력 비 $TJSR$ (Target-to-Jammer Signal Ratio)을 구할 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} TJSR &= \frac{P_{Rt}}{P_{Rj}} \\ &= \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi L_t J_d (BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{G}{G_s} \right) \cdot \left(\frac{R_j^2}{R_t^4} \right) \end{aligned} \quad (4a)$$

$$= \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi L_t P_j G_j} \right) \cdot \left(\frac{(BW)_j}{(BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{G}{G_s} \right) \cdot \left(\frac{R_j^2}{R_t^4} \right) \quad (4b)$$

그러므로, 식 (4)는 잡음재밍 환경하에서 레이더를 모델링한 식이다. 식 (4a)을 관찰할 때 $TJSR$ 은 두 번째 인자인 주엽 대 부엽비에 비례하는 것을 알 수 있다. 즉, 부엽이 작을수록 $TJSR$ 은 커지기 때문에 탐지거리가 더 늘어나게 된다. 또한 $TJSR$ 은 R_j 의 제곱에 비례하고, R_t 의 4제곱에 반비례한다. 이것은 레이더에 재머와 표적이 동시에 접근해 올 때 표적에코신호 전력이 재밍신호 전력보다 빨리 증가한다는 것을 뜻한다.

식 (4)를 이용하여 재밍의 종류에 따라 다음과 같이 재머를 모델링 할 수 있다.

첫째, SOJ의 경우를 살펴보면 $G_s \neq G$, $R_t \neq R_j$ 이므로 $TJSR(SOJ)$ 는 식 (4)를 그대로 사용하면 된다. 즉,

$$TJSR(SOJ) = \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi P_j G_j} \right) \cdot \left(\frac{(BW)_j}{(BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{G}{G_s} \right) \cdot \left(\frac{R_j^2}{R_t^4} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_t} \right) \quad (5)$$

둘째, ESJ의 경우를 살펴보면 $G_s \neq G$, $R_t = R_j$ 이므로 식 (4)로부터 $TJSR(ESJ)$ 는 다음과 같다.

$$TJSR(ESJ) = \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi P_j G_j} \right) \cdot \left(\frac{(BW)_j}{(BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{G}{G_s} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_t^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_t} \right) \quad (6)$$

셋째, SSJ의 경우를 살펴보면 $G_s = G$, $R_t = R_j$ 이므로 식 (4)로부터 $TJSR(SSJ)$ 는 다음과 같다.

$$TJSR(SSJ) = \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi P_j G_j} \right) \cdot \left(\frac{(BW)_j}{(BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_t^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_t} \right) \quad (7)$$

지금까지 세 종류의 잡음재밍 환경하에서의 $TJSR$ 를 유도함으로써 잡음재머를 모델링하였다.

나. 잡음재밍 환경하에서의 Crossover Range 및 탐지거리

잡음재밍 환경하에서 레이더에 수신된 표적에코신호 전력과 재밍신호 전력이 같게 되는 거리, 즉 $TJSR$ 이 1이 되는 거리를 crossover range(또는 burnthrough range)라고 한다. 또한 간섭신호(재밍신호)에 추가해서 존재하는 각종 잡음신호) 환경하에서도 표적을 탐지할 수 있는 거리를 탐지거리(detection range)라고 한다. 여기서 crossover range를 R_C 로, 탐지거리를 R_D 로 표기할 때, SOJ 환경과 SSJ 환경하에서의 R_C 와 R_D 를 식 (5)와 (7)에서 각각 구해보면 다음과 같이 표현할 수 있다.

식 (5)에서 SOJ 환경하에서의 $R_{C(SOJ)}$ 와 $R_{D(SOJ)}$ 는

$$R_{C(SOJ)}^4 = \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi P_j G_j} \right) \cdot \left(\frac{(BW)_j}{(BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{G}{G_s} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_t} \right) \cdot R_j^2 \quad (8)$$

$$R_{D(SOJ)} = R_{C(SOJ)} / \sqrt{TJSR(SOJ)_{\min}} \quad (9)$$

이고, 식 (7)에서 SSJ 환경하에서의 $R_{C(SSJ)}$ 와 $R_{D(SSJ)}$ 는

$$R_{C(SSJ)}^2 = \left(\frac{P_t G \sigma}{4\pi P_j G_j} \right) \cdot \left(\frac{(BW)_j}{(BW)_r} \right) \cdot \left(\frac{1}{L_t} \right) \quad (10)$$

$$R_{D(SSJ)} = R_{C(SSJ)} / \sqrt{TJSR(SSJ)_{\min}} \quad (11)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 $R_{C(SOJ)}$, $R_{D(SOJ)}$ 및 $TJSR(SOJ)_{\min}$ 은 SOJ 환경하에서의 crossover range, 탐지거리와 표적 탐지를 위한 최소의 $TJSR(SOJ)$ 이며, $R_{C(SSJ)}$, $R_{D(SSJ)}$ 및 $TJSR(SSJ)_{\min}$ 은 SSJ 환경하에서의 crossover range, 탐지거리와 표적 탐지를 위한 최소의 $TJSR(SSJ)$ 이다.

