

추적레이다의 표적 탐지 및 추적 기술 동향

신한섭*, 최지환**, 김대오***, 김태형****

Target Acquisition and Tracking of Tracking Radar

Han-Seop Shin*, Jee-Hwan Choi**, Dae-Oh Kim***, Tae-Hyung Kim****

ABSTRACT

In this paper, we described the model of noise, target for tracking radar and range tracking, angle tracking, and Doppler frequency tracking for target acquisition and tracking. Target signal as well as the noise signal is modeled as random process varying with elapsed time. This paper addresses three areas of radar target tracking: range tracking, angle tracking, and Doppler frequency tracking. In general, range tracking is prerequisite to and inherent in both angle and Doppler frequency tracking systems. First, we introduced the several range tracking and described techniques for achieving range tracking. Second, we described the radar angle tracking techniques including conical scan, sequential lobing, and monopulse. Finally, we presented concepts and techniques for Doppler frequency tracking for several radar types.

초 록

추적레이다는 안테나로부터 폭이 매우 좁은 펄스를 표적에 위치시켜 표적에서 돌아오는 신호를 수신하여 표적의 위치 (거리, 각도, 속도 등)를 추적하는 장비이다. 추적레이다가 특정한 표적을 탐지하고 추적하기에 앞서 표적과 주변 환경의 특성을 예측하기 위해 잡음 신호와 표적 신호의 수학적 모델이 필요하다. 본 논문에서는 일반적으로 적용되는 잡음 신호와 표적 신호의 모델에 대한 이론적인 내용을 소개하였고, 이와 더불어 표적의 탐지와 추적을 위한 거리 추적, 각도 추적 및 도플러 주파수 추적에 대한 일반적인 기법들을 기술하였다.

Key Words : Tracking Radar (추적레이다), 표적 탐지 (Target Acquisition), 표적 추적 (Target Tracking)

* 신한섭, 한국항공우주연구원 발사체연구본부 나로우주센터 기술관리팀
hsshin@kari.re.kr

** 최지환, 한국항공우주연구원 발사체연구본부 나로우주센터 기술관리팀
choijh@kari.re.kr

*** 김대오, 한국항공우주연구원 발사체연구본부 나로우주센터 기술관리팀
daekim@kari.re.kr

**** 김태형, 한국항공우주연구원 발사체연구본부 나로우주센터 기술관리팀
thkim@kari.re.kr

1. 서론

추적레이더는 안테나로부터 폭이 매우 좁은 펄스를 표적에 위치시켜 표적에서 돌아오는 신호를 수신하여 표적의 위치 (거리, 각도, 속도 등)를 추적하는 장비이다. 일반적으로 추적레이더는 수색레이더 (search radar)보다 매우 정확한 표적의 위치 정보를 획득하기 위하여 상대적으로 매우 예리한 빔폭 (beamwidth)을 사용한다. 이러한 빔폭의 제한때문에 추적레이더가 3차원 공간에서 특정한 표적을 탐지하여 추적하는 것은 쉽지 않다. 그래서 추적레이더는 특정한 표적을 추적하기 위해서 수색레이더나 다른 근원으로부터 이용 가능한 표적의 대략적인 위치 정보를 알아야 한다. 이러한 정보를 이용하면 추적레이더가 안테나 빔의 지향각과 거리를 특정한 표적의 위치에 맞추는 표적 획득 (target acquisition) 과정이 용이하다. 이러한 표적 획득 후 추적레이더는 안테나 빔의 지향각과 거리 정보를 이용하여 시간에 따라 연속적으로 표적을 추적할 수 있다.

