

레이더 시스템에서 레이더 단면적에 따른 탐지 거리 추정을 위한 코히런트 집적과 비 코히런트 집적에 대한 비교

함 성 민*, 가 관 우*, 이 관 형**

대진대학교 전기전자통신공학부*,**

A Comparison on Coherent Integration and Non-coherent Integration to Estimate Detection Range about Radar Cross Section in Radar System

Sung-min Ham*, Gwan-u Ga*, Kwan-hyeong Lee**

요 약 본 논문에서는 레이더 시스템에서 탐지 거리 추정에 영향을 미치는 레이더 단면적의 크기에 대한 집적 방식을 비교 분석한다. 본 논문에서는 레이더 단면적의 크기에 따라 크기가 작을 경우 스웰링 케이스 1, 클 경우에는 스웰링 케이스 3의 탐지 확률을 레이더 방정식에 적용하여 탐지 거리를 추정하였다. 모의실험을 통해서 스웰링 케이스의 차이에 따른 코히런트 집적과 비 코히런트 방식을 비교 분석하였다. 모의실험을 통해서, 비 코히런트 집적 방식이 추정 거리가 가장 우수하였고 코히런트 집적 방식은 스웰링 케이스를 적용한 탐지 거리 추정에 적합하지 않음을 알 수 있었다.

Abstract This paper comparatively analyze to integration case to have a influence detection range estimation about radar cross section in radar system. This paper estimate detection range used to probability of detection in radar equation that used to swerling case 1 in case of radar cross section is small and used to swerling case 3 in case of radar cross section is large. Through simulation, coherent integration and non-coherent integration about swerling case difference were comparatively analyzed. Through simulation, non-coherent integration case is outstanding detection range and we known that coherent integration don't suitable for detection range estimation.

Keywords : Radar system, Radar Equation, Radar Cross Section, Detection range, Integration

1. 서 론

레이더(Radar)란 Radio Detecting And Ranging으로 전파를 공간에 송신하여 물체를 맞고 반사되어 돌아온 전파를 수신하여 물체와의 거리, 방향, 고도 등을 알아내는 무선 감시

장치이다. 레이더는 주로 공중, 지상, 해상에서 목표물의 탐색과 추적을 위해 군사적인 목적으로 사용되어 왔으며 민간에 공개된 이후에는 지상 및 위성의 초고주파 통신, 선박의 항법 시스템, 기상 관측 시스템 등의 발전에 많은 영향을 끼쳤다.

* Dept, electrical, electronic and communication engineering, Daejin University (ggw-forever2@hanmail.net)

** Corresponding Author: electronic and communication engineering Professor of Daejin University (khlee@daejin.ac.kr)

Received : April 01, 2014

Revised : May 01, 2014

Accepted : June 02, 2014

레이더의 종류는 크게 탐지 레이더, 추적 레이더, 다기능 레이더, 영상 레이더 등으로 분류 가능하다. 탐지 레이더는 목표물을 탐지 후 식별하여 해당 목표물을 지정하여 주고 추적 레이더는 탐지 레이더로부터 지정 받은 목표물을 정확한 거리, 방향, 고도를 산출하여 무기체계에 사격 제원을 제공하여 준다. 다기능 레이더는 1대의 레이더로 탐지·추적 레이더의 기능 등 여러 기능을 다목적 레이더로써 다기능 레이더 혹은 위상 배열 레이더라고도 한다. 영상 레이더는 항공기나 인공위성 등에 탑재되어 목표물의 수신 신호를 측정하고 영상으로 제작하여 관심 목표물을 식별한다.

