

추적 레이더를 위한 거리 추적기의 구현 및 성능평가

김수홍, 이승룡, 심성철, 김홍락, 김이한  
LG정밀(주) 연구소

Implementation and Performance Evaluation of the Digital Range Tracker for Tracking Radar Applications

Soohong Kim, Seungryong Lee, Sungchul Shim, Hongrak Kim, and Yihan Kim  
LG Precision R&D Lab.

**Abstract** - We propose the digital range tracking algorithm for a tracking radar. The proposed digital range tracker are designed and implemented. Simulation results are presented for demonstrating the performance of the proposed range tracker. According to our field test results, the implemented digital range tracker performs well even in the real environments.

1. 서 론

레이더에서 표적의 추적은 매우 중요한 기능중의 하나이다. 표적 추적은 거리 추적 (Range Tracking) 과 각 추적 (Angle Tracking) 의 두 개의 부분으로 나눌 수 있는데 거리 추적은 표적 신호가 항상 Range Window 또는 Gate 내에 위치하도록 해 주어서 각 추적이나 표적 탐지에 이 신호를 사용할 수 있도록 해주는 역할을 수행한다. 각 추적은 표적이 안테나의 Boresight 방향에 위치하도록 해주는 것으로 다시 고도각 (Elevation Angle) 추적과 방위각 (Azimuth Angle) 추적으로 나뉘어 지게 된다 [1]. 추적을 계속하기 위해서는 수신되는 표적 신호로부터 추정된 거리와 실제 위치사이의 오차를 Range Discriminator 에 의해 추출해야 하고 이를 이용하여 거리 추적 루프에 의해 오차를 줄이는 방향으로 Gate 를 이동시키게 된다.

거리 추적기에 사용되는 Discriminator 는 두 가지가 있는데 그중 하나가 Early/Late Gate 또는 Split Gate 방식이고 다른 하나는 Leading-Edge 방식이다 [1], [2], [3]. 두 방법중 Early/Late Gate 가 널리 사용되며 본 논문에서도 이 방식을 채택한다. 초기의 추적 레이더에는 아날로그 방식의 거리 추적기가 사용되었으나 현재는 거의 대부분의 추적 레이더에서 디지털 방식의 거리 추적기 [4] 가 사용되고 있다. 디지털 방식의 장점은 잡음에 강하고 구조의 변경이 용이하다는 것이다.

본 논문에서는 기본적인 거리 추적기의 원리를 설명하고 거리 추적기 루프의 설계 방안을 제시한다. 거리 오차의 발생 알고리즘을 제안하고 PI 제어기를 사용한 거리 추적기의 구조를 하드웨어로 제작하여 이의 성능을 실험을 통해 확인한다.

2. 본 론

2.1 거리 추적기

2.1.1 Maximum Likelihood 거리 추적기

레이더와 표적과의 거리가  $R$  이라면 표적에서 반사된 레이더의 수신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = as(t-\tau) + n(t) \quad (1)$$

여기서  $s(t)$  는 레이더의 송신신호 파형이고  $\tau=2R/v_c$  는 표적의 거리에 따른 지연시간,  $v_c$  는 전자파의 전파 속도 그리고  $n(t)$  는 평균이 영인 백색 가우시안 잡음이다. 이 경우 지연시간  $\tau$  (또는 표적과의 거리  $R$ ) 에 대한 Maximum Likelihood 추정  $\hat{\tau}$  은 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\tau}_{ML} = \arg \max_{\tau} p(\tau)$$

여기서  $p(\tau)$  는 지연시간에 대한 수신신호의 조건부 확률밀도 함수이다. 위의 식은 다시 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\tau}_{ML} = \arg \text{zero}_{\tau} \int r(t) \frac{\partial s(t-\tau)}{\partial \tau} dt \quad (2)$$

위 식의 편 미분 항을 신호의 차분 식으로 근사화시키면

$$\frac{\partial s(t-\tau)}{\partial \tau} \approx \frac{1}{2\delta\tau} \{s(t-(\tau+\delta\tau)) - s(t-(\tau-\delta\tau))\} \quad (3)$$

여기서  $s(t-(\tau+\delta\tau))$ ,  $s(t-(\tau-\delta\tau))$  는 각각 Early, Late 샘플이다. 이 구조를 Early/Late 추적기라고 한다.

