The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 14, No. 6, pp.113-117, Dec. 31, 2014. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.6.113
JIIBC 2014-6-17

스웰링 경우를 이용한 레이더 단면적의 목표물 탐지 거리 추정 성능 분석

On Analysis Performance for Target Rage Detection Estimation of Radar Cross Section using Swerling Case

이관형*

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 집적을 비교 분석하였다. 비교 분석 결과, 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. In the result of comparative analysis, non-coherent integration case is outstanding detection range and we known that coherent integration don't suitable for detection range estimation.

Key Words : Radar system, Radar Equation, Radar Cross Section, Detection range, Integration

Ⅰ. 서 론

레이더(Radar)란 Radio Detecting And Ranging의 약어로써 전파를 물체에 발사시켜 물체에 반사된 수신신호를 분석하여 거리, 방향, 고도 등을 알아내는 무선 시스템이다[1]. 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.

레이더의 종류는 일반적으로 탐지 레이더, 추적 레이더, 다기능 레이더, 영상 레이더 등으로 분류 한다. 탐지 레이더는 목표물을 탐지 후 식별 하여 해당 목표물을 지정하여 주고 추적 레이더는 탐지 레이더로부터 지정 받은 목표물을 정확한 거리, 방향, 고도를 산출하여 무기체계에 사격제원을 제공한다. 다기능 레이더는 1대의 레이더로 탐지·추적 레이더의 기능 등 여러 기능을 다목적 레이더로써 다기능 레이더 혹은 위상 배열 레이더라고도

*정회원, 대진대학교 공과대학 전기전자통신공학부
접수일자 : 2014년 8월 18일, 수정완료 : 2014년 10월 12일
게재확정일자 : 2014년 12월 12일

Received: 18 August, 2014 / Revised: 12 October, 2014 / Accepted: 12 December, 2014
*Corresponding Author: khlee@daejin.ac.kr
Dept. of Communication Engineering, Daejin University, Korea

한다. 영상 레이더는 항공기나 인공위성 등에 탑재되어 목표물의 수신 신호를 측정하고 영상으로 제작하여 대상 목표물을 식별한다[2].

목표물의 레이더단면적 (RCS : Radar Cross Section)은 레이더가 전송한 전자파가 목표물에 반사되어 돌아올 때, 목표물의 반사량을 나타내기 위해 규정한 평면 면적으로 반사파의 양의 세기를 나타낸다. 목표물이 레이더에 탐색되지 않도록 하기 위해서는 RCS가 최소화 되도록 재질과 형체를 제작한다. 최근에는 스텔스 기술 중에서도 레이더에 의한 탐지를 최소화 하기 위한 RCS 감소가 가장 중요하므로 RCS 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 RCS는 일반 전투기의 RCS보다 작게 나타나며 스텔스 기술이 적용되지 않은 B-52의 RCS는 100㎡, F-4의 RCS는 6㎡ 정도지만 스텔스 기술이 적용된 B-2는 0.1㎡, F-117A는 0.025㎡ 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 RCS 값의 변화가 발생하여 탐지 확률이 변하고 이 확률의 변화를 적용하기 위해 Marcum과 Swerling이 정의한 탐지 확률을 사용하였다[3].

본 논문에서는 RCS의 따른 스웰링 경우(Swerling case)를 적용하여 목표물의 탐지 확률을 추정하고 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이더 단면적에 대해 설명하고, 3장에서는 레이더 시스템에서 탐지 거리 추정을 위한 방법을 제안한다. 4장에서는 모의실험을 이용하여 성능을 비교 분석한다.

II. 레이더 단면적

레이더는 목표물을 향해 전자파를 방사하고 목표물에 맞고 반사된 신호가 수신기로 입사된다. 목표물로부터 수신된 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4-5].

$$P_r = \sigma P_{Di} \tag{1}$$

여기서 P_{Di}는 목표물로부터 돌아온 입사파의 전력 밀도이고 σ는 목표물 단면적이다. 수신기 안테나의 산란파 전력 밀도를 P_{Dr}은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (2)에 (1)을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

만약 레이더 수신 안테나가 원거리(far field)용 이라면 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

목표물 산란 레이더 단면적의 총 합은 다음과 같다.