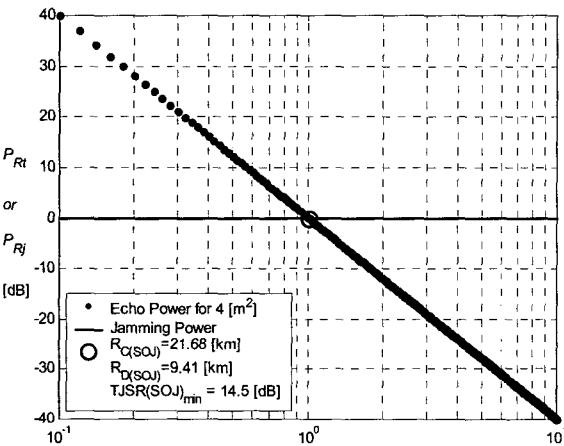
그림 1은 SOJ 환경과 SSJ 환경하에서의 표적에코신호 전력, 재밍신호 전력 및 거리에 대한 관계를 나타내며, 사용된 레이더와 재머들의 변수들은 아래와 같다.

- 레이더 변수 : $P_t=20$ [kW]
 $G=40.4$ [dB]
 $G_s=25.4$ [dB]
 $(BW)_r=0.5$ [MHz]
 $f=10$ [GHz]
 $B=1$ [MHz]
 $F=1.3$ [dB]
 $L_t=5$ [dB]
 $L_r=5$ [dB]
- 재머(SOJ) 변수 : $P_{j(SOJ)}=0.2$ [kW]
 $G_{j(SOJ)}=15$ [dB]
 $(BW)_{j(SOJ)}=100$ [MHz]

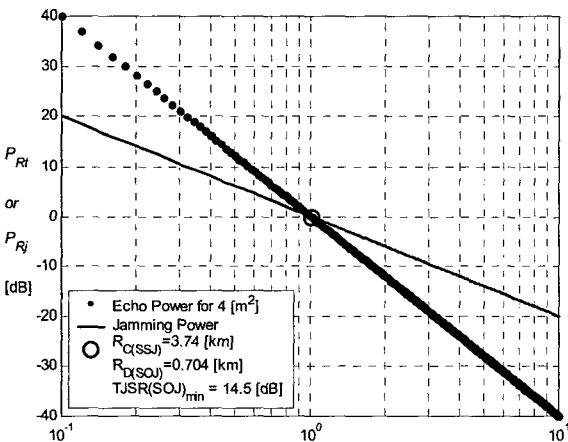
$$R_j = 100 \text{ [km]}$$

- 재머(SSJ) 변수 : $P_{j(SSJ)} = 0.05 \text{ [kW]}$
 $G_{j(SSJ)} = 5 \text{ [dB]}$
 $(BW)_{j(SSJ)} = 50 \text{ [MHz]}$
- 기타 변수 : $RCS = 4 \text{ [m}^2\text{]}$

여기서, f 는 송신주파수, B 와 F 는 각각 레이더 수신기내의 잡음대역폭과 잡음지수 이다.



[그림 1a] SOJ 환경하에서의 P_{Rt} , P_{Rj} 및 거리와의 관계



[그림 1b] SSJ 환경하에서의 P_{Rt} , P_{Rj} 및 거리와의 관계

3. 잡음재밍 환경하에서의 레이더의 탐지확률

본 장에서는 레이더 수신기에서 주어진 오경보확률 (probability of false alarm) P_{fa} 에 대한 탐지확률 (probability of detection) P_d 을 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio : SNR)의 함수로서 표현하고, 여기에 잡음재밍 환경하에서의 SNR 을 적용함으로써 잡음재밍 환경하에서의 레이더 탐지확률을 계산할 수 있는 수학적 모델을 제시한다. 이러한 수학적 모델식을 이용하여 잡음재밍 환경하에서의 재밍효과를 정량적으로 분석할 수 있다. 여기서, 오경보확률은 잡음이 탐지를 위한 임계레벨(threshold level)를 초과할 때 허위표적탐지가 발생하는 확률을 나타낸다.

가. 레이더의 오경보확률

잡음은 시간의 경과에 따라 불규칙하며 다양하게 나타나므로, 이러한 잡음신호를 랜덤 프로세스(random process)라고 한다. 잡음신호와 같은 랜덤 프로세스를 예측하기란 매우 어렵기 때문에 확률이론을 이용함으로써 이를 해결할 수 있다.

레이더 시스템에서 수신되는 잡음은 열잡음이 대부분이며, 이러한 잡음신호를 분석하기 위하여 확률밀도함수(probability density function)의 개념을 적용한다. 레이더 수신기의 IF 필터에 유입되는 잡음신호가 아래와 같이 표현되고, Gaussian 분포를 갖는다고 가정할 수 있다^[1,6].

$$n(t) = a(t)\cos[\omega_0 t + \theta(t)] \tag{12}$$

여기서, $n(t)$ 는 레이더 수신기에서의 잡음전압, $a(t)$ 는 시간 t 에 따른 포락선 크기, ω_0 는 반송주파수 [rad/sec], $\theta(t)$ 는 위상을 나타낸다.

