

자율적으로 결정한 대응기법의 운용효과도 설계☆

Designing Operational Effectiveness of Autonomously Decided Countermeasures

박 소 령* 박 헌 우** 하 지 수*** 최 채 택**** 정 운 섭***** 노 상 옥*****
So Ryoung Park Hunwoo Park Jisu Ha Chaetaek Choi Unseob Jeong Sanguk Noh

요 약

통합 전자전 환경에서 항공기는 위협에 대한 최적의 대응기법을 선정하여 생존률을 높이는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 모의 전자전 환경에서 지정된 경로를 따라 이동하는 항공기가 위협을 확인하고 확인된 위협에 대하여 사용하는 대응기법의 예상 성공확률을 모델링하며, 자율적으로 대응기법을 결정하는 방법론을 제안한다. 이와 같이 자율적으로 결정한 대응기법의 운용효과도를 정량적으로 설계하며, 예제 시나리오에서 어떻게 운용효과도를 계산할 수 있는지를 나타낸다. 제안한 방법론을 검증하기 위한 실험에서 다양한 위협에 대하여 대응기법이 성공할 확률과 자율적으로 결정한 대응기법의 질적인 수준에 대한 비교를 수행하였다. 비교실험에서 제안한 방법론에 의한 대응기법의 결정이 대응기법을 임의로 선택한 전략보다 약 12% 높게 나타났음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

It is indispensable that aircrafts in electrical warfare settings endeavour to improve their survivability by selecting optimal countermeasures against threats. In this paper, we model the successful probabilities of aircraft survivability equipments that remove threats encountered, and also propose a framework for the aircrafts to autonomously decide their countermeasures. And then, we design the operational effectiveness of the aircraft survivability equipments, and quantitatively formulate the operational effectiveness into the form of reduction in lethality (RL). We actually show how the operational effectiveness can be computed in simulated example scenarios. To verify our framework proposed in this paper, we experimented with the successful probabilities of aircraft survivability equipments and the autonomous decision-making against threats in various electronic warfare settings. In the experiments, it turns out that our agents outperform the agents that randomly choose their countermeasures, which is 12% more efficient in their performance.

☞ keyword : 통합전자전 환경(Electrical Warfare Setting), 대응기법이 성공할 확률(Successful Probabilities of Countermeasures), 대응기법의 결정 및 운용효과도(Selecting Optimal Countermeasures and Their Operational Effectiveness)

1. 서 론

복잡한 전장상황에서 제공권의 장악은 전장의 승패를

좌우한다. 제공권 장악을 위한 전투기의 운용은 현대전에서 기본이며, 전투기의 생존성을 보장하는 것이 제공권 장악의 핵심이다. 전투기가 다양한 위협에 대응하며 자체 생존성을 증대시키기 위해서는 다양한 위협경보장비와 대응장비 등의 생존장비를 효과적으로 운용할 수 있어야 한다 [1, 2]. 이 논문에서는 적군의 다양하며 복잡한 위협이 존재하는 통합전자전 상황에서 항공기의 생존을 위한 대응기법이 성공할 확률과 대응기법의 예상 유틸리티(Expected Utility)를 계산하는 방법을 제시하여 항공기가 자율적으로 대응기법을 결정할 수 있도록 한다 [3-5]. 또한, 통합전자전 생존장비를 장착 운용하는 전투기의 생존성을 극대화하기 위하여 통합전자전 생존장비의 운용효과도를 계산하는 방법을 제안한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위협에 대한 항공기의 자율적인 대응기법을 결정하는 방법론을 설명한다. 3장에서는 대응기법에 따른 운용효과도를 추정하

* 정 회 원 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 교수
srpark@catholic.ac.kr

** 정 회 원 : 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 박사과정
cis@catholic.ac.kr

*** 정 회 원 : 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 학사과정
cis@catholic.ac.kr

**** 정 회 원 : 국방과학연구소 책임연구원
ctchoi@add.re.kr

***** 정 회 원 : 국방과학연구소 책임연구원
jeus@add.re.kr

***** 중신회원 : 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 교수
sunoh@catholic.ac.kr(교신저자)

[2012/04/02 투고 - 2012/04/09 심사 - 2012/07/19 심사완료]

☆ 본 연구는 2011년도 국방과학연구소의 ‘항공기 통합 전자전 장비 운용에 대한 효과도 예측(UD110079ED)’ 위탁과제 및 2012년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

는 방법을 설계하며, 4장에서는 모의실험을 통하여 대응 기법이 성공할 확률과 대응기법을 자율적으로 결정하는 과정을 검증한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론과 앞으로의 연구방향을 제시한다.

2. 자율적인 대응기법의 결정

전투기가 확인한 위협에 대하여 대응기법이 성공할 확률을 모델링하고, 이를 기반으로 대응기법을 결정하는 방법론을 다음과 같이 정리한다.

2.1 대응기법이 성공할 확률

이 논문에서는 RF 대응기법으로 능동형 대응인 잡음 재밍(또는 마스킹(masking) 재밍이라고도 함)과 수동형 대응인 채프(chaff)를 고려하고, 레이더에 의해 유도되는 미사일에 대한 대응기법으로는 능동-수동 복합 재밍을 활용하는 것을 고려하며, IR 대응기법으로는 능동형 대응인 IR 재밍과 수동형 대응인 플레어(flare)를 고려한다.

먼저, RF 대응기법이 성공한다는 것은 상대방의 레이더에 탐지되지 않는다는 것을 의미하므로 이 논문에서는 RF 대응기법이 성공할 확률을 ‘1에서 레이더 탐지 확률을 뺀 값’으로 정의한다. 이제 재밍 신호 전력 대 항공기 반사 신호 전력 비율(Jamming Signal power to useful signal power Ratio: JSR)에 따른 탐지 확률을 구하여 보자.

