

레이더에서의 Markov Chain 분석을 이용한 TWS 방식과 Adaptive Tracking 방식의 추적 형성 거리 비교

Comparison on Track Formation Range between TWS and Adaptive Tracking Using Markov Chain Analysis in a Radar System

안창수 · 노지은 · 장성훈 · 김선주

Chang-Soo Ahn · Ji-Eun Roh · Sung-Hoon Jang · Seon-Joo Kim

요 약

표적 추적을 위해 탐색 빔의 스캔간 획득 정보 상관 관계를 이용하는 TWS(Track While Scan) 방식과 달리, 위상 배열 레이더에서는 탐색 빔과 별도로 추적 빔을 할당하여 표적을 추적하는 adaptive tracking 방식을 사용할 수 있으며, 이로 인해 추적 형성 거리를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 정기적인 탐색 빔 사이에 별도의 추적 빔들을 균등 시간 간격으로 할당한 adaptive tracking 방식을 제시하였다. 그리고 제안한 adaptive tracking 방식의 markov chain과 추적 형성 거리를 기존의 TWS 방식과 함께 나타내었다. 모의실험 결과, 동일한 추적 확인 조건 하에서 제안한 adaptive tracking 방식이 TWS 방식에 비해 27.6 % 정도의 증가된 추적 형성 거리를 나타낼 수 있음을 보여주었다.

Abstract

Compared with the TWS(Track While Scan) tracking that uses scan-to-scan correlation at search illuminations for targets track, a phased array radar can use adaptive tracking which assigns additional track illuminations and the track formation range can be improved as a result. In this paper, an adaptive tracking, the search and track illuminations of a target are synchronized such that the extra illuminations are evenly distributed between the search illuminations, is proposed. Markov chain and track formation range for the proposed adaptive tracking are shown with them for the conventional TWS. The simulation result shows that the proposed adaptive tracking has improved track formation range by 27.6 % compared with the conventional TWS tracking under same track confirmation criterion.

Key words : Markov Chain, Radar Track Formation Range, TWS, Adaptive Tracking

I. 서 론

기존의 안테나 면을 기계적으로 회전하여 탐색을 수행하는 기계식 빔 조향 레이더와 달리, 전자적으로 빔을 조향할 수 있는 위상 배열 레이더 기술을 접

목함으로써, 레이더의 기능 및 성능 향상이 이루어지고 있으며, 이에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다^{[1],[2]}. 특히, 위상 배열 레이더의 빔 기인성에 의한 탐색과 추적 빔의 독립적인 운용 가능성은 레이더의 추적 성능을 크게 향상시킬 수 있게 된다^{[3],[4]}.

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 12, 2013 ; Revised April 25, 2013 ; Accepted April 29, 2013. (ID No. 20130312-037)

· Corresponding Author : Chang-Soo Ahn (e-mail : ifrainy@add.re.kr)

일반적으로 이러한 레이더의 성능은 Monte Carlo 형태의 시뮬레이션을 통하여 평가될 수 있으나, 레이더 설계 초기에 요구도 만족 가능성을 확인하는 방법으로서, Markov chain을 이용하기도 한다^[5].

본 논문에서는 위상 배열 레이더에서의 정기적인 탐색 빔 사이에 별도의 추적 빔들을 균등 시간 간격으로 할당하는 adaptive tracking 방식을 제시하였다. 제시한 방식에 의한 추적 형성 거리의 향상을 입증하기 위하여 기존의 TWS 방식에 대한 Markov chain과 제안한 adaptive tracking 방식의 Markov chain을 나타내었으며, 그 결과를 비교하였다. 본 논문의 II장에서는 기존 TWS 방식의 Markov chain과 이를 이용한 추적 형성 거리의 도출 과정을 설명하였고, III장에서는 제안한 adaptive tracking 방식의 Markov chain과 이에 따른 추적 형성 거리의 도출 및 기존 TWS 방식 결과와의 비교를 기술하였으며, 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. TWS 방식의 Markov Chain과 추적 형성 거리

레이더에서의 추적 초기화와 추적 삭제의 과정은 다음과 같은 Markov chain 관계식으로 표현될 수 있다^{[5],[6]}.