먼저 표적 획득은 여러 가지 원인에 의해 발생하는 잡음 신호와 섞여서 수신되는 표적 신호를 검출하는 첫 번째 단계라 할 수 있다. 여기서 일반적으로 고려하는 잡음 신호는 배경잡음 (background echo), 대기 잡음 (atmospheric noise), 레이더의 자체 수신기에서 발생하는 잡음 등이 존재한다. 배경잡음과 대기 잡음은 표적 신호가 추적레이더의 수신기로 돌아오기 전에 이미 표적 신호와 섞여서 수신되며, 이렇게 수신된 표적 신호가 레이더 자체 수신기 내의 각 단계를 거치면서도 잡음이 추가적으로 동반된다. 그러므로, 표적 신호를 검출하는 표적 획득 단계에서는 잡음 신호의 특성을 잘 고려하여야 한다. 또한 표적 신호의 자체 특성도 추적레이더의 검출 성능을 산출하는데 아주 중요한 파라미터이다.

본 논문에서는 추적레이더의 표적 검출과 연관된 잡음 신호 및 표적의 특성을 살펴보고, 이러한 특성을 반영한 표적 탐지 및 추적 기법에 대한 기술 동향을 기술하고자 한다.

2. 잡음 및 표적 신호 모델

2.1 잡음 신호 모델

추적레이더의 표적 탐지 및 획득 과정은 여러 가지 원인에 의해서 존재하는 잡음 신호로부터 표적 신호를 검출해 나가는 과정이다. 그래서 잡음 신호의 일반적인 특성을 살펴보기 위하여 추적레이더가 기동하지 않는 점 표적 (point target)을 추적하는 경우를 가정하였다.

잡음신호는 전도성 매체 (conducting medium)에서 자유 전자 (free electron)의 임의적인 움직임에 의해서 생성된다. 이러한 자유 전자의 생성 및 움직임에 의해 발생하는 잡음 전압은 시간의 흐름에 따라 확률적으로 변하는 확률 과정 (random process)으로 표현할 수 있다.

이러한 확률 과정에 대한 수학적 표현은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(t) = a(t) \cos [\omega_0 t + \theta(t)] \quad (1)$$

여기서 $n(t)$ 는 추적레이더 수신기에서 발생한 잡음 전압, $a(t)$ 는 포락선 변조 (envelope modulation)의 크기, ω_0 는 전송 주파수, $\theta(t)$ 는 위상 변조의 크기를 나타낸다.

위의 식에서 설정한 유일한 가정은 잡음의 대역폭 B_n 이 전송 주파수 ω_0 보다 매우 작다는 것이다. 이 가정은 일반적인 레이더에서 대부분 만족한다.

$$B_n \ll \omega_0/2\pi \quad (2)$$

포락선 변조의 크기 $a(t)$ 와 위상 변조의 크기 $\theta(t)$ 는 모두 확률 과정으로 표현이 가능하고, 전송 주파수 ω_0 는 이미 알고 있는 결정된 값이다. 또한 특정한 시간 t_1 에 발생하는 잡음 전압의 크기는 다음과 같이 Rayleigh 확률밀도함수(probability density function)로 표현할 수 있다.

$$p(a) = \frac{a}{\sigma_n^2} \exp[-a^2/2\sigma_n^2], (a \geq 0) \quad (3)$$

a 는 $a(t_1)$ 의 간략한 표기이며, σ_n^2 은 $a(t_1)$ 의 확률적인 분산을 나타낸다. 또한 특정한 시간에서의 잡음 전압의 위상은 균일밀도함수 (uniform density function)로 표현된다.

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (4)$$

추적레이더의 안테나 빔 안에 표적이 존재하면, 표적 신호는 잡음신호와 섞여서 추적레이더 수신기로 수신된다. 이렇게 수신된 신호는 다음과 같이 수학적으로 표현된다.

$$s(t) = r(t) + n(t) \quad (5)$$

$r(t)$ 는 시간에 따른 표적 신호이며 어떤 타입의 표적에 대해서 시간에 따라 확률적으로 변하는 확률 과정으로 고려할 수 있다. $n(t)$ 는 앞서 언급한 바와 같이 확률 과정이므로 $s(t)$ 는 결과적으로 역시 확률 과정으로 모델링이 가능하게 된다. 이러한 잡음신호의 모델을 통해 표적 신호에 대한 특성을 파악할 수 있다.