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

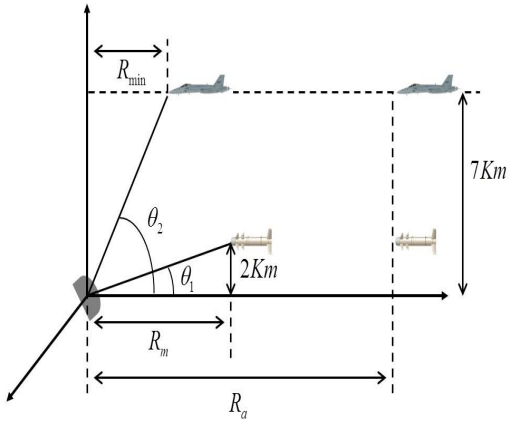

그림 1. 레이더 시스템의 목표물 탐지 구조
Fig. 1. Target Detection Geometry of Radar System

III. 탐지거리 추정

본 장에서는 목표물을 추정하기 위한 직접 상관성 과

직접 비 상관성의 탐지거리 방법을 제안한다. 스웰링 케이스가 적용된 레이더 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[6-7].

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

여기서, $P_{av} = P_t \tau f_r$ 평균 송신 전력이고, P_t는 송신 첨두 전력, τ는 펄스폭이다. G_t는 송신 안테나 이득, G_r은 수신 안테나 이득, λ는 파장, σ는 목표물의 레이더단면적, k는 볼츠만 상수, T_e는 유효 잡음 온도, B는 대역폭, F는 잡음 지수, L_t는 레이더 시스템 총손실, L_f는 목표물의 동요에 의한 손실, R은 탐지 거리이다. $I(n_p)$는 improvement factor로써 다음과 같다.

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

여기서, P_{fa}는 오류경보확률(Probability of false alarm)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, V_T는 임계치 전압(threshold voltage)이고, $\Gamma_I\left(\frac{V_T}{\sqrt{n_p}}, n_p - 1\right)$은 불완전 감마 함수로서(incomplete Gamma function)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

여기서, n_{fa}는 오경보개수(false alarm number)를 의미한다. P_D는 탐지 확률로써 스웰링 케이스 모델마다 서로 다른 확률을 갖는다. 레이더 단면적이 작을 경우에는 스웰링 케이스 1과 2를 적용하고 레이더 단면적이 클 경우에는 스웰링 케이스 3과 4를 적용한다.

$n_p > 1$일 때, 스웰링 케이스 Ⅰ, Ⅱ의 탐지 확률은 다음과 같다.

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

$n_p > 1$일 때, 스웰링 케이스 Ⅲ, Ⅳ의 탐지 확률은 다음과 같다.

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

여기서, K_0는 다음과 같다.

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

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

$$SNR_{CI} = \frac{1}{n_p} SNR_1 \tag{14}$$

여기서, SNR_1은 단일 펄스의 신호대 잡음비이다. 비 코히런트 집적 방식의 SNR_{NCI}는 다음과 같다.

$$SNR_{NCI} = \frac{n_p SNR_1}{L_{NCI}} \tag{15}$$

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

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

누적 탐지 확률은 다음과 같다.

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

여기서, n은 프레임 수를 의미한다.