$$\mathbf{x}(k+1)=F(k)*\mathbf{x}(k) \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{x}(k)$ 는 k 라는 시점에서 발생할 수 있는 여러 상황(S_i)에 대한 확률을 나타내는 벡터이며, F 는 천이 행렬(transition matrix), 즉, k 라는 시점에서 발생한 상황이 $k+1$ 이라는 시점에서 발생한 상황에 미치는 영향을 나타내는 것이다. Markov chain의 개념이 어떤 시점에서의 결과는 바로 이전 시점에 의해서만 영향을 받지, 그 이전 과거의 상황에 대해서는 종속되지 않는다는 것임을 유념할 필요가 있다. $F(k)$ 은 탐지 확률(P_d)의 알려진 함수 형태로 나타나기 때문에 초기 조건 벡터 $\mathbf{x}(1)$ 이 주어지면, $\mathbf{x}(k)$ 가 주어진 상황에서 이후 시점인 $\mathbf{x}(k+1)$ 의 값을 계산해 낼 수 있게 된다.

이해를 돕기 위해 레이더의 대표적인 탐지 성능 지표인 50 %의 단일 탐지 확률을 갖는 단일 탐지거리(single scan detection range, $R_{d,50}$)와 85 %의 누적 탐

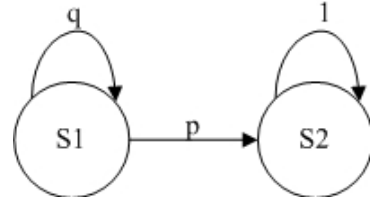


그림 1. 누적 탐지거리 도출을 위한 Markov chain
Fig. 1. Markov chain for cumulative detection range.

지 확률을 갖는 누적 탐지거리(cumulative detection range, $R_{d,acc,85}$)를 Markov chain을 이용하여 도출하는 과정을 나타내면 다음과 같다. 먼저, 해당 Markov chain을 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 이에 대한 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= F(k)*\mathbf{x}(k) \\ F(k) &= \begin{bmatrix} q(k) & 0 \\ p(k) & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $p(k)$ 는 시간 t_k 또는 그에 상응하는 거리 R_k 에서의 단일 탐지 확률(p)를 의미하며, $q(k)=1-p(k)$ 이고, Swerling I 표적에 대해 아래와 같이 표현할 수 있다^[7].

$$P = P_{fa}^{1+SNR} = P_{fa}^{\frac{1}{1+SNR_{50}} \left(\frac{R_{50}}{R_k}\right)^4} \tag{3}$$

여기서 P_{fa} 는 오경보 확률(probability of false alarm), SNR_{50} , R_{50} 은 $P=0.5$ 인 기준 신호대 잡음비 및 그에 해당하는 표적의 거리이다.

결국 누적 탐지 확률($P_{d,acc}$)은 상기 $\mathbf{x}(k)$ 의 $x_2(k)$ 를 의미하므로, 표 1과 같은 레이더 시스템 파라미터를 가정하여 단일 탐지거리($R_{d,50}$)와 누적 탐지 거리

표 1. 레이더 시스템 설정 파라미터
Table 1. Assumed parameters in a radar system.

Parameters	Value
R_{50}	100 km
P_{fa}	10^{-6}
Ownship velocity	300 m/s
Target velocity	-300 m/s
Search revisit time	2s
Initial range	250 km

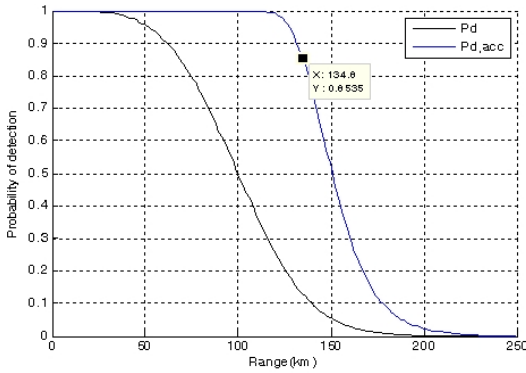


그림 2. 거리에 따른 단일 및 누적 탐지 확률
Fig. 2. Single scan and cumulative detection probability versus range.

($R_{d,acc,85}$)를 나타내면 그림 2와 같다.