2.2 표적 신호 모델

Marcum과 Swerling은 변동성이 없는 표적과 변동성이 있는 표적 검출 성능을 예측하기 위한 이론과 방법에 대해 연구하였다. 이미 잘 알려진 Swerling이 제안한 네 가지 표적 모델은 표적의 기동에 따른 표적 단면적의 변동성에 따라 구분하여 제시하였다.

먼저 Swerling의 Case 1과 Case 2는 레이더반사 단면적 (RCS: Radar Cross Section)의 변동성이 지수 밀도 함수 (exponential density function)로 표현된다.

$$p(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} U(\gamma) \quad (6)$$

γ 는 순간적인 RCS, $\bar{\gamma}$ 는 평균 RCS이며, $U(\gamma)$ 는 단위 계단 함수 (unit step function)이다. 여기서, Case 1과 2는 많은 독립적인 산란체 (scattering element)가 존재하지만 우월한 산란체가 없는 경우에 적용되는 표적 모델이며, Case 1은 표적의 기동이 느려서 송신 펄스 간의 연관은 발생하지만 스캔 간에는 독립성을 가진 경우이며, Case 2은 표적의 기동이 빨라서 송신 펄스 간에도 독립성을 가지는 경우로 구분된다.

Swerling의 Case 3과 Case 4는 레이더반사단면적

(RCS : Radar Cross Section)의 변동성이 카이 제곱 밀도 함수 (chi-square density function)로 표현된다.

$$p(\gamma) = \frac{4\gamma}{\bar{\gamma}^2} e^{-2\gamma/\bar{\gamma}} U(\gamma) \quad (7)$$

Case 3과 4는 많은 독립적인 산란체 중에서 하나의 우월한 산란체가 있는 경우에 적용되는 표적 모델이며, Case 3은 표적의 기동이 느려서 송신 펄스 간의 연관은 발생하지만 스캔 간에는 독립성을 가진 경우이며, Case 4는 표적의 기동이 빨라서 송신 펄스 간에도 독립성을 가지는 경우로 구분된다.

위에서 언급한 네 가지 Swerling 모델은 실제 상황에 보편적으로 타당하지는 않다. 그러나 표적의 변동 특성 모델과 확률적 접근 기법은 요구하는 추적 성능을 예측하는 용도로 이용할 가치가 있다.

3. 표적 탐지 및 추적 기술

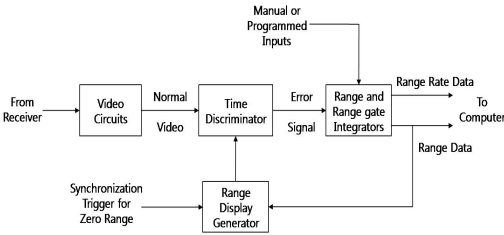
3.1 거리 추적

거리 추적 (range tracking)은 추적레이더로부터 표적까지의 경사 거리 (slant range)의 연속적인 추적을 말한다. 이러한 과정은 추적레이더가 송신한 신호가 표적에 반사되어 다시 추적레이더에 수신되는 시간을 측정하여 이루어진다.

거리 추적을 수행하기 위해서는 표적 탐지, 표적 획득 및 표적 추적이라는 3가지 단계가 필요하다. 표적 탐지는 레이더의 시야 내에 표적의 존재를 발견하는 과정이다. 이 표적 탐지는 보통 안테나 빔을 방위각 또는 고도각에 따라 스캔하거나 관심있는 영역을 탐색한다. 이러한 표적 탐지 과정에서 표적이 탐색되면 레이더는 표적 획득 모드로 전환된다. 표적 획득은 안테나 빔을 표적이 위치한 방향에 위치시키고, 표적이 위치한 방향으로 거리 추적기 (range tracker)를 맞추는 과정이다. 이러한 표적 획득이 이루어지면 거리 추적이 연속적으로 이루어지는 표적 추적 모드에 돌입하게 된다.