레이더가 표적 신호를 탐지할 때의 이론적 가설 판단 기준은 주로 네이만-피어슨(Neyman-Pearson) 기준에 따른다 [6]. 이 기준은 오경보 확률(false-alarm probability)인 P_{FA} 를 고정하고서 놓침 확률(miss probability)을 최소화하고 탐지 확률(detection probability)인 P_D 를 최대화하는 것이다. 한쪽 잡음 전력밀도(one-sided noise power spectral density)가 N_0 이고 분포가 정규분포인 덧셈꼴 백색 정규 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)을 가정하면, 우도비(likelihood ratio)는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$q = \sqrt{\frac{2E}{N_0}} \quad (1)$$

여기서, E 는 신호 에너지이다. 이 값을 고정 오경보 확률을 만족시키는 문턱값(threshold) h 와 비교하여 표적의 유무를 판단하는데, 이때 탐지 확률과 오경보 확률은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D = 0.5 - \Phi_0\left(\frac{h}{q} - q\right) \quad (2)$$

$$P_{FA} = 0.5 - \Phi_0\left(\frac{h}{q}\right) \quad (3)$$

여기서, $\Phi_0(\cdot)$ 은 표준정규분포의 한쪽 누적분포함수이며 다음 식과 같이 표현된다.

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4)$$

이와 같은 조건에서 탐지 확률과 오경보 확률 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$P_D = \frac{1}{P_{FA}^{1+0.5q^2}} \quad (5)$$

RF 재밍에서 JSR과 우도비인 (1)의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

$$q = \sqrt{\frac{2n\tau_s \Delta f_s}{JSR}} \quad (6)$$

여기서, τ_s 는 레이더 펄스폭, Δf_s 는 레이더 신호 대역폭이며, 일반적으로 $\Delta f_s \approx 1/\tau_s$ 로 볼 수 있다. n 은 레이더에서 판단을 내릴 때 사용하는 펄스 수 n_p 와 관계된 값으로, 다음과 같은 근사 값을 사용하며,

$$n = \begin{cases} n_p, & n_p \leq n_0 \\ n_0 + \sqrt{n_p - n_0}, & n_p > n_0 \end{cases} \quad (7)$$

n_0 는 신호의 파동이 약할 때를 기준으로 25 정도의 값으로 가정한다. n_p 는 안테나 빔 폭 θ_A 와 안테나 회전 비율 Ω_A 및 펄스 반복 비율 F_p 를 사용하여 다음과 같이 얻는다 [7].

$$n_p = \frac{\theta_A F_p}{\Omega_A} \quad (8)$$

n 이 크면 탐지 확률이 높아지고 1일 때 탐지 확률이 최소가 되므로, n 을 레이더의 감지 능력과 관계된 값으로 사용할 수 있다. 이제, (6)을 (5)에 대입하여 입력 JSR

의 값에 따른 레이더의 탐지 확률을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$P_D = P_{FA}^{\frac{1}{1 + \frac{nB}{JSR}}} \quad (9)$$

여기서, $B = \tau_s \Delta f_s$ 이다. 따라서 RF 재밍이 성공할 확률을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_S = 1 - P_{FA}^{\frac{1}{1 + \frac{nB}{JSR}}} \quad (10)$$

또한, 재밍 방정식을 이용한 잡음 재밍에서의 JSR은 다음과 같다 [8].

$$JSR_{RFJ} = \frac{ERP_j 4\pi R^2}{ERP_r \sigma_a} \quad (11)$$

여기서, ERP_j 는 재머의 유효방사전력(Effective Radiated Power)으로 재머의 방사전력과 재머 안테나 이득의 곱이고, ERP_r 은 레이더의 유효방사전력이며, σ_a 는 항공기의 RCS(Radar Cross Section), R 은 항공기와 레이더 간 거리이다.

이제 식 (11)을 (10)에 적용하면 다음과 같이 잡음 재밍의 효과율을 얻을 수 있다.

$$P_{S,RFJ} = 1 - P_{FA}^{\frac{1}{1 + \frac{nB}{JSR_{RFJ}}}} \quad (12)$$

채프의 경우에는 레이더 수신기 입력단의 JSR을 채프의 평균 RCS인 σ_c 와 σ_a 의 비율로 바꾸어 생각할 수 있으며, 레이더의 분해능(resolution)에 해당하는 $l_\tau = c\tau_s/2$ 를 곱하여 다음과 같이 얻는다.

$$JSR_{CHAFF} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} l_\tau \quad (13)$$

채프의 평균 RCS 또는 채프 입자 하나의 RCS는 채프의 물리적 성질을 분석하여 얻어야 하며, 정확한 RCS를 얻는 방법에 대해서는 다양한 연구가 계속되고 있다 [9]. 이 논문에서는 채프의 평균 RCS를 채프 입자 하나의 RCS σ_j 와 채프 분산 $l_j(t)$ 를 사용하여 구한 간단하면서도 일반적인 방법을 사용한다.

$$\sigma_c = \frac{n_j \sigma_j}{l_j(t)} \quad (14)$$

여기서, n_j 는 한 번에 발사되는 채프 입자의 수이고, σ_j 는 채프 입자 하나의 평균 RCS이며, $l_j(t)$ 는 시간에 따라 증가하는 채프 구름의 유효 거리이다. 채프 입자의 속도가 V_j 이고 채프 분사 후 시간간격이 T_j 라 하면, $l_j(t) = V_j T_j$ 로 간단히 나타낼 수 있고, 따라서, JSR을 다음과 같이 얻을 수 있으며,

$$JSR_{CHAFF} = \frac{n_j \sigma_j l_\tau}{V_j T_j \sigma_a} \quad (15)$$

이 결과를 (10)에 대입하여 다음과 같이 채프의 성공 확률을 얻을 수 있다.