이제 TWS 방식에서의 추적 형성 거리를 Markov chain을 이용하여 도출하기 위하여 표 1의 파라미터와 더불어 다음과 같은 추적 확인 조건(track confirmation criterion)을 설정한다.

- Confirmation criterion : $2/M$ and $1/N$, with $M=N=4$

즉, 처음 4번의 스캔 시도 중에 먼저 2번의 표적 탐지가 이루어진 후, 다시 말해 2번의 표적 탐지가 이루어질 때까지 4번의 스캔을 시도할 수 있으며, 2번의 탐지 정보가 획득되면, 다음 $1/N$ 과정으로 진입한다. 다시 4번의 스캔 시도 중에 1번 탐지가 이루어지면, 해당 표적에 대한 확정 추적을 선언할 수 있게 된다. TWS 방식은 이러한 스캔 시도가 모두 탐색 범에 의해서만 이루어지게 되며, 각 스캔 시도 사이는 2s의 시간 간격을 갖게 된다. 그림 3은 이러한 TWS 방식을 나타내는 Markov chain을 나타내며, 해당하

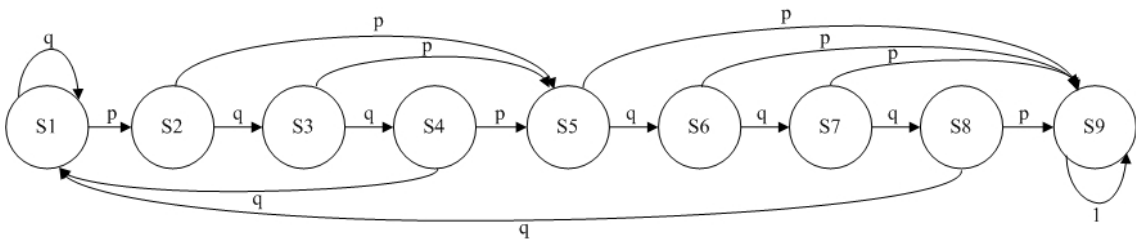


그림 3. $2/M$ 과 $1/N$ 의 추적 확인 조건을 갖는 TWS 방식의 Markov chain
Fig. 3. Markov chain for TWS with confirmation criterion of $2/M$ and $1/N$.

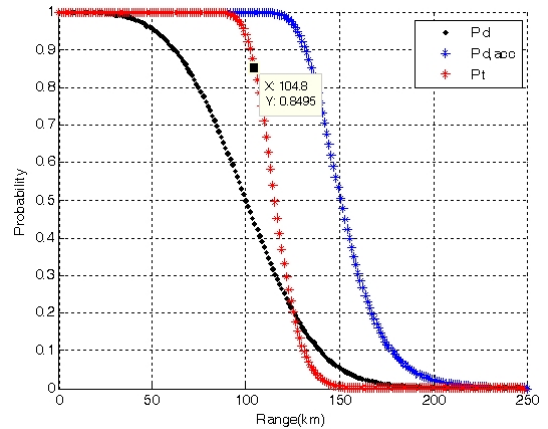


그림 4. TWS 방식에서의 거리에 따른 추적 확률
Fig. 4. Track probability versus range in TWS tracking.

는 천이 행렬은 식 (4)와 같다.

$$F = \begin{bmatrix} q & 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & p & p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p & p & p & p & q \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 식 (1)과 식 (4)를 이용하여 k 에 대해 반복적인 계산을 함으로써, 시간 t_k 또는 그에 상응하는 거리에서의 추적 확률($P_t(k)$)을 구할 수 있으며, 이는 결국 $P_t(k) = x_t(k)$ 가 된다. 여기서 $x(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 이다. 그림 4는 이러한 계산을 통해 구한 TWS 방식에서의 거리에 따른 추적 확률을 나타낸 것이며, 일반적으로 85%의 추적 확률을 가질 때의 거리인 추적 형성 거리($R_{t,acc,85}$)는 약 105 km임을 알 수 있다.