목표물의 레이더 단면적 (RCS : Radar Cross Section)은 레이더가 전송한 전자파가 대상물에 반사되어 돌아올 때, 그 반사체의 반사량을 나타내기 위해 규정한 평면 면적으로써 레이더 반사량은 반사체의 형상에 따라 천차만별이므로 동등한 반사량을 가지는 평평한 금속판 면적으로 반사파의 양의 세기를 표시한다. 항공기처럼 레이더에 탐색되지 않아야 하는 물체는 레이더 단면적이 작아지도록 재질과 형체를 선택한다. 최근에는 스텔스 기술 중에서도 적 레이더에 의한 탐지를 최소화 하기 위한 레이더 단면적 감소가 가장 중요하므로 레이더 단면적 감소를 위해 기하학적 항공기 외형 설계, 내부무장 등 형상 설계, 전파흡수재료(RAM : Radar Absorbing Material), 전파흡수구조(RAS : Radar Absorbing Structure)등의 기술을 복합적으로 적용하고 있다. 이런 기술이 적용된 스텔스 전투기의 레이더 단면적은 일반 전투기의 레이더 단면적 보다 작게 나타나며 스텔스 기술이 적용되지 않은 B-52의 레이더 단면적은 100m², F-4의 레이더 단면적은 6m² 정도지만 스텔스 기술이 적용된 B-2는 0.1m², F-117A는 0.025m² 정도로 나타나기 때문에 스텔스 전투기는 일반 전투기에 비해 적의 레이더망에 탐지될 확률에 적고 위협반경 밖에서 효과적인 전술구사가 가능해 임무 성공률과 조종사 생존성을 높일 수 있다.

목표물이 이동 중이면 레이더 단면적 값의 변화가 발생하여 탐지 확률이 변하고 이 확률의 변화를 적용하기 위해 Marcum과 Swerling이 정의한 탐지 확률을 사용하였다[1]. 본 논문에서는 레이더 단면적의 차이에 따라 Swerling case를 적용하여 탐지 확률을 계산하고 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이더 단면적에 대해 설명한다. 3장에서는 레이더 시스템에서 탐지 거리 추정 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 모의실험을 통해 두 방식의 차이점을 비교 분석한다.

2. 레이더 단면적

레이더는 목표물을 향해 어떠한 형태의 편파를 가지는 전자기파를 발사하게 되고 그 파형은 목표물에 맞고 반사되어 동일한 편파를 가지고 레이더의 수신기로 돌아오게 된다. 이때 반사체의 반사량은 반사체의 단면적에 의해 차이가 나게 되는데 이를 레이더 단면적(RCS : Radar Cross Section)라 한다. 레이더 반사량은 반사체의 형상에 따라 천차만별이므로 동등한 반사량을 가지는 평평한 금속판 면적으로 반사량의 세기를 표시한다. 항공기처럼 레이더에 탐색되지 않아야 하는 물체는 레이더 단면적이 작아지도록 재질과 형체를 선택한다.

이 때 목표물로부터 반사되어온 반사량 전력은 다음과 같다.

$$P_r = \sigma P_{Di} \quad (1)$$

여기서 P_{Di} 는 목표물로부터 돌아온 입사파의 전력 밀도이고 σ 는 목표물 단면적이다.

수신기 안테나의 산란과 전력 밀도를 P_{Dr} 이라 하면

$$P_{Dr} = P_r / (4\pi R^2) \quad (2)$$

으로 나타 낼 수 있으며 식 (2)에 (1)을 대입하여 연산하면

$$\sigma = 4\pi R^2 \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (3)$$

로 나타냈다. 만약 레이더 수신 안테나가 원거리(far field)용 이라면 식(3)은

$$\sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (4)$$

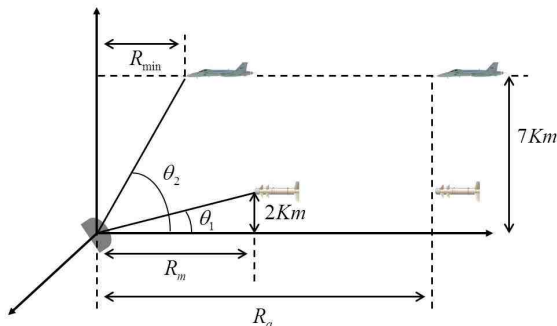
위와 같이 수정 가능하며 이는 레이더 단면적으로 정의된다.