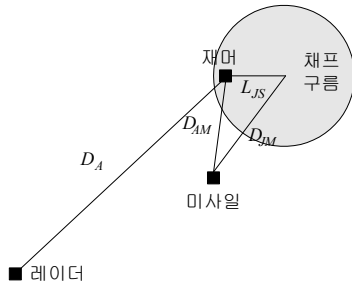
$$P_{S,CHAFF} = 1 - P_{FA}^{\frac{1}{1 + \frac{nB}{JSR_{CHAFF}}}} \quad (16)$$

잡음 재밍과 채프를 동시에 사용하는 복합 RF 재밍의 경우, 채프는 크게 두 가지 방법으로 잡음 재밍의 효과율을 높인다. 그 첫째는, 재밍 신호를 채프 구름에 방사시킴으로써 레이더에 수신되는 재밍 신호의 도착 방위각에 의도적인 변화가 생기도록 하는 것이고, 둘째는, 레이더 스캔 영역 안에 고밀도의 채프를 배치함으로써 레이더 수신기의 입력 JSR을 높이는 것이다. 이 연구에서는 두 번째 방법인 잡음 재밍의 JSR을 높이는 방법만을 고려하여 복합 RF 재밍의 효과율을 얻는다. 또한, 복합 RF 재밍은 레이더에 의해 유도되는 미사일에 대한 전자공격으로만 사용한다.

복합 RF 재밍에서의 미사일 수신기 입력 JSR은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [7].

$$JSR_{COMP} = \frac{ERP_j}{ERP_r} \frac{\Delta f_{RHH}}{\Delta f_j} \frac{\sigma_c l_\tau}{\sigma_a} \frac{D_A^2 D_{AM}^2}{L_{JS}^2 D_{JM}^2} \quad (17)$$

여기서, Δf_{RHH} 는 미사일 수신기의 대역폭, Δf_j 는 재머 대역폭이다. D_A 는 레이더와 재머 사이의 거리, D_{AM} 은 미사일과 재머 사이의 거리, D_{JM} 은 미사일과 채프 중심 사이의 거리, L_{JS} 는 재머와 채프 중심 사이의 거리를 나타낸다. (그림 1)에 이 관계를 간단히 나타내었다.



(그림 1) 레이더, 미사일, 재머, 채프의 위치 관계

이제, 식 (17)을 (10)에 대입하여 다음과 같이 복합 RF 재밍의 성공확률을 얻을 수 있다.

$$P_{S,COMP} = 1 - P_{FA}^{\frac{1 + \frac{nB}{JSR_{COMP}}}{1}}$$
(18)

이제까지 살펴본 RF 대응기법의 성공확률이 상대방 레이더의 탐지 확률과 밀접한 관계가 있는 것과 같이, IR 대응기법의 성공확률 역시 상대방 IR 추적기(seeker)의 종류와 밀접한 관계가 있다. 이 논문에서는 IR 재머를 전방향형(omnidirectional), 램프형(directed lamp), 레이저형(directed laser)의 세 가지 종류로 구분하고, IR 추적기를 네 가지 종류($S_1 \sim S_4$)로 구분하여, 대응기법의 영향력을 <표 1>과 같이 가정한다. 또한 각 IR 재머가 가진 유효거리를 벗어나면 재밍의 성공확률은 0이라 둔다. 플레이어의 경우에 있어서도, 플레이어 지속시간 T_F 와 미사일 속도 V_M 의 곱이 항공기와 미사일 간 거리 D_{AM} 보다 작을 경우 성공확률이 0이라고 본다. 플레이어와 IR 재밍을 동시에 수행하는 경우, 식 (19)와 같이 전체 성공확률은 두 대응기법이 모두 실패하는 확률을 1에서 뺀 값으로 계산한다.

$$P_{S,Total} = 1 - P_{S,Flare} P_{S,IR,J}$$
(19)

(표 1) IR 추적기 종류에 따른 IR 대응기법의 영향력 정도

추적기 재머	S_1	S_2	S_3	S_4
플레이어	강	중	약	없음
전방향형	강	강	중	약
램프형	강	강	강	중
레이저형	강	강	강	강

2.2 대응기법의 예상 유틸리티 계산

유틸리티는 항공기가 취득하는 제한된 정보로 계산한 대응기법의 예상 성공확률을 보완하는 개념으로, 선택된 대응기법에 의해 제거되는 위협의 정도를 의미하며 위협이 수신된 수신기의 종류와 대응규범에 종속적이다. 각 위협은 수신된 수신기에 종류에 따라 위협의 유형을 분류할 수 있으며 그 분류에 따라 각 대응기법의 유틸리티는 달라진다. 각 대응기법의 유틸리티 값은 고유한 값을 가지며 특정한 대응기법의 유틸리티 정도를 나타낸다. 각 대응기법 a 의 유틸리티 값을 위하여 다음과 같은 함수를 사용한다:

$$U(Result_i(a)|E) = \frac{1}{1 - e^{-\lambda x}}$$
(20)

대응기법의 예상 유틸리티를 구하는 과정에서 각 대응기법을 행동 a 라 가정하면 행동 a 가 수행되었을 때 나타날 수 있는 결과(성공/실패)의 유틸리티 값은 $U(Result_i(a)|E)$ 로 표현된다. 환경 E 에서 대응책 a 가 성공했을 경우의 유틸리티 값 $U(Result_i(a)|E)$ 를 구하는 유틸리티 함수는 수식 (20)과 같이 정의하며, λ 는 0.1의 상수 값을 갖고 x 는 1~10의 실수 값을 갖는다. 대응기법이 실패하였을 때의 유틸리티 값은 $x=1$ 일 때의 유틸리티 값 0.095로 가정한다.