2.1.2 거리 오차의 발생

위의 식 (3) 은 수신신호의 두 샘플로부터 계산된 거리 오차를 표현하고 있다. 이와같은 기능을 하는 것을 Range Discriminator라 한다. 레이더에서 송신된 펄스의 파형이 구형파인 경우 표적으로부터의 반사 신호는 수신 단의 정합필터를 거치면 그림 1 과 같이 삼각 파가 된다. 실제 반사 신호의 경우 표적의 형태, 송신 펄스의 모양 또는 레이더의 파라미터등의 영향을 받아서 삼각 파와는 다른 모양을 가진다 [1]. 여기서는 간단히 하기 위해 삼각 파라 가정한다. 이 파형은 아래와 같이 수학적으로 표현할 수 있다.

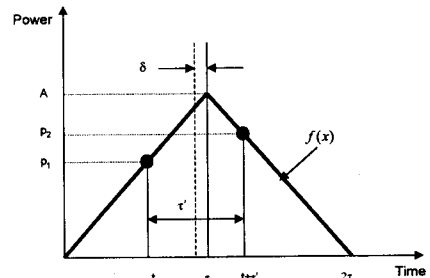


그림 1 표적 신호 모델

$$s(t) = \begin{cases} t, & 0 \leq t \leq \tau \\ -\frac{At}{\tau} + 2A, & \tau \leq t \leq 2\tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

위의 신호 모델로부터 거리 오차  $\delta R$  을 구해보자. 오차 신호를 만들어 내는 것을 Range Discrimination [3] 이라 한다.

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{At}{\tau} \\ d_2 &= \frac{-A(t+\tau)}{\tau} + 2A \\ \delta &= \tau - t - \frac{\tau}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $d_1, d_2$  는 추적하고 있는 신호의 Early, Late Gate 의 샘플 신호의 크기이고,  $\delta$  는 신호의 최대 값이 존재하는 위치와 추정된 표적 거리에 해당하는 시간과의 차를 표시한다. 따라서 거리 오차  $\delta R$  은 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\delta R = K_R \frac{d_2 - d_1}{d_2 + d_1} \quad (6)$$

여기서  $K_R$  은 추출된 신호로부터 거리 오차를 변환하기 위하여 사용되는 상수이고  $\frac{d_2 - d_1}{d_2 + d_1}$  는 정규화된 거리 오차이다. 정규화를 하는 이유는 수신신호의 크기가 변동하더라도 거리 오차 신호가 이의 영향을 받지 않도록 하기 위함이다 [2].

## 2.2. 시스템 구성

거리 추적 루프의 구성은 그림 2 와 같다. 수신된 신호로부터 Range Discriminator 를 통하여 거리 오차를 계산한 후 거리 추적기에 입력하면 추적 거리 및 추적 거리의 추정치가 출력된다. 여기서 추정된 추적 거리에 따른 게이트에서의 신호 샘플은 레이더의 신호 대역폭에 의해 정해진 샘플 률에 의해 샘플의 위치가 제한되며 따라서 샘플 률보다 높은 율의 정확도를 얻을 수 없다. 이 문제를 극복하기 위해 타이밍 제어기를 사용하여 신호의 샘플링 위치를 샘플 률 이상으로 높임으로써 보다 정확한 거리 오차 값을 얻을 수 있도록 하였다.

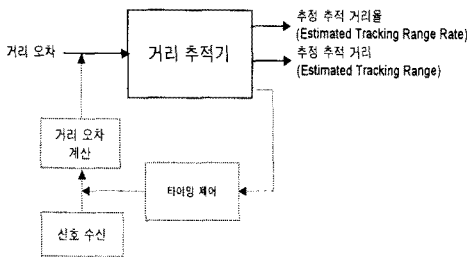


그림 2 거리 추적 루프 구성도

사용된 거리 추적기의 동적 모델은 다음과 같다. 추적하는 표적이 등속 운동을 하며 안테나의 시선 축 상에 존재하는 표적이라 가정하면, 표적의 거리는 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$r(n) = v_T r(n-1) + v_T T \quad (7)$$