목표물 산란 레이더 단면적의 총 합은 다음과 같다.

$$\sigma_t = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi_s=0}^{2\pi} \int_{\theta_s}^{\pi} \sigma(\theta_s, \phi_s) \sin\theta_s d\theta d\phi_s \quad (5)$$

일반적으로 레이더 단면적이 10배 줄면 탐지 거리는 절반 정도가 감소된다. 즉, 레이더 단면적이 1인 항공기가 100이라는 거리에서 탐지된다면 레이더 단면적이 0.1인 항공기는 50 이내의 거리에서, 레이더 단면적이 0.01인 항공기는 25 이내의 거리에서만 탐지가 가능하다.

3. 탐지 거리 추정



[그림 1] 레이더 시스템의 목표물 탐지 구조
[Fig. 1] Target Detection Geometry of Radar System

Swerling case가 적용된 레이더 방정식은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{P_{av} G_t G_r \lambda^2 \sigma I(n_p)}{(4\pi)^3 k T_c B \tau f_r F L_t L_f R^4} \quad (6)$$

여기서, $P_{av} = P_t \tau f_r$ 로 평균 송신 전력이고,

P_t 는 송신 첨두 전력, τ 는 펄스폭이다. G_t 는 송신 안테나 이득, G_r 은 수신 안테나 이득, λ 는 파장, σ 는 목표물의 RCS, k 는 볼츠만 상수, T_c 는 유효 잡음 온도, B 는 대역폭, F 는 잡음 지수, L_t 는 레이더 시스템 총손실, L_f 는 목표물의 동요에 의한 손실, R 은 탐지 거리이다. $I(n_p)$ 는 improvement factor로써 다음과 같다.[3]

$$[I(n_p)]_{dB} = 6.79(1 + 0.235P_D) \left(1 + \frac{\log(1/P_{fa})}{46.6} \right) \log(n_p) \left(1 - 0.140 \log(n_p) + 0.018310(\log(n_p))^2 \right) \quad (7)$$

여기서, P_{fa} 는 Probability of false alarm으로써 다음과 같다.

$$P_{fa} = 1 - \Gamma_I \left(\frac{V_T}{\sqrt{n_p}}, n_p - 1 \right) \quad (8)$$

여기서, V_T 는 threshold voltage이고, $\Gamma_I \left(\frac{V_T}{\sqrt{n_p}}, n_p - 1 \right)$ 은 incomplete Gamma function으로써 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma_I(x, N) = \int_0^x \frac{e^{-v} v^{N-1}}{(N-1)!} dv \quad (9)$$

$n_p > 1$ 일 경우, P_{fa} 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$P_{fa} \approx \ln(2) \left(\frac{n_p}{n_{fa}} \right) \quad (10)$$

여기서, n_{fa} 는 false alarm number를 의미한다. P_D 는 탐지 확률로써 Swerling case의 모델마다 서로 다른 확률을 갖는다.

레이더 단면적이 작을 경우에는 Swerling case 1과 2를 적용하고 레이더 단면적이 클 경우에는 Swerling case 3과 4를 적용한다. 각각의 case 별 특징은 표 2에 정리하였다.

	Swerling 1	Swerling 2	Swerling 3	Swerling 4
Target amplitude	Scan to scan	Pulse to pulse	Scan to scan	Pulse to pulse
Statistics	Many small scatterers of comparable RCS value		One large RCS scatterer and many small equal RCS scatterers	
Non-coherent integration	Can apply to all swerling model			
Coherent integration	Can apply	Can't apply (target amplitude = pulse to pulse)	Can apply	Can't apply (target amplitude = pulse to pulse)

[표 1] 스웰링 케이스의 특징

[Table. 2] Characteristic of Swerling case

$n_p > 1$ 일 때, Swerling case I, II의 탐지 확률은 다음과 같다.

$$P_D = 1 - \Gamma\left(V_T, n_p - 1\right) + \left(1 + \frac{1}{n_p SNR}\right)^{n_p - 1} \Gamma\left(\frac{V_T}{1 + 1/n_p SNR}, n_p - 1\right) \exp\left(-\frac{V_T}{1 + n_p SNR}\right) \quad (11)$$