일반적으로 행동의 집합을 A 라고 했을 때 $a \in A$ 인 행동 a 의 예상 유틸리티는 다음과 같이 표현된다.

$$EU(a|E) = \sum_i \{P(Result_i(a)|Do(a), E) \times U(Result_i(a)|E)\}$$
(21)

여기서 $Result_i(a)$ 는 행동 a 의 수행결과로 나타날 수 있는 i 개의 상태를 의미한다. 에이전트는 이 각각의 결과에 대해 확률 $P(Result_i(a)|Do(a), E)$ 를 할당하는데 E 는 유효한 환경변수들의 집합을 의미하며 $Do(a)$ 는 현재 상태에서 행동 a 의 수행을 의미한다.

전자전 환경에서 위협에 대하여 취할 수 있는 각 대응기법의 예상 유틸리티 값은 전장 환경, 대응기법의 성공확률 및 위협에 대한 유틸리티와 밀접한 연관관계를 갖는다. 위협에 대응하는 대응기법의 집합들을 $A = \{Chaff, Flare, IR Jamming, RF Jamming\}$ 이라고 하면 $a \in A$ 인 대응기법 a 의 예상 유틸리티는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$EU(a|E) = P(Result_s(a)|Do(a), E)U(Result_s(a)|E) + P(Result_f(a)|Do(a), E)U(Result_f(a)|E) \quad (22)$$

환경 E에서 대응기법 a는 위협에 대해 성공과 실패의 두 가지 결과만을 갖게 되고 $P(Result_s(a)|Do(a), E)$ 는 환경 E에서 대응기법 a가 성공할 확률을 의미한다. 또한 $P(Result_f(a)|Do(a), E)$ 는 대응기법이 실패할 확률로, 이것은 $1 - P(Result_s(a)|Do(a), E)$ 가 된다.

3. 대응기법의 운용효과도

대응기법의 운용효과도는 위협에 대하여 항공기가 대응기법을 얼마나 효과적으로 운용하였는가에 대한 정도를 의미한다. 3장에서는 대응기법의 운용효과도를 설계한다.

3.1 운용효과도의 정의

항공기의 누적치사율의 감소(Reduction in Lethality: RL)는 항공기가 위협에 명중하여 파괴되는 예상 확률이 줄어든 정도로 정의할 수 있다 [10]. 즉, 누적치사율이 감소할수록 항공기의 생존할 확률은 증가하게 된다. 따라서 누적치사율이 감소하는 비율은 항공기의 생존률로 가정할 수 있다. 누적치사율의 감소는 아래와 같은 수식들로 정량화하여 정의한다.

위협이 발사된 총 갯수(the number of Shots)는 요격 사이트에서 항공기에 가해지는 모든 위협의 갯수이다. 발사된 위협이 항공기에 명중할 경우의 수(the number of Hits)는 위협이 항공기에 가까이 접근하여 항공기가 피격당한 경우의 수를 말한다. 이것은 항공기에 치명적인 타격을 줄 수 있는 위협의 폭발 반경 내에 항공기가 속해 있는지 여부에 의하여 결정된다. Dry는 항공기가 어떤 대응기법도 쓰지 않은 경우이며, Wet은 항공기가 위협에 대하여 대응기법을 사용한 경우를 의미한다. 식 (23)은 $P_{K_{DRY}}$ 를 표현한 것으로, Dry 상태에서 항공기가 위협에 명중될(kill) 확률을 의미한다.

$$P_{K_{DRY}} = \frac{\text{the number of Hits}_{DRY}}{\text{the number of Shots}_{DRY}} \quad (23)$$

식 (24)는 Wet상태에서 항공기가 위협에 명중될 확률을 의미하는 $P_{K_{WET}}$ 을 나타낸 것이다.

$$P_{K_{WET}} = \frac{\text{the number of Hits}_{WET}}{\text{the number of Shots}_{WET}} \quad (24)$$

식 (23)과 (24)를 바탕으로 항공기의 누적치사율의 감소를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{누적치사율의 감소(\%)} = \frac{P_{K_{DRY}} - P_{K_{WET}}}{P_{K_{DRY}}} \quad (25)$$

(표 2)는 대응기법의 운용결과에 대한 누적치사율의 감소를 정리한 것이다. RL_Best는 대응기법에 의하여 모든 위협을 제거한 경우의 누적치사율의 감소를 나타내며, 수식에서 표현한 바와 같이 항공기가 위협에 대하여 대응기법을 사용한 경우 항공기가 위협에 명중될 확률($P_{K_{WET}}$)이 최소일 때를 의미한다. RL_Worst는 대응기법이 하나의 위협도 제거하지 못했을 때의 누적치사율의 감소를 나타내며, 수식에서 표현한 바와 같이 $P_{K_{WET}}$ 이 최대일 경우이다. RL_Random은 대응기법에 의하여 위협을 제거할 확률이 임의적일 경우이며, 따라서 대응기법이 위협을 제거하거나 혹은 하지 못하는 두 가지 경우만을 가정하므로 생존율은 50%가 될 것이다. RL_CM은 대응기법의 성공할 확률이 특정한 임계값 이상일 경우에 위협을 제거한 것으로 판단하며, 이때의 누적치사율의 감소는 대응기법의 성공할 확률이 높을 경우에 높게 나타난다.