여기서  $r(n)$  은 기준위치로부터 표적까지의 거리이고,

$v_T$  는 표적의 속도,  $T$  는 샘플 시간을 나타낸다. 이와 같이 가정된 거리 추적을 위한 표적의 모델을 포함한 거리 추적기 루프는 그림 3 과 같다. 여기서  $K$  는 스케일 상수이고,  $K_1$  및  $K_2$  는 사용된 PI 제어기의 이득을 나타내며 이에 대한 페 루프 전달함수는 아래의 식과 같다.

$$H(s) = K \frac{K_1 s + K_2}{s^2 + K_1 s + K_2} \quad (8)$$

PI 제어기의 파라미터들은 표적 추적의 정확도 및 정상 상태 오차 범위에 의해 결정하였다.

제안된 거리 추적기의 하드웨어 구현은 FPGA를 이용하여 구현하였고 나머지 추적 루프 부분은 DSP 상에서 소프트웨어를 이용하여 구현하였으며, 하드웨어 기능 블록도는 그림 4 와 같다.

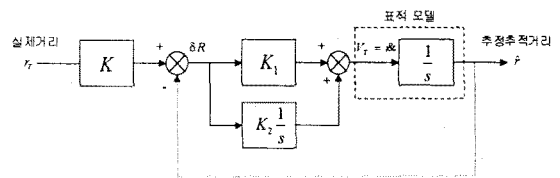


그림 3 거리 추적기 루프

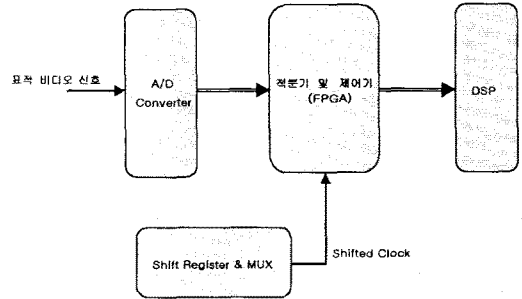


그림 4 하드웨어 기능 블록도

## 2.3 시뮬레이션 및 야외 실험 결과

제안된 거리 추적기의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 하였고 제작된 하드웨어로는 야외 시험을 수행하였다. 먼저 그림 3 의 거리 추적기 루프에 대하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 3 m/s 의 속도를 가진 표적이 이동한다고 했을 때 표적의 이동 거리는 램프 입력으로 간주할 수 있으며 이에 대한 추적 성능을 측정하였다.

그림 5 는 이 입력에 대한 거리 추적기의 출력신호이고 그림 6 은 입력신호와 출력신호와의 차, 즉 거리 오차를 표현하고 있다. 두 그림에서 볼 수 있는 것처럼 초기의 과도 상태를 지나 정상 상태에서 그 오차가 영으로 수렴함을 알 수 있다. 따라서 추적기가 표적을 잘 추적하는 것을 볼 수 있고 추적기의 출력신호가 표적의 정확한 위치 추정치가 되게 된다.

제작된 하드웨어의 성능을 입증하기 위한 실험은 다음과 같이 수행하였다. 해변에 추적 레이더 및 거리 추적기를 설치하고 해상에 일정 레이더 단면적 (RCS) 을 가진 배를 시뮬레이션 상황과 동일하게 3 m/s의 등속도로 이동하도록 한 후 이를 추적하였으며 이에 대한 결과 그림 7 과 그림 8 에 나와있다. 사용된 레이더의 송신 펄스 폭의 길이는 약 30 m 이다. 그림 7 은 추적