거리 추적 기법에는 아날로그 방식과 디지털 방식이 있다. 먼저 아날로그 자동 거리 추적 시스템의 기본

구성은 그림 1과 같다. 아날로그 방식의 기본적인 동작 특성은 수신기로부터 전달된 비디오 신호가 실제 표적 거리와 거리 추적기에서 추정한 거리 간의 오차를 최소화시키는 방법으로 동작한다. 아날로그 방식의 거리 추적기로 많이 쓰이는 기법은 early-gate와 late-gate를 사용하는 분리 게이트(split gate) 거리 추적기가 있다. 그 외에도 leading edge와 trailing edge를 이용한 거리 추적기가 있다.



자료 : Principle of Modern Radar, 1987년도
 그림 1. Analog automatic range tracking circuit

디지털 방식은 아날로그와 디지털 소자를 복합적으로 사용하여 구현한 기법과 디지털 소자만 사용하여 구현한 기법이 있다. 근래에 고속의 디지털 집적 회로 기법의 개발에 따라 대부분 디지털 소자를 이용한 거리 추적기를 사용하고 있다. 이에 따라 디지털 방식의 거리 추적기는 아날로그 비디오 신호를 디지털 형식으로 변환하는 과정을 거쳐서 집적된 디지털 회로를 이용하여 거리를 추적하는 방법을 사용한다. 디지털 방식은 레이더의 사용 목적과 응용 방식에 따라서 다양하게 구성될 수 있다.

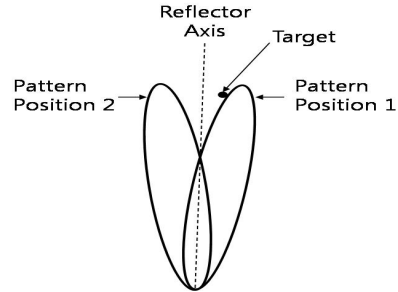
중중 거리 분해능(range resolution)과 거리 정확도(range accuracy)라는 용어 자체가 혼동되는 경우가 있다. 거리 분해능이란 근접하여 위치한 두 개의 표적을 거리 공간에서 구분할 수 있는 능력을 의미하고, 거리 정확도는 거리 오차 증가량 내에서 레이더로부터 표적까지의 실제 거리를 결정하는 능력을 나타낸다.

3.2 각도 추적

각도 추적(angle tracking)은 안테나의 지향각 정보를 이용하여 실제 표적의 위치와 안테나의 지향각 사이의 각도 오차를 찾는 방법을 주로 사용한다. 각도 추적 기법에는 빔 절환(sequential lobing) 방식,

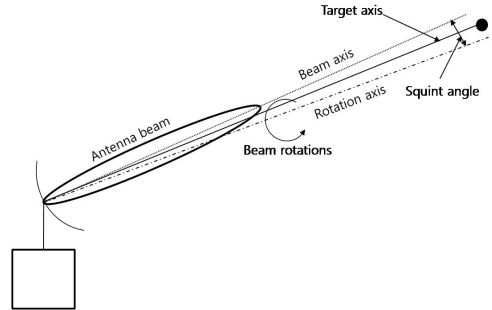
원추형 주사(conical scan) 방식, 모노펄스(monopulse) 방식 등이 있다.

빔 절환 방식은 그림 2에서와 같이 하나의 안테나를 이용하여 방향이 약간 다른 2개의 안테나 빔을 교차시켜 각각의 안테나 빔으로부터 수신되는 표적 신호의 크기를 비교하여 실제 표적의 방향을 찾아내는 방법이다.