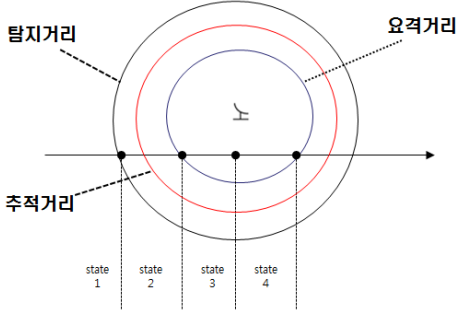
(표 2) 대응기법의 운용결과에 대한 누적치사율의 감소비교

측정방안	상황	수식
RL_Best	모든 위협을 제거한 경우	$\frac{P_{K_{DRY}} - MIN(P_{K_{WET}})}{P_{K_{DRY}}}$
RL_Worst	하나의 위협도 제거하지 못한 경우	$\frac{P_{K_{DRY}} - MAX(P_{K_{WET}})}{P_{K_{DRY}}}$
RL_Random	위협을 제거할 확률이 임의적일 경우	(해당없음)
RL_CM	대응기법의 성공할 확률이 특정 임계값 이상일 경우에 위협을 제거한 경우	(해당없음)

3.2 운용효과도 측정 시나리오

항공기는 이동경로에 따라 누적치사율의 감소(생존율)가 변화하며, 항공기의 누적된 생존율을 계산할 수 있다. (그림 2)는 특정한 시나리오에서 항공기의 진행경로를

나타낸 것이며, 이에 대한 누적치사율의 감소에 대한 계산결과는 (표 3)과 같이 나타낼 수 있다.



(그림 2) 누적치사율의 감소 시나리오

(표 3) states에 따른 항공기 누적치사율의 감소도 변화

	RL_Best	RL_CM	RL_Random	RL_Worst	비고
state 1	-	-	-	-	#SHOTS=0
state 2	1	1	1	1	#HITS=0
state 3	1	0.98	0.49	0	-
state 4	1	0.97	0.56	0.14	-

항공기가 레이더 탐지/추적 사이트의 탐지 사거리에 들어가기 전인 state1에서는 이벤트가 발생하지 않으므로 생존율은 측정할 수 없다. 레이더 탐지/추적 사이트의 탐지 거리에 들어간 state2에서는 아직 미사일이 발사되지 않으므로 생존율은 1이 된다. 항공기가 발사되는 위협의 요격 사거리에 들어간 state3과 state4의 시점에서는 위의 정의한 식 (25)에 의하여 생존율이 계산될 수 있다. 다음은 (표 3)의 누적치사율의 감소 값을 계산한 과정을 보여준다.

- State3
 - RLBEST : $(89/89-0)/(89/89)=1$
 - RL_CM : $(89/89-1/59)/(89/89)=0.98$
 - RL_Random : $(89/89-30/59)/(89/89)=0.49$
 - RL_Worst : $(89/89-59/59)/(89/89)=0$
- State4
 - RLBEST : $(93/148-0/117)/(93/148)=1$
 - RL_CM : $(93/148-2/117)/(93/148)=0.97$
 - RL_Random : $(93/148-32/117)/(93/148)=0.56$
 - RL_Worst : $(93/148-63/117)/(93/148)=0.14$

4. 실험

본 절에서의 실험은 크게 두 가지로 구성되어 있다. 첫 번째는 항공기가 확인한 위협에 대하여 대응기법을 사용할 경우의 예상 성공확률에 대한 실험이며, 두 번째는 확인된 위협에 대하여 얼마나 효율적으로 대응기법을 결정하였는가에 대한 실험이다. 이러한 실험은 실전에 앞서 예상 경로에 대한 항공기의 대응기법에 대한 운용 결과를 알아 볼 수 있다는 점에서 매우 큰 의의가 있다.

4.1 대응기법이 성공할 확률에 대한 실험

(그림 3)은 잡음 재밍을 사용할 때, JSR에 따른 대응기법 성공확률 곡선을 나타낸다. $\Delta f_s \approx 1/\tau_s$ 를 가정하였고, 오경보 확률은 $P_{FA} = 10^{-3}$ 을 사용하였으며, $\sigma_a = 10m^2$, $ERP_j = 25dB$, $ERP_p = 110dB$ 를 가정하였다. JSR이 높아질수록 성공확률이 1로 가까이 가며, 레이더 감지 능력 변수인 n_p 가 커질수록 성공확률이 상대적으로 낮아짐을 볼 수 있다. (그림 4)는 항공기와 레이더 사이의 거리에 따른 잡음 재밍의 성공확률이며, (그림 5)는 항공기 RCS의 변화에 따른 잡음 재밍의 성공확률을 나타내었다. (그림 4)에서는 JSR=0이 되는 거리를 잡음 재밍의 효과가 없는 방해유효한계 거리(burn-through range)로 두었고, (그림 5)에서는 $n=30$ 으로 고정하였다.

(그림 6)은 채프의 양 n_j 와 레이더 분해능 l_r 에 따른 효과율의 변화를 나타낸 그림이다. $\sigma_a = 10m^2$, 오경보 확률은 $P_{FA} = 10^{-3}$, $n=30$ 으로 설정하였고, $\sigma_j = 0.1m^2$, $T_j = 5s$, $V_j = 0.5m/s$ 로 설정하였다. 채프의 속도가 빨라질수록 밀도가 낮아져서 효과율이 떨어지는 결과를 볼 수 있다.