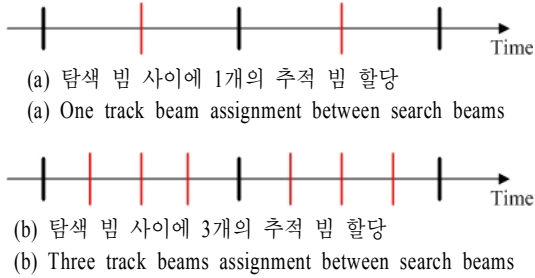


그림 5. 제안하는 adaptive tracking 방식에서의 빔 할당
Fig. 5. Beam assignment in the proposed adaptive tracking.

III. Adaptive Tracking 방식의 Markov Chain과 추적 형성 거리

본 장에서는 제안하고자 하는 위상 배열 레이더에서의 정기적인 탐색 빔 사이에 별도의 추적 빔들을 균등 시간 간격으로 할당하는 adaptive tracking 방식을 설명하고, 이에 대한 Markov chain을 나타낸 후, 이를 이용한 추적 형성 거리를 도출하고자 한다.

먼저 그림 5는 제안하는 adaptive tracking 방식에서의 탐색 빔(검정선)과 추적 빔(빨강선)을 시간에 따라 할당한 것을 나타낸다. 그림 5(a)에서는 2초의 탐색 재방문 시간과 1초의 허용 가능한 최대 추적 재방문 시간을 가정한 것이며, 이 경우 추적 빔을 탐색 빔 사이에 균등 시간 간격으로 할당하면서 추적 빔 사이의 탐색 빔을 추적 갱신을 위해 사용할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5(b)에서는 2초의 탐색 재방문 시간속에 3개의 추적 빔을 균등 시간 간격으로 할당한 경우를 나타내며, 본 논문에서는 그림 5(b)의 adaptive tracking 방식을 적용하여 기존의 TWS 방식과의 추적 형성 거리를 비교하고자 한다.

II장에서의 TWS 방식에 사용된 레이더 시스템 파라미터와 추적 확인 조건을 동일하게 적용하고, 탐색 빔 사이에 3개의 추적 빔을 균등 시간 간격으로 할당하는 adaptive tracking 방식을 나타내는 Markov chain은 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 탐색 빔의 경우는 S_i 상태로 표시되며, 별도의 추적 빔은 A_i

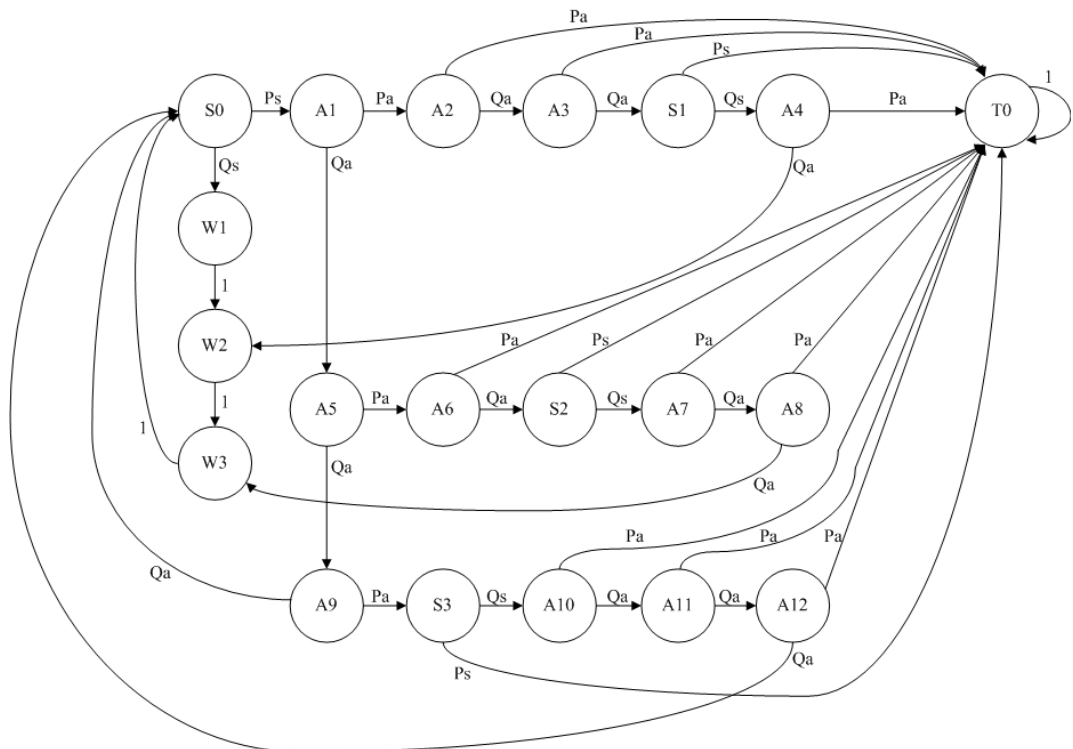


그림 6. 제안한 adaptive tracking 방식의 Markov chain
Fig. 6. Markov chain for the proposed adaptive tracking.