그러므로 Gaussian 분포를 갖는 랜덤 잡음전압 $n(t)$ 에 대한 확률밀도함수는 $n(t)$ 의 평균값을 0이라고 가정할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right) \tag{13}$$

여기서, n 은 랜덤 잡음전압의 크기, σ_n^2 은 잡음전압

에 대한 분산이다. 만약 Gaussian 잡음이 협대역 IF 필터를 통과한다면 잡음전압의 크기는 Rayleigh 확률 밀도함수를 갖는다^[6,10,11].

$$p(a) = \frac{a}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_n^2}\right), (a \geq 0) \quad (14)$$

여기서, a 는 IF 필터 출력에서의 잡음의 포락선 크기이다. 잡음전압의 크기가 임계전압(threshold voltage) V_T 를 초과할 때마다 허위표적탐지가 발생하므로 오경보확률 P_{fa} 는 다음과 같다^[11~13].

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{a}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_n^2}\right) da = \exp\left(-\frac{V_T^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (15)$$

나. SNR에 따른 레이더의 탐지확률

탐지확률은 앞에서 논의된 오경보확률과 마찬가지로 확률이론을 바탕으로 유도할 수 있다. 표적에코신호는 레이더 수신기에서 잡음전압 신호와 합해지며 이렇게 혼합된 신호 역시 랜덤 프로세스가 되고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = r(t) + n(t) \quad (16)$$

여기서, $r(t)$ 와 $n(t)$ 는 각각 시간 t 의 함수로서 표적에코신호와 잡음신호를 나타낸다. 여러 가지 표적의 형태에 따라서 $r(t)$ 는 불규칙하게 변하지만, 지정된 표적에 대한 에코신호의 진폭은 아래와 같이 일정한 것으로 가정할 수 있다^[1,6,7].

$$r(t) = c \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (17)$$

여기서, c 와 ϕ 는 각각 표적에코신호의 진폭과 위상이다. 식 (16)은 식 (12)와 (17)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t) = c \cos(\omega_0 t + \phi) + a(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)] \quad (18)$$

랜덤 프로세스 $s(t)$ 의 크기는 다음과 같이 Ricean

(modified Rayleigh) 확률밀도함수로 표현될 수 있음이 알려져 있다^[1,6].

$$p(\hat{s}) = \frac{\hat{s}}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{\hat{s}^2 + c^2}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{c\hat{s}}{\sigma_n^2}\right), (\hat{s} \geq 0) \quad (19)$$

여기서, \hat{s} 는 표적에코신호+잡음신호 $s(t)$ 의 포락선 크기, $I_0(\cdot)$ 는 변형된 0차 Bessel 함수(modified (hyperbolic) Bessel function of zero order)이다^[6].

$s(t)$ 의 전압크기 \hat{s} 가 V_T 를 초과할 때마다 표적 탐지가 발생하므로 식 (19)의 확률밀도함수에서 탐지 확률 P_d 를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P_d = \int_{V_T}^{\infty} p(\hat{s}) d\hat{s} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{\hat{s}}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{\hat{s}^2 + c^2}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{c\hat{s}}{\sigma_n^2}\right) d\hat{s}, (\hat{s} \geq 0) \quad (20)$$

식 (20)에서

$$\begin{aligned} \frac{c^2}{2\sigma_n^2} &= \frac{(\text{signal amplitude})^2}{2(\text{rms noise voltage})^2} \\ &= \frac{2(\text{rms signal voltage})^2}{2(\text{rms noise voltage})^2} \\ &= \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} = \text{SNR} \end{aligned} \quad (21)$$

이므로, $\hat{s}/\sigma_n = y$ 로 치환하여 식 (20)을 정리하고 $V_T/\sigma_n = E_t$ 로 놓으면, 탐지확률 P_d 를 SNR의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_d = \int_{E_t}^{\infty} \frac{y}{\sigma_n} \exp\left(-\frac{y^2}{2} - \text{SNR}\right) I_0(\sqrt{2\text{SNR}} y) dy = \int_{E_t}^{\infty} y \exp\left(-\frac{y^2}{2} - \text{SNR}\right) I_0(\sqrt{2\text{SNR}} y) dy, (y \geq 0) \quad (22)$$

그러나, 식 (22)는 적분하기 어렵기 때문에 확률이

론의 성질에 의해 수치적 계산이 가능한 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

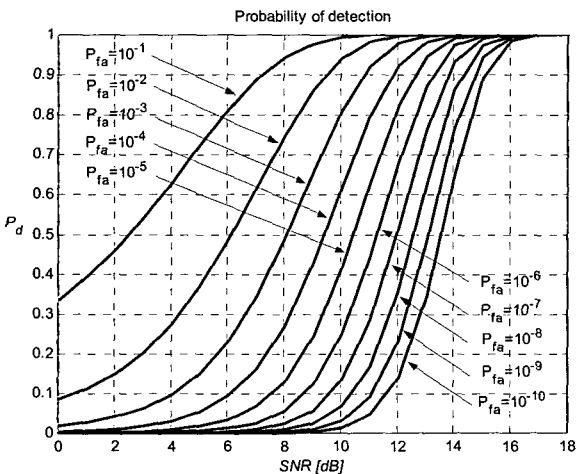
$$P_d = 1 - \int_0^{E_t} y \exp\left(-\frac{y^2}{2} - SNR\right) I_0(\sqrt{2SNR} y) dy, \quad (y \geq 0) \quad (23)$$