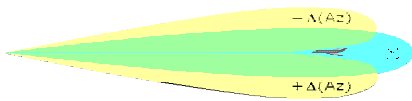
자료 : Principle of Modern Radar, 1987년도
 그림 2. Antenna beam switching in sequential lobing

원추형 주사 방식은 그림 3과 같이 빔 절환 방식을 발전시킨 것으로 기계적인 빔 절환 대신에 모터에 의해 구동되는 급전 혼을 회전시키는 방식으로 빔 절환 방식과 개념적으로 유사하다. 이 방식은 최근까지 많이 사용된 방식이지만 빔 절환 방식과 마찬가지로 기계적인 동작에 따른 신호 크기의 변동성의 문제로 인해 근래에는 모노펄스 방식을 더 선호하는 경향이 있다.



자료 : Introduction to Radar Systems, 2001년도
 그림 3. Conical scan for angle tracking

모노펄스 방식은 그림 4와 같이 중첩된 안테나 빔으로부터 동시에 얻어지는 정보를 이용하는 방식으로 앞서 언급한 빔 절환 방식과 원추형 주사 방식처럼 시간을 분할해서 사용하는 것이 아니라 공간을 분할하여 각도 오차를 얻는다.



자료 : Introduction to Radar Systems, 2001년도
 그림 4. Sum & difference signal in monopulse system

그림 4에서는 방위각 오차를 검출하기 위한 2개의 안테나 빔을 사용하였지만, 방위각과 고각의 오차를 동시에 검출하기 위해서는 4개의 중첩된 안테나 빔이 필요하다. 4개의 안테나 빔 중에서 상하방향의 빔 패턴의 차이를 이용하여 고각 오차를 얻고, 좌우방향의 빔 패턴의 차이를 이용하여 방위각 오차를 얻을 수 있게 된다.

이 모노펄스 방식은 빔 절환 방식과 원추형 주사 방식같이 안테나의 기계적인 동작이나 구조적인 형태로 빔 패턴을 형성하여 각도 오차를 추정하는 방식이 아니기 때문에 좀 더 높은 안정성과 측정의 정확성을 달성할 수 있어서 최근에 가장 각광받고 있는 각도 추적 방식이다.

3.3 도플러 주파수 추적

일반적으로 추적레이더는 움직이거나 고정되어 있는 물체를 식별하기 위해서 도플러 효과를 이용한다. 그러므로 추적레이더는 지형 클러터와 같은 고정된 클러터가 존재하는 상황에서도 움직이는 표적을 탐지하고 추적하는 것이 가능하다. 또한 도플러 주파수를 직접적으로 측정함으로써 표적의 위치를 좀 더 정확하게 예측할 수 있다.

추적레이더가 하나의 표적을 추적하는 동안 표적의

속도가 측정 시간 간격에 비해 매우 작다면 표적에 대한 적절한 추적이 유지할 수 있지만 만약 근거리에서 빠르게 움직이는 표적에 대해서는 좀 더 정확한 위치 예측 방법이 필요하다. 이를 해결하기 위한 방법으로 칼만 필터를 많이 사용하는데, 그 중에서 칼만 필터의 특별한 경우인 $\alpha-\beta$ 필터가 널리 사용되고 있다.

표준 칼만 필터는 1960년 Rudolf E. Kalman의 논문 “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”에 그 시초를 두고 있다. 이 필터는 실시간으로 표적의 운동방정식을 토대로 시간에 따른 표적의 상태를 추정하는 효율적인 재귀 계산법 (Recursive Computational Solution)이다.

표준 칼만 필터는 시간에 따른 표적의 상태 변화를 적절하게 예측할 수 있도록 잡음으로부터 원하는 추정값을 찾아내기 위해 사용된다.