가정하고, P_s 는 II 장의 방법과 동일하게 구할 수 있다. 또한, II 장에서는 k 에 대해 반복적인 계산을 할 때, 시간 간격을 탐색 재방문 시간인 2초로 설정하였으나, 탐색 빔 사이에 3개의 추적 빔을 할당하는 것을 고려하여 반복 계산 시간 간격을 0.25초로 두고 계산하였다.

그림 7은 이러한 계산을 통해 구한 제안한 Adaptive Tracking 방식에서의 거리에 따른 추적 확률을 나타낸 것이며, 이는 결국 식 (5)의 천이 행렬로부터 $x_{20}(k)$ 를 구한 것을 의미한다. 추적 형성 거리($R_{t,acc,85}$)는 약 134 km로서 기존 TWS 방식 대비 약 27.6 % 증가함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위상 배열 레이더의 빔 기민성을 이용하여 탐색 빔과 별도로 추적 빔을 할당하여 표적을 추적하는 adaptive tracking 방식을 사용함으로써, 레이더의 추적 형성 거리가 향상될 수 있음을 나타내었다. 이를 위하여 본 논문에서는 정기적인 탐색 빔 사이에 별도의 추적 빔들을 균등 시간 간격으로 할당하는 adaptive tracking 방식을 제시하였고, 기존의 TWS 방식에 대한 Markov chain과 제안한 Adaptive Tracking 방식의 Markov chain을 나타내었으며, 이를 이용한 추적 형성 거리의 결과를 비교하였다. 제안한 adaptive tracking 방식에서의 추적 형성 거리

($R_{t,acc,85}$)는 약 134 km로서 기존 TWS 방식 대비 약 27.6 % 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] E. R. Billam, "MESAR-the application of modern technology to phased array radar", *IEE Tutorial Meeting on Phased Array Radar*, Sep. 1989.
- [2] E. R. Billam, "Phased array radar and the detection of low observables", *Proc. IEEE International Radar Conf.*, pp. 491-495, 1990.
- [3] W. Holpp, C. Worning, "New electronically scanned array radars for airborne applications", *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference*, 2007.
- [4] R. Hendrix, "Aerospace system improvements enabled by modern phased array radar-2008", *Proc. IEEE International Radar Conf.*, pp. 275-280, 2008.
- [5] S. S. Blackman, *Multiple-Target Tracking with Radar Applications*, Artech House, Dec. 1986.
- [6] N. Wax, "Signal-to-noise improvement and the statistics of track populations", *Journal of Applied Physics*, vol. 26, pp. 586-595, May 1955.
- [7] D. P. Meyer, H. A. Mayer, *Radar Target Detection*, Academic Press Inc. New York and London, 1973.
- [8] S. S. Blackman, R. Popoli, *Design and Analysis of Modern Tracking System*, Artech House, 1999.

안 창 수



2005년 2월: 고려대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2005년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 2013년 3월~현재: 고려대학교 컴퓨터·전자통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 항공기 레이더 운용 모드 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템 설계

노 지 은



2000년 2월: 부산대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2002년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2006년 2월: 포항공과대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2006년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 통제 알고리즘 등

장 성 훈



1998년 2월: 서울시립대학교 전자
공학과 (공학석사)
1998년 2월~현재: 국방과학연구소
선임연구원
[주 관심분야] 레이더 시험평가, 항
공기 레이더 연구개발

김 선 주



1988년 2월: 아주대학교 전자공학
과 (공학석사)
1988년 3월~현재: 국방과학연구소
책임연구원
[주 관심분야] 반도체 송수신모듈
설계, 능동 위상 배열 레이더 시
스템 설계, 항공기 레이더