또한, 식 (15)로부터 P_{fa} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{fa} = \exp\left(-\frac{E_t^2}{2}\right) \quad (24)$$

따라서 식 (5), (6) 및 (7)로부터 $TJSR$ (잡음재밍 환경하에서 레이더의 SNR)을 구하고 임계전압 V_T 에 해당하는 오경보확률을 식 (15) 또는 식 (24)로부터 구하여 식 (23)에 적용함으로써 잡음재밍 환경하에서 레이더의 탐지확률을 계산할 수 있다. 즉, 잡음재밍 환경하에서의 재밍효과를 정량적으로 표현할 수 있다. 그림 2는 10^{-1} 부터 10^{-10} 까지 주어진 10개의 P_{fa} 에 대하여 SNR 과 P_d 의 관계를 나타낸 결과이다.

보통 레이더 수신기에서의 P_{fa} 는 10^{-6} 정도이며, 이 경우 0.99 이상의 탐지확률을 위해 요구되는 SNR 은 14.5dB 이상이어야 함을 그림 2에서 관찰할 수 있다.



[그림 2] SNR 과 P_d 의 관계

4. 잡음재밍 환경하에서의 재밍효과에 대한 정량적 분석

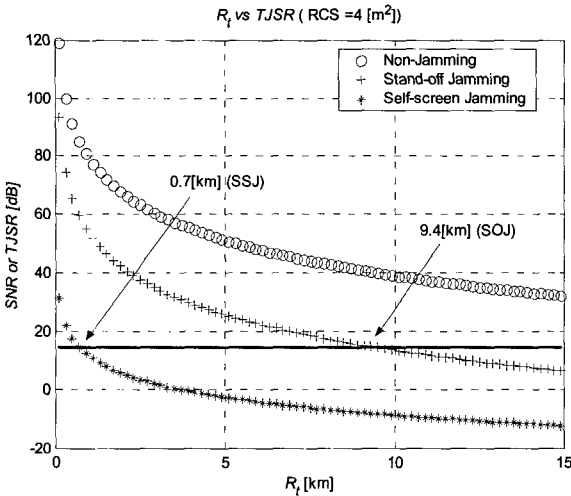
2장과 3장에서 전개한 관계식을 적용할 때 표적의 RCS , 표적과의 거리 R_t , 재머의 송신출력 P_j 등이 주어지면 SNR , 즉 잡음재밍 환경하에서의 $TJSR$ 을 계산할 수 있으며, 결국 SNR 의 함수인 탐지확률 P_d 를 식 (23) 및 (24)로부터 정량적으로 계산할 수 있다. 본 장에서는 이러한 관계식들을 이용하여 잡음재밍(SOJ 및 SSJ) 환경하에서의 주요 레이더 및 재머 변수들과 탐지확률과의 관계를 컴퓨터 시뮬레이션 한다. 또한 이들 시뮬레이션 결과를 정량적으로 분석해 보고자 한다.

가. 잡음재밍 환경하에서의 R_t 와 $TJSR$ 의 관계
 항공기 및 대함유도탄에 대한 함정의 대공위협방어 체계가 대공유도탄과 근접방어 무기체제로 구성되어 있고, 그 최대 유효사정거리가 각각 10km와 2km라고 가정하자. 대공표적이 최대 유효사정거리에 있다고 가정하고, 2장에서와 같은 레이더 및 재머 변수들을 적용할 때, 비교차원에서 잡음재밍이 없는 환경(non-jamming)을 포함하면 잡음재밍(SOJ 및 SSJ) 환경하에서의 R_t 와 $TJSR$ 의 관계는 그림 3과 같다.

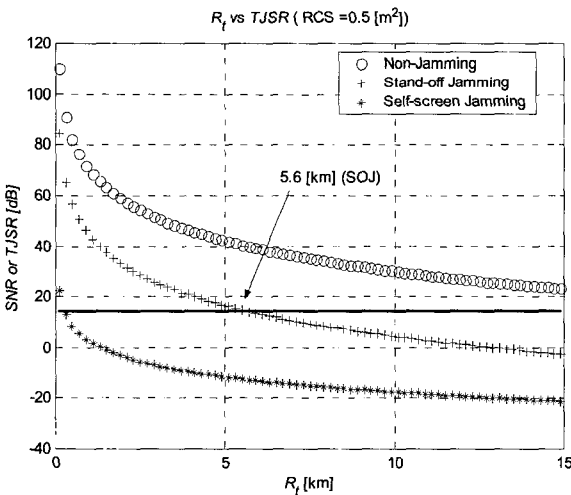
대함유도탄의 RCS 가 $0.5m^2$, 항공기의 RCS 가 $4m^2$ 이라고 가정할 때, 그림 3에서와 같이 SOJ, SSJ 환경하에서의 각 표적의 R_t 에 대한 $TJSR$ 의 정량적인 계산 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 NOJ는 Non-Jamming을 표시한다. 현재 대함유도탄 자체에서 재밍을 가하는 경우(SSJ)는 없는 것으로 판단되기 때문에 표 1에서 대함유도탄의 SSJ를 공란으로 두었다.