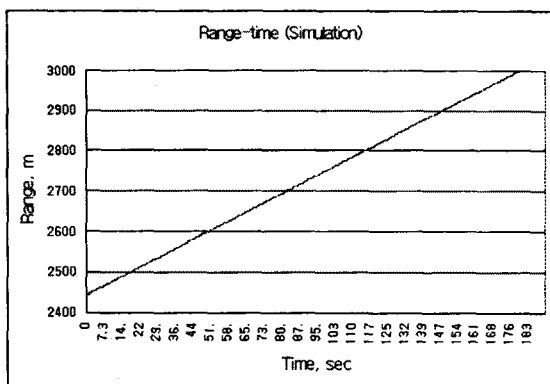


그림 5 거리-시간 시뮬레이션 그래프

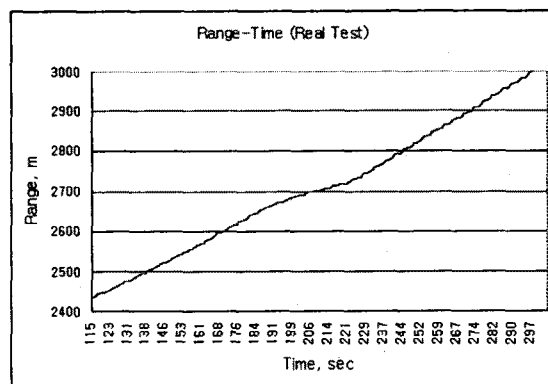


그림 7 거리-시간 실험 그래프

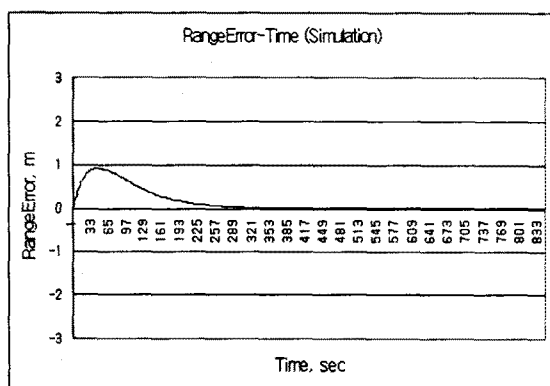


그림 6 거리오차-시간 시뮬레이션 그래프

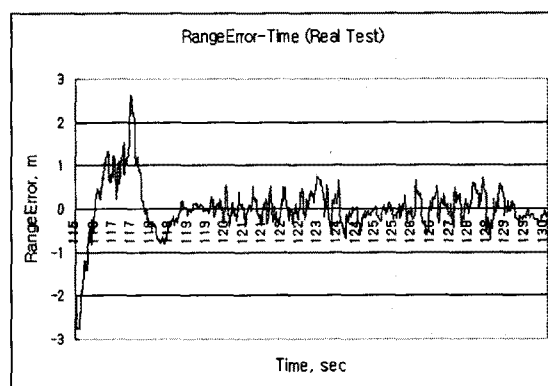


그림 8 거리오차-시간 실험 그래프

기의 출력인 배의 이동 거리를 일정 시간 관측한 결과이고, 그림 8 은 추적 시 측정된 거리 오차를 나타낸 것으로 정상 상태에서 1 m 이내의 작은 오차를 유지하여 표적을 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 여기서 시뮬레이션과는 달리 오차 곡선이 랜덤 하게 변하는 것은 실제 표적 신호의 위치가 펄스마다 변동하는 것과 수신기의 잡음의 영향 때문으로 생각된다. 하지만 송신 펄스의 폭이 30 m 이기 때문에 거리 오차신호가  $\pm 15$  m 이내로 유지되는 한 추적을 계속할 수 있으므로 1 m 정도의 랜덤 오차는 충분히 허용된다.

### 3. 결 론

거리 추적기는 추적 레이더의 기능 중 가장 기본적인 것으로 표적의 탐색이나 각 추적을 위한 신호를 제공해주고 또한 표적의 파라미터를 추정하는 역할을 수행한다.

본 논문에서는 이 거리 추적기를 설계하고 이를 하드웨어로 구현하는 것을 보였다. 또한 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인하였고 제작된 하드웨어를 이용, 실제 상황에서 추적기의 표적추적 능력을 검증하였다.

### (참 고 문 헌)

- (1) M.I. Skolnik, Introduction to Radar Systems. New York: McGraw-Hill, 1980.
- (2) P.L. Bogler, Radar Principles with Applications to Tracking Systems, John Wiley & Sons, 1990.
- (3) E.H. Abed, A.J. Goldberg, and R.E. Gover, "Nonlinear Modeling of Gated Range Tracker Dynamics with Application to Radar Range Resolution," IEEE Trans. Aerospace and Electronic

- Systems, Vol. 27, No. 1, pp. 68-81, Jan. 1991.  
 (4) E. Drogin, "Building a range tracker with digital circuits," Electronics, pp. 86-90, March, 1972.