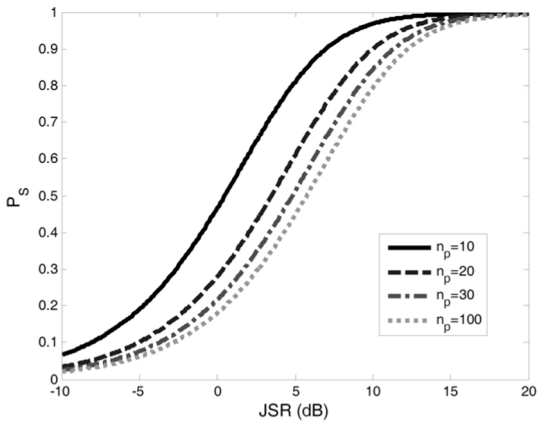
(그림 7)은 레이더 유도 미사일의 대응책으로 복합 재밍을 사용할 때 레이더와 채머 사이의 거리 및 채프의 양에 따른 성공확률을 나타내었다. $D_{AM} = D_{JM} = 5km$ 와 $L_{JS} = 5m$ 로 설정하였고 $l_r = 50$ 이며, 채프에 관한 다른 변수들은 (그림 6)에서의 값과 같다. 레이더와의 거리가 멀어질수록 성공확률의 상승폭이 커짐을 볼 수 있다.

(그림 8)은 IR 추적기 종류와 IR 대응기법에 따른 성공확률을 나타낸 것이다. 미사일의 속도는 850m/s, 플레어의 지속시간은 5s, 전방향성 IR 채머의 유효거리는 10km, 램프형과 레이저형 IR 채머의 유효거리는 각각 15km와 20km로 설정하였고, IR 추적기 종류에 따른 IR 대응기법의 영향력 정도 예시는 (표 4)와 같다. (그림 8)에 의하면, IR 추적기 종류가 S_3 이고 IR 유도 미사일과 항공기의

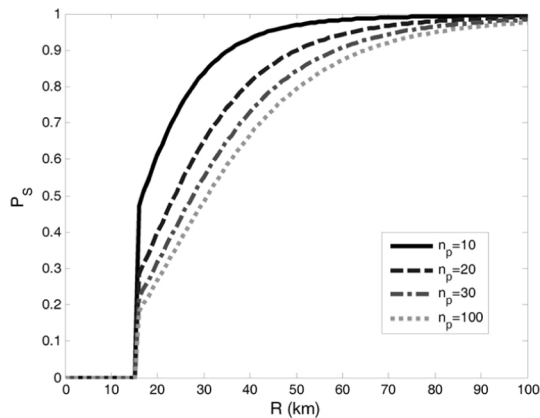
거리 간 거리가 4.25km일 때, 플레이어의 성공확률은 0.3, 전방향형 IR 재밍의 성공확률은 0.6, 플레이어와 전방향형 IR 재밍의 복합 대응 성공확률은 0.72가 된다.

(표 4) IR 추적기 종류에 따른 IR 대응기법의 영향력 예시

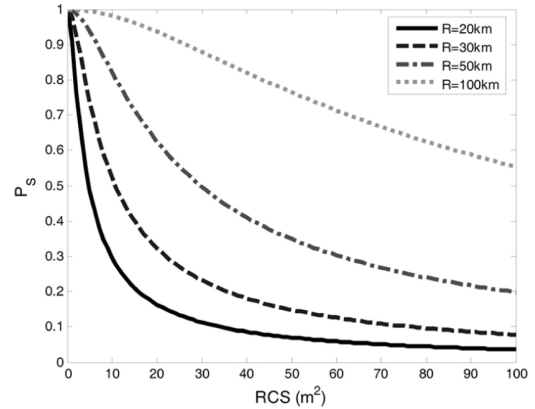
재미	추적기			
	S_1	S_2	S_3	S_4
플레이어	0.9	0.6	0.3	0.0
전방향형	1.0	0.9	0.6	0.3
램프형	1.0	1.0	0.9	0.6
레이저형	1.0	1.0	1.0	0.9