$n_p > 1$ 일 때, Swerling case III, IV의 탐지 확률은 다음과 같다.

$$P_D = \frac{V_T^{n_p - 1} e^{-V_T}}{\left(1 + \frac{n_p SNR}{2}\right)(n_p - 2)! + 1 - \Gamma\left(V_T, n_p - 1\right) + K_0 \Gamma\left(\frac{V_T}{1 + 2/n_p SNR}, n_p - 1\right)} \quad (12)$$

여기서, K_0 는 다음과 같다.

$$K_0 = 1 + \frac{V_T}{1 + n_p SNR/2} - \frac{2}{n_p SNR}(n_p - 2) \quad (13)$$

따라서, 코히런트 집적 방식의 SNR_{CI} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SNR_{CI} = \frac{1}{n_p} SNR_1 \quad (14)$$

여기서, SNR_1 은 단일 펄스의 SNR 을 의미한다. 비 코히런트 집적 방식의 SNR_{NCI} 는 다음과 같다.

$$SNR_{NCI} = \frac{n_p SNR_1}{L_{NCI}} \quad (15)$$

위 식에서 L_{NCI} 는 비 코히런트 집적 방식의 손실로써 다음과 같다.

$$L_{NCI} = \frac{n_p}{I(n_p)} \quad (16)$$

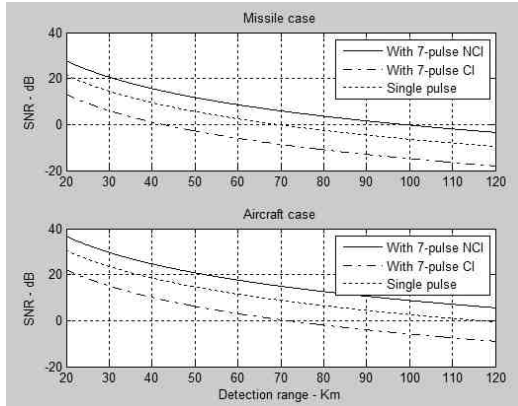
누적 탐지 확률은 다음과 같다.

$$P_{C_n} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{D_i}) \quad (17)$$

여기서, n 은 프레임 수를 의미한다.

4. 모 의 실험

본 장에서는 레이더 시스템에서 Swerling case를 적용한 목표물의 최소 탐지 거리를 추정하기 위해서 코히런트 집적 방식과 비 코히런트 집적 방식을 비교 분석 한다. 코히런트 집적 방식은 포락선 검파기 앞에서 처리하는 방법이고 비 코히런트 집적 방식은 포락선 검파기 뒤에서 처리하는 방법이다. 모의실험에서 레이더 시스템의 최소 탐지 거리를 추정하기 위하여 식 (6)의 레이더 방정식을 적용하였으며 사용된 각각의 변수들은 표 1에 나타내었다.



[그림 2] 목표물 타입 별 SNR 대 탐지 거리
[Fig. 2] SNR versus detection range for target types

그림 2에서 Missile의 경우, 탐지 거리가 40Km일 때, 7개의 펄스를 집적한 코히런트 집적 방식의 SNR은 약 0dB, 7개의 펄스를 집적한 비 코히런트 집적 방식의 SNR은 약 16dB, 단일 펄스의 SNR은 약 10dB이다. Aircraft의 경우, 탐지 거리가 40Km일 때, 7개의 펄스를 집적한 코히런트 집적 방식의 SNR은 약 10dB, 7개의 펄스를 집적한 비 코히런트 집적 방식의 SNR은 약 26dB, 단일 펄스의 SNR은 약 18dB이다. 코히런트 집적 방식은 단일 펄스일 경우 보다 SNR값이 많이 떨어짐을 확인하였고, 비 코히런트 집적 방식은 단일 펄스를 사용하여 탐지한 것 보다 SNR값이 더 높게 나타난 것을 확인하였다.