[표 1] 각 표적의 R_t 에 대한 $SNR(TJSR)$

종 류	항공기 ($RCS=4m^2$)		대함유도탄 ($RCS=0.5m^2$)		
	R_t	10km	2km	10km	2km
SNR or TJSR [dB]	NOJ	39.23	67.19	30.20	58.16
	SOJ	13.44	41.40	4.41	32.37
	SSJ	-8.55	5.43		



[그림 3a] R_t 와 $TJSR$ 의 관계($RCS=4m^2$)



[그림 3b] R_t 와 $TJSR$ 의 관계($RCS=0.5m^2$)

그림 3a는 항공기($RCS=4m^2$)의 경우로서, 굵은 실선은 잡음재밍 환경에서의 0.99의 탐지확률을 위해 요구되는 $TJSR$ 이 14.5dB가 되는 지점이다. 여기서 각각의 재밍환경에 대한 $TJSR$ 을 살펴보면, NOJ 환경에서는 탐지확률 0.99를 위해 요구되는 $TJSR$ 이 표적과의 거리가 15km 이상일 때에도 유지되므로 15km 이상에서도 표적의 탐지가 가능하다. SOJ 환경에서는 $TJSR$ 이 14.5dB가 되는 지점은 표적과의 거리가 9.4km일 때 이므로, 9.4km 이상일 때에는 표

적의 탐지가 곤란하다. SSJ 환경에서는 $TJSR$ 이 14.5dB가 되는 지점은 표적과의 거리가 0.7km 일 때 이므로, 표적이 0.7km 이내로 접근하지 않는 이상 표적의 탐지가 불가능하다.

그림 3b는 대함유도탄($RCS=0.5m^2$)의 경우이다. 항공기와 마찬가지로 NOJ 환경에서는 15km 이상에서도 표적의 탐지가 가능하다. 그러나 SOJ 환경에서는 $TJSR$ 이 14.5dB가 되는 지점은 표적과의 거리가 대략 5.6km 이므로, 5.6km 이상일 때는 표적의 탐지가 곤란함을 알 수 있다.

나. 잡음재밍 환경하에서의 R_t 와 P_d 의 관계

레이더 및 재머 변수들이 앞 절과 동일할 때, SOJ 및 SSJ 잡음재밍 환경하에서의 레이더에서 표적까지의 거리 R_t 와 레이더의 탐지확률 P_d 의 관계는 그림 4와 같다.

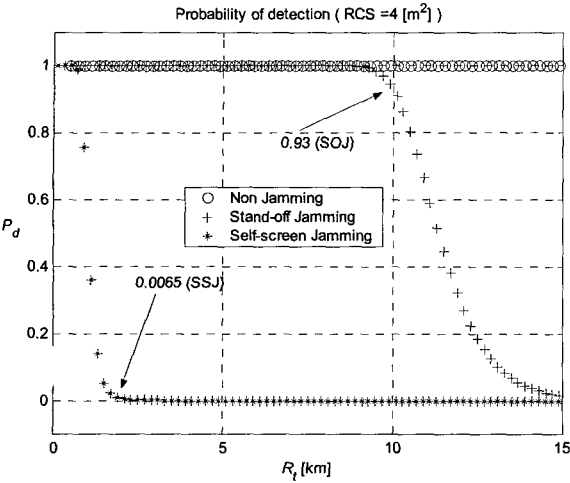
동일한 표적에 대해 SOJ 및 SSJ 환경하에서의 탐지확률 P_d 가 표 2에 나타나 있다.

그림 4a는 RCS 가 $4m^2$ 인 항공기의 경우로서, 표적이 레이더로부터 10km 떨어진 경우 NOJ 환경에서는 탐지확률이 1.0으로서 탐지가 가능하고, SOJ 환경에서는 탐지확률이 0.93으로 적어짐을 알 수 있다. SSJ 환경에서는 3.8×10^{-6} 으로서 탐지가 불가능함을 알 수 있다. 레이더로부터 2km 떨어진 경우 NOJ, SOJ 경우는 탐지확률이 모두 1.0이나 SSJ 인 경우 0.0065로서 여전히 탐지가 불가능함을 알 수 있다.

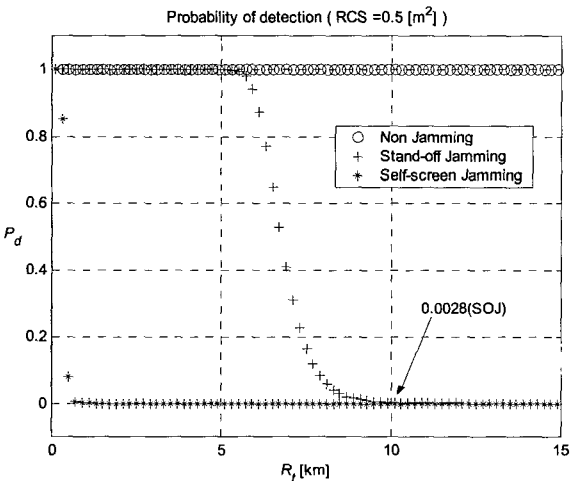
그림 4b는 RCS 가 $0.5m^2$ 인 대함유도탄의 경우이다. 여기서 표적이 레이더로부터 10km 떨어진 경우, NOJ 환경에서는 탐지확률이 1.0이나 SOJ 환경에서는 0.0028로 탐지가 불가능하다. 레이더로부터 2km