여기에서 표준 칼만 필터는 다음과 같은 기본적인 가정을 한다. 첫 번째, 표적의 초기 상태벡터는 이미 알고 있는 평균과 분산을 가지는 가우시안 분포를 따르는 확률변수로 가정한다. 두 번째, 이 초기 상태벡터는 과정 잡음과 측정 잡음에 상호 독립을 가정한다. 이 가정들은 표준 칼만 필터의 가장 큰 장점인 반면 가장 큰 단점으로 작용하기도 한다. 표적의 상태 벡터와 측정값이 정규분포를 따르는 일반적인 경우에는 간단한 표준 칼만 필터 알고리즘을 통해 최적화할 수 있는 강력한 도구가 되지만, 정규분포가 아니거나 확률분포를 알 수 없는 경우에는 그 적용에 있어 문제와 어려움이 크다. 그러나 오차의 확률분포가 정규분포가 아닌 경우라 하더라도 이를 정규분포로 간주함에 있어 큰 무리가 없는 경우에는 표준 칼만 필터는 아직까지 유용하고 강력한 도구로 사용된다.

표 1. Typical Doppler Tracking Methods

Tracking Mode	Radar Type	Sampling Rate	Doppler Tracking Bandwidth	Typical Tracking Methods
Single Target (continuous sampling)	CW	IF Bandwidth (highest)	Narrowest	Phase-lock loop
	High PRF Low PRF	PRF PRF		
Multiple target (intermittent sampling)	Phased array	PRF burst; frequent revisit	Broadest	Multistate Kalman filter
	Mechanical scan	PRF burst; less frequent revisit (lowest)		

표 1에서는 일반적인 도플러 추적 방법에 대해서 하나의 표적을 추적하는 경우와 여러 개의 표적을 추적하는 경우로 나누어 요약하여 정리하였다.

4. 결론

현재 추적레이다에 적용되는 일반적인 잡음과 표적 모델에 대한 이론을 기술하였다. 이러한 모델은 오랜 기간동안 사용되어 왔으며, 추적 상황에 맞는 새로운 모델을 추가로 설계하기도 하고, 기본적인 모델을 변형하여 적용하기도 하였다. 최근에도 추적레이다의 사용 목적에 부합하는 모델의 설계와 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편 디지털 집적 회로 기술의 발전으로 인해 현재 사용되고 있는 대부분의 추적레이다는 아날로그 프로세스 방식을 벗어나 완전한 디지털 프로세스 방식을 적용하고 있다. 아날로그 방식이나 일부 디지털 소자를 이용한 방식에 비해서 완전한 디지털 방식은 표적 특성에 따라 적응적으로 대응할 수 있으며, 광범위한 추적 조건에서도 사용이 가능한 장점이 있다. 이외에도 기계적인 안테나 동작이나 구조적인 형태에 따른 추적의 부정확성을 개선한 신뢰성 있고 안정적인 방법을 이용한 모노펄스 방식과 같은 기술들이 널리 사용되어 추적의 정확도를 높이는 데 기여를 하고 있다. 또한 표적의 동적 특성에 따라 표적의 예상 위치와 속도를 정확하게 예측하기 위한 여러 필터들도 꾸준히 개발되고 있다.

참고문헌

1. A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill Book Co., New York, 1965.
2. W. B. Davenport, Jr., and W. L. Root, An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise, McGraw-Hill Book Co., New York, 1958.
3. J. I. Marcum, "A Statistical Theory of Target Detection by Pulsed Radar : Mathematical Appendix", IRE Transactions on Information Theory, vol. IT-6, no. 2, April 1960, pp. 59-267.
4. Peter Swerling, "Detection of Fluctuating Pulsed Signals in the Presence of Noise", IRE Transactions on Information Theory, vol. IT-3, no. 3, September 1957, pp. 175-178.
5. Jerry L. Eaves and Edward K. Reedy, Principles of Modern Radar, New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987.
6. Merrill I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, New York, McGraw-Hill Book Co., 2001.
7. Merrill I. Skolnik, Radar Handbook, New York, McGraw-Hill Book Co., 1990.
8. R. E. Kalman, "New Results in Linear Filtering and Prediction Theory", Transactions of the ASME, vol. 83D, March 1961, pp. 95-108.
9. 신한섭, 최지환, 김대오, 김태형, "추적레이다의 표적 추적을 위한 추적 알고리즘 기술동향", 항공우주산업 기술동향, 제4권, 제1호, 2006, pp.83-91.