[표 2] 레이더 방정식 변수
[Table. 2] Radar Equation variable

Description	Specification
Aircraft RCS	$4m^2$
Aircraft SW case	SW III case
Aircraft minimum detection range	$R_a = 90Km$
Missile RCS	$0.5m^2$
Missile SW case	SW I case
Missile minimum detection range	$R_m = 55Km$

Peak power	$P_t = 114.7 \times 10^3 W$
Center frequency	$f_0 = 3GHz$
Gain	$G = 34.5139 dB$
Effective Temperature	$T_e = 290.0 Kelvins$
Bandwidth	$B = 1MHz$
Noise Figure	$F = 6.0dB$
Loss	$L = 8.0dB$
Number of Pulse	$n_p = 7$
Aperture size	$A_e = 2.25m^2$
Scan rate (360° cover)	2 sec
Pulsewidth	$\tau = 1\mu sec$
PRF	$f_r = 1 KHz$
Probability of False Alarm	$P_{fa} = 10^{-7}$
Probability of Detection for Aircraft	$P_{Da} = 0.99812$
Probability of Detection for Missile	$P_{Dm} = 0.99945$

5. 결론

본 논문에서는 레이더 시스템에서 단일 펄스, 코히런트 집적 방식과 비 코히런트 집적 방식을 사용하여 Swerling case를 적용한 목표물의 탐지 거리를 추정하고 SNR 값을 비교하여 성능 분석을 하였다.

본 논문에서는 서로 다른 평균 레이더 단면적 값에 따라 Swerling case를 적용한 두 개의 목표물을 가정하여 각 집적 방식에 따라 탐지 거리를 추정하였다. 모의실험에서, 코히런트 집적 방식은 거의 모든 탐지 거리에 걸쳐 단일 펄스보다 SNR값이 약 8~10dB만큼 낮고, 비 코히런트 집적 방식은 단일 펄스보다 약 6 ~ 8dB 정도 높음을 확인하였다. 따라서 코히런트 집적 방식은 전체적인 SNR 성능이 저하되기 때문에 Swerling case를 적용한 목표물 탐지 거리 추정에서 적합하지 않은 방식임을 확인하였으며, 비 코히런트 집적 방식을 사용하는 것이 단일 펄스

를 사용하여 Swerling case를 적용한 목표물을 탐지하는 것보다 더 높은 성능이 나타나는 것을 확인하였다.

References

- [1] Peebles Jr., P.Z., "Radar Principles", John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [2] Bassem R. Mahafza, PH.D., Atef Z. Elsherbeni, "MATLAB Simulations for Radar Systems Design", Chapman & Hall/CRC Co, 2004.
- [3] Marcum, J. I., Statistical Theory of Target Detection by Pulsed Radar, IRE Transactions on Information Theory. Vol IT-6, pp 59-267. April 1960.
- [4] Swerling P., Probability of Detection for Fluctuating Targets, IRE Transactions on Information theory. Vol IT-6, pp 269-308. April 1960.
- [5] Bassem R. Mahafza, PH.D., "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", Chapman & Hall/CRC Co, 2000.

저자약력

함 성 민(Sung-Min Ham)

학생회원



2013년 2월 : 대진대학교
전기전자통신공학부 졸업
2014년 현재 : 대진대학교
전기전자통신공학부
석사과정

<관심분야> 무선통신, 통신 시스템, 위치추적

가 관 우(Kwan-U Ga)

학생회원

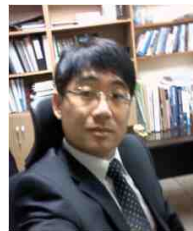


2013년 2월 : 대진대학교 전기전
자통신공학부 졸업
2014년 현재 : 대진대학교 전기전
자통신공학부
석사과정

<관심분야> 무선통신, 위치추적

이 관 형(Kwan-Hyeong Lee)

정회원



1998년 3월~2004년 8월 :
강릉 영동대학 교수
2005년 3월~2007년 2월 :
청주대학교 전자정보공학부
전임강사
2007년 3월~2010년 2월 :
국방과학연구소 근무
2010년 2월~현재 :
대진대학교 교수

<관심분야> 무선통신, 위치추적