[표 2] 각 표적의 R_t 에 대한 P_d

구 분	항공기 ($RCS=4m^2$)		대함유도탄 ($RCS=0.5m^2$)		
	R_t	10km	2km	10km	2km
P_d	NOJ	1.0	1.0	1.0	1.0
	SOJ	0.93	1.0	0.0028	1.0
	SSJ	3.8×10^{-6}	0.0065		



[그림 4a] R_t 와 P_d 의 관계($RCS=4m^2$)



[그림 4b] R_t 와 P_d 의 관계($RCS=0.5m^2$)

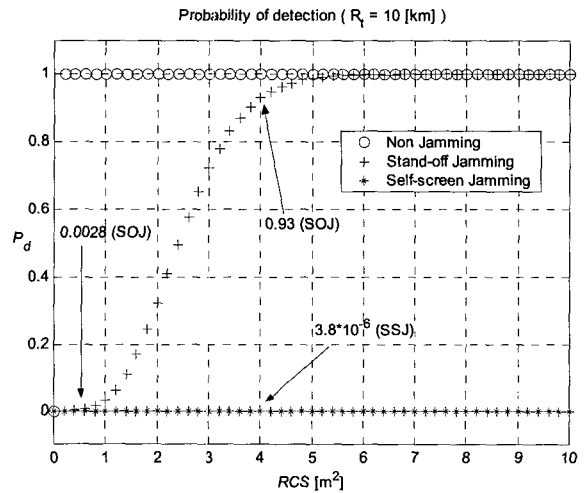
떨어진 경우 마찬가지로 NOJ환경에서는 1.0이고 SOJ 환경에서도 1.0이므로 NOJ, SOJ 환경에서 모두 탐지가 가능하다.

다. 잡음재밍 환경하에서의 RCS 와 P_d 의 관계 레이더 및 재머 변수들이 앞 절과 동일할 때, SOJ 및 SSJ 잡음재밍 환경하에서의 RCS 와 P_d 의 관계는 그림 5와 같다.

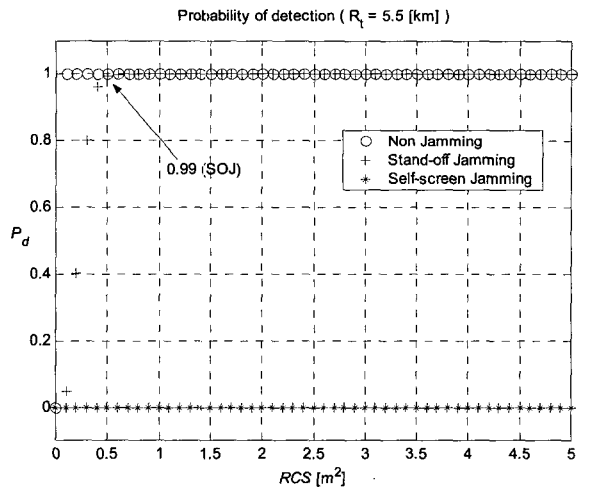
앞 절과 동일한 표적에 대해 SOJ 및 SSJ 환경하

[표 3] 각 표적의 RCS 에 대한 P_d

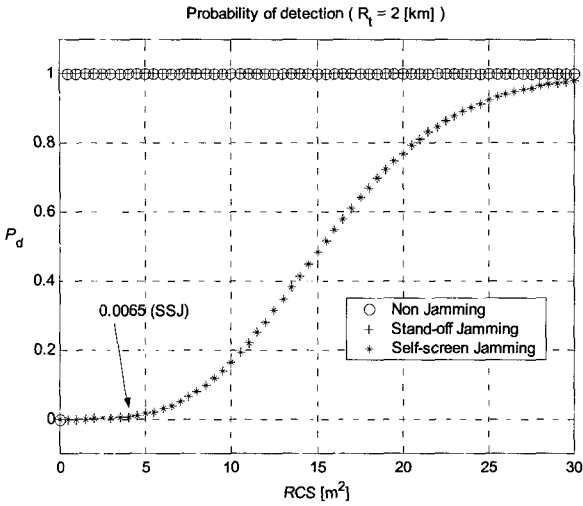
구분	항공기 ($RCS=4m^2$)			대함유도탄 ($RCS=0.5m^2$)			
	R_t [km]	10	5.5	2	10	5.5	2
P_d	NOJ	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	SOJ	0.93	1.0	1.0	0.0028	0.99	1.0
	SSJ	3.8×10^{-6}	1.1×10^{-4}	0.0065			



[그림 5a] RCS 와 P_d 의 관계($R_t=10km$)



[그림 5b] RCS 와 P_d 의 관계($R_t=5.5km$)



[그림 5c] RCS와 P_d 의 관계($R_t=2\text{km}$)

에서의 탐지확률 P_d 가 표 3에 나타나 있다.