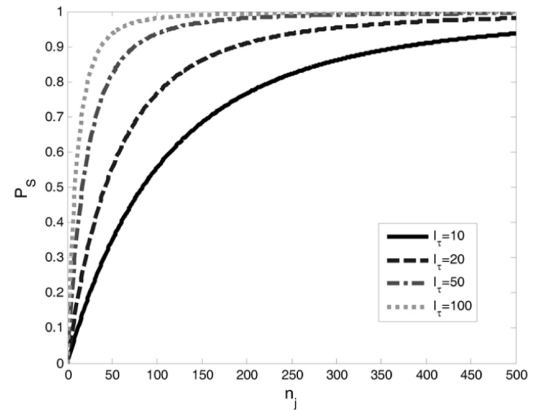
(그림 3) JSR에 따른 재밍의 성공확률



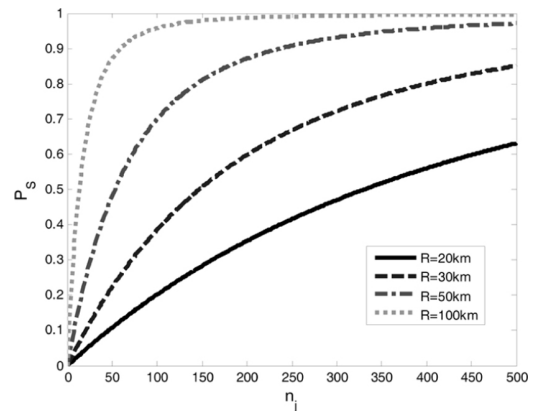
(그림 4) 거리에 따른 잡음 재밍의 성공확률



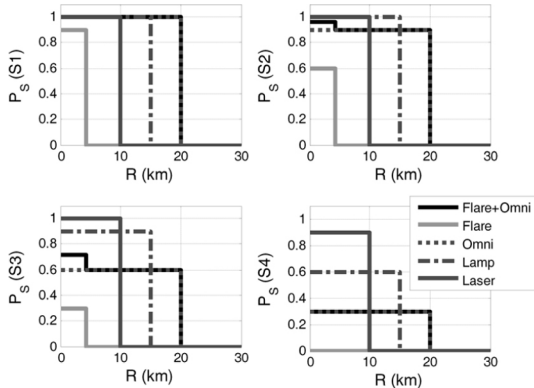
(그림 5) 항공기 RCS에 따른 비율에 따른 잡음 재밍의 성공 확률



(그림 6) 채프의 양과 레이더 분해능에 따른 성공확률



(그림 7) 채프의 양과 레이더와의 거리에 따른 복합 재밍 성공확률



(그림 8) IR 대응기법의 성공확률

4.2 대응기법의 자율적인 결정에 대한 실험

아군 항공기는 세 가지의 전자전 수신기를 장착한다. 이러한 전자전 수신기는 RWR(Radar Warning Receiver), LWR(Laser Warning Receiver) 및 MWR(Missile Warning Receiver)로 구성되어 있다 [8, 11]. 아군 항공기가 특정한 전장상황에서 세 가지의 전자전 수신기로부터 수신된 속성을 바탕으로 위협을 탐지 및 분류하게 된다. 이때, 모든 수신기가 위협에 대한 자료를 수신하는 것은 아니며, 또한, 어떠한 수신기로부터 위협에 대한 자료가 수신되었는가는 위협을 확인하는 것에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 예를 들면, 특정한 시점에 RWR이 유일하게 위협에 대한 자료를 수신하면 이때의 위협은 적의 레이더(비격추 위협)라고 판단할 수 있다. 다른 예로 MWR만이 위협에 대한 자료를 수신하면, 이 위협은 열추적 미사일이라고 판단할 수 있다. 특정한 위협에 대하여 세 가지의 전자전 수신기를 고려한 시나리오의 유형은 <표 5>와 같이 정리할 수 있다.

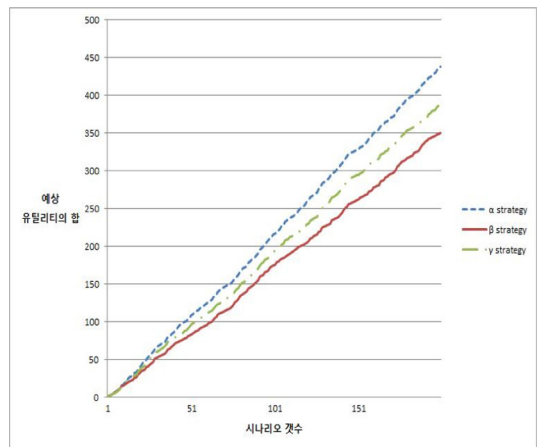
(표 5) 위협 시나리오 종류

시나리오	전자전 수신기 종류		
	RWR	LWR	MWR
1	○		
2		○	
3			○
4	○	○	
5	○		○
6		○	○
7	○	○	○

위협이 탐지된 수신기의 종류에 따라 위협의 유형 및 유도 방식을 예측할 수 있으며, 확인된 위협의 유형 및 유도 방식에 적합한 대응기법을 결정할 수 있어야 한다. 본 실험에서 가용한 대응기법으로는 레이더 유도방식에 의한 위협의 대응기법인 채프와 RF재밍, 열추적 유도방식에 의한 위협의 대응기법인 플레어 및 IR재밍을 사용한다.

실험은 위협의 수신정보와 현재 환경에서 각 대응기법이 성공할 확률이 포함된 데이터 집합을 생성하여 수행되었다. 각각의 시나리오에서 가용한 대응기법의 예상 유틸리티의 계산은 2.2절과 같이 계산되었다. 대응기법의 결정을 비교하기 위하여 다음과 같은 선택전략을 사용하여 실험하였다. 주어진 통합 전자전 시나리오 E 에서 α 는 예상 유틸리티가 가장 높은 대응기법을 선택하는 전략, β 는 대응기법의 성공할 확률이 가장 높은 대응기법을 선택하는 전략, γ 는 임의로 대응기법을 선택하는 전략이다.

임의로 생성된 200개의 시나리오에서 각 선택전략 α , β , γ 의 예상 유틸리티의 합계를 측정하였다. 실험에서는 위협에 대해 앞서 설명한 네 가지의 모든 대응기법이 가능한 경우에 대하여 동일한 200개의 시나리오에서 선택 전략별 성취도를 측정하였으며, 이에 대한 실험 결과는 (그림 9)와 같이 정리되었다.



(그림 9) 채프, 플레어, RF재밍 및 IR재밍을 사용한 경우의 선택전략별 성취도 비교

네 가지 대응기법을 모두 고려한 결과, 시나리오가 누적됨에 따라 예상 유틸리티를 계산하는 전략(α)이 대응기법이 성공할 확률만을 고려한 선택전략(β)보다 약 21% 높게 났으며, 대응기법을 임의로 선택한 전략(γ)보