Ⅳ. 모 의 실 험

본 장에서는 레이더 시스템에서 스웰링 케이스를 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 레이더 방정식을 적용하였으며 방정식에 들어가는 변수들은 아래 표와 같이 가정하였다. 그림 2에서 미사일 경우, 탐지 거리가 $40Km$일 때, 7개의 펄스를 집적한 코히런트 집적 방식의 신호대 잡음비는 약 10dB, 7개의 펄스를 집적한 비 코히런트 집적 방식의 신호대 잡음비는 약 16dB, 단일 펄스의 SNR은 약 10dB이다. 비행기의 경우, 탐지 거리가 $40Km$일 때, 7개의 펄스를 집적한 코히런트 집적 방식의 신호대 잡음비는 약 10dB, 7개의 펄스를 집적한 비 코히런트 집적 방식의 신호대 잡음비는 약 26dB, 단일 펄스의 신호대 잡음비는 약 18dB이다. 코히런트 집적 방식은 단일 펄스일 경우 보다 신호대 잡음비값이 많이 떨어짐을 확인하였고, 비 코히런트 집적 방식은 단일 펄스를 사용하여 탐지한 것 보다 신호대 잡음비가 더 향상되었음을 확인하였다.

표 1. 레이더 방정식 변수
Table 1. 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	$f_0 = 3$GHz
Gain	$G = 34.5139$ dB
Effective Temperature	$T_e = 290.0\,Kelvins$
Bandwidth	$B = 1$MHz
Noise Figure	$F = 6.0$dB
Loss	$L = 8.0$dB
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	$P_{Dm} = 0.99945$

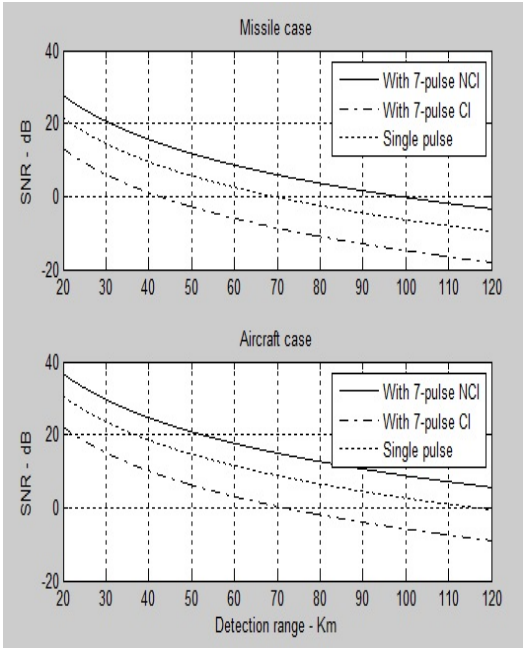

그림 2. 목표물 타입 별 SNR 대 탐지 거리
Fig. 2. SNR versus detection range for target types

V. 결 론

본 논문에서는 레이더 시스템에서 단일 펄스, 코히런트 집적 방식과 비 코히런트 집적 방식을 사용하여 Swerling case를 적용한 목표물의 탐지 거리를 추정하고 그에 따른 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 낮은 값을 보임을 확인하였고, 비 코히런트 집적 방식은 단일 펄스보다 약 6 ~ 8dB 정도 높음을 확인하였다. 따라서 코히런트 집적 방식은 전체적인 SNR 성능이 좋지 못함을 바탕으로 Swerling case를 적용한 목표물 탐지 거리 추정에서 적합하지 않은 방식임을 확인하였으며, 비 코히런트 집적 방식을 사용하는 것이 단일 펄스를 사용하여 Swerling case를 적용한 목표물을 탐지하는 것보다 더 높은 성능을 보임을 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.

[6] Min Soo Lee,"A Study on Maximum Likelihood Method for multi Target Estimation," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol.12, No.3, pp.165-170 , 2013.

[7] Jongtaek Oh, "A sutdy on Multipath Effect Mitigation usin Trigger Signal in the 3D TDOA Positioning System," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol.13. No.4, pp.149-155, 2014.

저자 소개

이 관 형(정회원)

• 2010년 3월 ~ 현재 : 대진대학교 전기전자통신공학부 조교수

<관심분야 : 무선통신, 레이더>