그림 5에서와 같이 SOJ 및 SSJ 환경하에서의 탐지확률이 크게 차이가 나는 이유는 재밍 환경하에서의 $TJSR$ 의 차가 크기 때문이다. 3장에서와 같이 레이더의 수신기가 0.99 이상의 탐지확률에서 탐지가 가능하다고 가정하자.

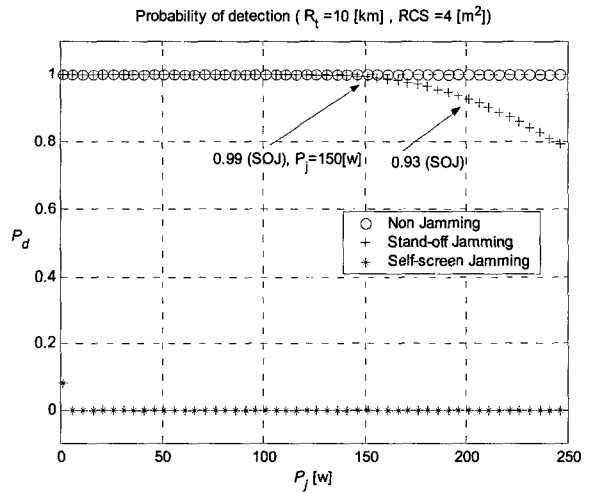
그림 5a에서 레이더로부터 10km 떨어진 대함유도탄인 경우, NOJ 환경하에서의 탐지확률은 1.0으로서 탐지가 가능하나, SOJ 환경하에서는 탐지확률이 0.0028로서 탐지가 불가능함을 알 수 있다. 또한 항공기의 경우 NOJ 환경하에서는 탐지확률이 1.0으로 탐지가 가능하나, SOJ 및 SSJ 환경에서는 탐지확률이 각각 0.93 및 3.8×10^{-6} 으로 작아져 탐지가 불가능함을 알 수 있다.

그림 5b를 관찰할 때 레이더로부터 5.5km 떨어진 표적에 대해 SOJ 환경하에서는 RCS가 0.1~0.5m²에서 탐지확률이 급격히 증가하여 RCS가 0.5m² 이상일 때는 탐지가 가능함을 알 수 있다. SSJ 환경하에서는 RCS가 0.1~5m² 정도까지 탐지확률의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 SSJ 환경하에서 탐지가 더욱 어렵다는 것을 의미하고, 이로부터 SOJ 보다는 SSJ 재밍효과가 더 큼을 알 수 있다.

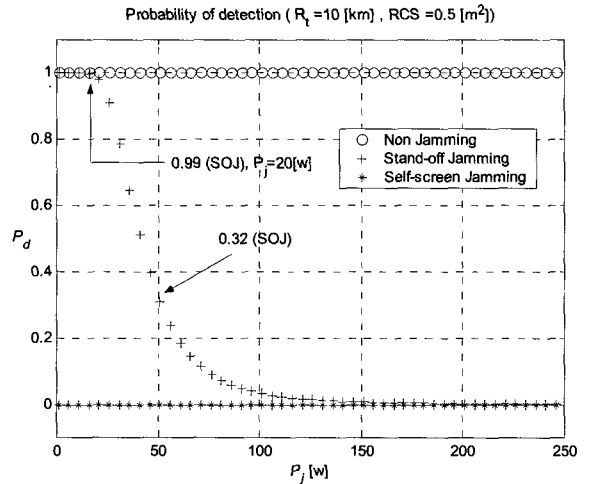
그림 5c에서 레이더로부터 2km 떨어진 항공기나 대함유도탄은 NOJ 및 SOJ 환경하에서 탐지확률이

모두 1.0으로서 탐지가 가능하나, SSJ 환경하에서의 항공기는 탐지확률이 0.0065 이하로 탐지가 불가능함을 알 수 있다.

라. 잡음재밍 환경하에서의 P_j 와 P_d 의 관계
잡음 재밍환경하에서의 재머의 재밍전력 P_j 와 탐지확률 P_d 의 관계는 그림 6과 같다. 앞 절에서와 마찬가지로 대함유도탄의 RCS를 0.5m², 항공기의 RCS를 4m²으로 가정하였다. 그리고 표적과의 거리 R_t 는



[그림 6a] P_j 와 P_d 의 관계($R_t=10\text{km}$, $RCS=4\text{m}^2$)



[그림 6b] P_j 와 P_d 의 관계($R_t=10\text{km}$, $RCS=0.5\text{m}^2$)

[표 4] 각 표적의 P_j 에 대한 P_d

구 분		항공기 ($RCS=4m^2$)		대함유도탄 ($RCS=0.5m^2$)	
R_t		10km		10km	
P_j		50w	200w	50w	200w
P_d	NOJ	1.0	1.0	1.0	1.0
	SOJ	1.0	0.93	0.32	0.0028
	SSJ	3.8×10^{-6}	1.53×10^{-6}		

10km로 고정하였으며 P_j 와 P_d 의 관계가 표 4에 나타나 있다.