다 약 12% 높게 나타났음을 알 수 있었다. 결과에서 보듯이 각 선택전략의 예상 유틸리티 합계가 각 대응기법을 결정하는 에이전트의 성취도라고 할 때, 대응기법의 성공할 확률이 가장 높은 대응기법을 선택하는 전략 β 와 임의의 대응기법을 선택하는 전략 γ 의 경우보다 예상 유틸리티가 가장 높은 대응기법을 선택하는 전략 α 가 주어진 통합 전자전 환경에서 최적임을 알 수 있다. 이 결과는 대응기법을 결정하기 위하여 대응기법이 성공할 확률과 더불어 대응규범에 따른 대응기법의 유용도가 함께 고려되어야 함을 실험적으로 보여준 것이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 통합 전자전장비 운용에 대한 효과도를 예측하기 위하여 위협을 확인하고 위협에 대한 대응기법을 자율적으로 결정하는 연구와 자율적으로 결정한 대응기법이 통합 전자전 상황에서 얼마나 효과적으로 운용될 수 있는가에 대한 운용효과도를 계산하는 방법을 제안하였다. 위협에 대한 대응기법을 자율적으로 결정하기 위하여 항공기 전자전장비의 예상 성공확률을 모델링하였으며, 항공기 전자전장비의 유용도를 정량화하였다. 다양한 통합 전자전 상황에서 대응기법의 예상 성공확률과 자율적인 대응기법의 결정에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 위협을 제거하는 대응기법의 활용방안에 따라 항공기 전자전장비의 운용효과도에 대한 비교 방안을 제시하였다.

차후 연구를 통하여, 통합 전자전 상황에서 항공기에 가해지는 위협에 대한 다양한 대응기법의 운용효과도를 실험적으로 측정할 것이다. 측정된 운용효과도를 분석하면 주어진 시나리오에서 최적의 대응기법을 검증할 수 있을 것이며, 실질적인 전장 환경에서 항공기의 생존율을 향상시킬 수 있는 방안을 시뮬레이션 결과로 제시할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. Heikell, Electronic Warfare Self-Protection of Battlefield Helicopters: A Holistic View, Helsinki University of Technology, Doctoral dissertation, 2005.
- [2] Aircraft Survivability Equipment (ASE): Ensuring Lethality and Dominance of Army Aviation over Tomorrow's Battlefield, Association of the United States Army, 2002. Available at <http://www.ause.org/>.
- [3] S. Russell and P. Norvig, Artificial intelligence: A Modern Approach, Third Edition, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice-Hall, Chapters 13-17, 2010.
- [4] S. Kang, H. Park, S. Noh, S.R. Park, K. Kim, S. Lyu, and S. Kim, Autonomously Deciding Countermeasures against Threats in Electronic Warfare Settings, In Proceedings of the 3rd International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, pp. 177-184, Fukuoka, Japan, March 2009.
- [5] S. Noh and P. Gmytrasiewicz, Flexible Multi-Agent Decision Making Under Time Pressure, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, Vol. 35, No. 5, pp. 697-707, September 2005.
- [6] L.L. Scharf, Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis, Addison-Wesley, 1991.
- [7] S. Vakin, L. Shustov, and R. Dunwell, Fundamentals of Electronic Warfare, Artech House Inc., London, 2001.
- [8] 이일근, 박동철, 유태선, 명로훈, 임중수, 조용희, 강희창, 레이더 공학과 전자전 응용, 대영사, pp. 477-481, 2006.
- [9] 임중수, 김민년, 채규수, 송규하, 비행체 방어를 위한 체프의 RCS계산에 관한 연구, 국방과학연구소 제11차 통신/전자학술대회 논문집(전자전), pp. 31-35, 2007.
- [10] US Department of Defense, JSSG-2005-JOINT SERVICE GUIDE AVIONIC SUBSYSTEM, October 1998.
- [11] 임상민, 전투기의 이해 下, 이지북, pp. 89-97, 2005.

● 저 자 소 개 ●

박 소 령



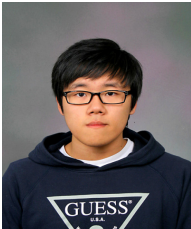
2002년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(공학박사)
2003년~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 부교수
2009년~현재 한국통신학회 논문지 편집위원
관심분야 : 통계학적 신호처리, 무선통신, 다중접속, etc.
E-mail : srpark@catholic.ac.kr

박 현 우



2008년 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 컴퓨터공학전공 졸업(공학사)
2008년~2010년 가톨릭대학교 대학원 컴퓨터공학전공 졸업(공학석사)
2010년~현재 가톨릭대학교 대학원 컴퓨터공학전공 박사과정
관심분야 : 지식관리, 지능형 에이전트 시스템, 인공지능, 데이터마이닝 등
E-mail : cis@catholic.ac.kr

하 지 수



2010년~현재 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 학사과정
관심분야 : 지능형 에이전트 시스템, 인공지능, 데이터마이닝 등
E-mail : cis@catholic.ac.kr

최 채 택



1989년 충남대학교 계산통계학과 졸업(학사)
1991년 충남대학교 계산통계학과 졸업(석사)
1991년~현재 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 뉴럴 네트워크, 최적화 등
E-mail : ctchoi@add.re.kr

정 운 섭



1988년 충남대학교 전자공학과 졸업(학사)

1990년 충남대학교 전자공학과 졸업(석사)

2007년 충남대학교 전자공학과 졸업(박사)

1990년~현재 국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 통합 전자전시스템, 다중센서 데이터 통합, 레이더 및 무선통신 재밍신호 처리 등

E-mail : jeus@add.re.kr

노 상 욱



1987년 서강대학교 생명과학과 졸업(이학사)

1989년 서강대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)

1999년 텍사스 주립대학교(Arlington) 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학박사)

2000년~2002년 미주리 주립대학교(Rolla) 컴퓨터학과 교수

2002년~현재 가톨릭대학교 컴퓨터정보공학부 교수

관심분야 : 지식관리, 기계학습, 실시간 분산 시스템, 지능형 에이전트 시스템, 인공지능 등

E-mail : sunoh@catholic.ac.kr