그림 6a는 항공기의 경우로서 표적과의 거리가 10km이고, 재밍전력이 50w일 경우 NOJ, SOJ 환경에서는 탐지확률이 1.0으로서 탐지가 가능하나 SSJ 환경에서는 탐지가 불가능하다. 재밍전력이 150w 이상일 경우 SOJ 환경에서는 탐지확률이 0.99 이하로 감소되며, 200w 경우 탐지확률이 0.93으로 감소되어 탐지가 곤란함을 알 수 있다. 그림 6b는 대함유도탄의 경우이다. NOJ 환경에서만 탐지가 가능하며, SOJ 환경에서는 재밍전력이 20w 이하일 때는 탐지가 가능하며, 그 이상일 때는 탐지확률이 급격히 감소하여 탐지가 불가능함을 알 수 있다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과로부터 잡음재밍 환경하에서의 재밍효과를 살펴보면, 당연한 결과로서 재밍이 없는 경우보다 재밍이 있는 경우 탐지확률이 크게 낮아짐을 알 수 있다. 특히 SOJ 환경하에서보다 SSJ 환경하에서 탐지확률이 큰 차이로 낮게 되는 이유는 표적(항공기) 자체에 재머를 장착하여 재밍을 가하며 다가오므로 레이더 안테나에 수신되는 잡음전력이 SOJ 환경하에서보다 훨씬 크게 되기 때문이다.

따라서 SSJ 환경으로 재밍하는 것이 더 좋으나 실제로 항공기가 SSJ 환경으로 레이더에 가까이 접근하는 것은 큰 위험을 초래하여 곤란하므로, SOJ 환경으로 원거리에서 재밍하는 것이 바람직하다. 물론 이때 원거리 재밍을 위해 재머의 출력이 커야할 것이다. 현대 전자전에서는 입체적인 전력으로 전투에 임하므로 SSJ 환경은 실제 실현하기 어려울 것이다. 여

기서 SSJ 환경의 경우는 잡음재밍 효과를 해석하기 위해 극단적인 예를 들어본 것이다.

지금까지 재머 모델링과 확률이론을 연계시킴으로써 R_t , RCS , P_j 변화에 따른 잡음재밍효과의 분석이 가능함을 알 수 있었으며, 그 결과 아주 논리적이면서도 합리적인 잡음재밍효과 분석 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 분석결과는 전자전 환경 해석을 위한 기초를 제공할 수 있을 것이다.

이상의 결과를 종합해보면, 레이더의 탐지확률을 변화시키는 주요 변수들로는 표적의 RCS , 표적과의 거리 R_t , 재머의 재밍전력 P_j 등 모두 잡음재밍 환경하에서의 SNR , 즉 $TJSR$ 을 변화시키는 요인들이며, 이러한 변수들에 따라 변하는 $TJSR$ 이 레이더의 탐지확률을 결정짓는 주요 요소가 됨을 알 수 있다.

5. 맺음말

본 논문에서는 재머에 대한 수학적 모델링과 확률이론을 바탕으로 R_t , RCS , P_j 변화에 따른 재밍효과를 정량적으로 분석할 수 있는 기법을 제안하였다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 논리적이면서도 합리적인 재밍효과 분석 결과를 얻을 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 분석 기법이 전자전 환경의 정량적 해석을 위한 기초를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

이러한 연구 결과는 ECM 장비 및 레이더의 사양 결정, 작전능력에 합당한 유도탄 성능 결정 등 대공방어를 위한 무기체계 성능 결정에 적용할 수 있을 것이며, 또한 전자전 교리 발전에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2002학년도 동명정보대학교 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 연구비를 지원해 주신 학교 당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김성진 외 5명, “해상 전자전 환경분석 및 동적 조우 모델링 연구”, 연구결과보고서, 국방과학연구소, 1999.
- [2] B. Edde, RADAR: Principles, Technology, Applications, Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [3] S. A. Hovanessian, RADAR SYSTEM DESIGN and ANALYSIS, Artech House, Inc., 1984.
- [4] N. Levanon, Radar Principles, John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [5] D. K. Barton, Modern Radar System Analysis, Artech House, Inc., 1988.
- [6] J. L. Eaves & E. K. Reedy, PRINCIPLES OF MODERN RADAR, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987.
- [7] H. Deng, “Effective CLEAN Algorithm for Performance-Enhanced Detection of Binary Coding Radar Signals”, IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 52, Vol. 1, pp.72~78, Jan. 2004.
- [8] M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, Inc., 1980.
- [9] R. N. Lothes, M. B. Szymanski and R. G. Wiley, Radar Vulnerability to Jamming, Artech House, Inc., 1990.
- [10] P. Z. Peebles, Jr., Probability, Random Variables, and Random Signal Principles, McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [11] A. Papoulis, Probability and Statistics, Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [12] S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory, Prentice-Hall, Inc., 2003.
- [13] B. J. Yoon and P. P. Vaidyanathan, “A Multirate DSP Model for Estimation of Discrete Probability Density Functions”, IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 53, Vol. 1, pp. 252~264, Jan. 2005.
- [14] 김성진, 강종진, “표적 환경조건에 따른 레이더 모델링 연구”, 연구보고서, 동명정보대학교, 2003.