

논문 2014-51-5-5

통신신호 추적을 위한 모노펄스 및 추적성능 향상 방안

(Enhancement for Performance of Monopulse and Target Tracking for Communication Signal Tracking)

길 현 주*, 이 영 진**, 김 재 신***, 이 은 석*

(Hyun Joo Kil, Young Jin Lee, Jae Sin Kim, and Eun Seok Lee[Ⓞ])

요 약

본 논문에서는 이동하는 항공기의 통신장비와 지상 통신장비 간의 무선통신 링크 유지 및 통신신호 추적을 위하여 모노펄스 시스템과 $\alpha\beta$ 필터가 결합된 통신신호 추적 시스템의 성능향상 방안을 제시한다. 모노펄스 오차각 추적을 위하여 일반적으로 사용되는 모노펄스 기울기 곡선(Monopulse Ratio Curve)에 의한 추적 방식이 아닌 최소거리 연산방식을 제안하며, 통신 신호의 일시적 단절 상황에서 모노펄스 추적 재연결 확률 및 추적 정확도 향상을 위하여 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 알고리즘을 제안한다. 프로토타입 안테나로 측정된 MR Curve를 이용하여 제안된 모노펄스 시스템의 성능향상을 확인할 수 있다. 또한, 통신 단절 및 연결 상황에서 항공기 모의계측을 이용한 모의실험은 고정 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 대비 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 알고리즘의 성능향상을 보여준다. 본 논문에서 제시한 방식은 기존 통신신호 추적 시스템의 하드웨어에 대한 변경 없이 알고리즘의 변경만으로 가능하기 때문에 최소비용을 통한 성능향상을 기대할 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose a performance enhancement method of the target tracking system for communication signal using the monopulse and the $\alpha\beta$ filter to keep the connection of the communication system between the airplane and the ground. We suggest the minimum distance measurement method for tracking error angle of the monopulse signal instead of the generally used method of MR(Monopulse Ratio) curve, and the $\alpha\beta$ filter with variable gain for enhancement of the tracking accuracy and the probability of re-tracking the monopulse signal under the disconnection of link. We show the performance enhancement of the proposed method of monopulse system using the measured MR Curve results of the prototype system. And also, the comparison of simulation results between the $\alpha\beta$ filter with variable gain and the $\alpha\beta$ filter with fixed gain shows the performance enhancement of the proposed $\alpha\beta$ filter. Using the proposed methods, we expect the enhanced performance of the existing target tracking system for communication signal only by changing the algorithm without hardware changes.

Keywords : Monopulse, Monopulse Ratio Curve, $\alpha\beta$ filter, $\alpha\beta$ tracker

* 정회원, 성균관대학교
(Sungkyunkwan University)

** 정회원, 삼성탈레스
(Samsung Thales)

*** 정회원, 국방과학연구소
(Agency for Defense Development)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail: leees@skku.edu)

※ 본 연구는 국방과학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

접수일자: 2014년1월26일, 수정일자: 2014년3월18일
수정완료: 2014년4월24일

I. 서 론

고속으로 이동하는 항공기에 탑재된 통신장비와 지상의 고정 통신장비 간 이루어지는 무선통신은 최초 통신 링크를 연결하기 위한 시점부터 종료 시점까지 지속적인 통신 링크를 유지하는 것이 가장 중요하다.

최근에는 레이더의 목표물 추적 또는 통신신호 추적을 위해 빔형성(Beamforming) 방식이나 MIMO

(Multiple-Input Multiple-Output) 방식의 모노펄스에 대한 많은 연구가 진행되었다^[1~2]. 이러한 방식은 높은 추적 정확도를 제공하지만, 안테나 개수, 배열안테나 및 수신기 개수, 크기 및 비용 등이 증가하기 때문에 통신 신호 추적을 위한 응용분야에서는 4개의 급전을 가지는 파라볼라 안테나와 모노펄스 비교기를 적용한 장비들이 상용화 되고 있다. 또한 모노펄스 시스템의 측정 잡음을 최소화하기 위하여 칼만 필터 및 $\alpha\beta$ 필터와 같은 예측 필터를 함께 적용한다. 본 연구에서는 실제 시스템의 공정오차에 대한 표준편차 계산이 어렵기 때문에 $\alpha\beta$ 필터를 고려한다.

일반적으로 모노펄스 추적 시스템은 안테나의 빔폭(Beam Width)과 스큐트 각(Squint Angle)에 의해 추적 가능 범위와 정확도가 결정된다^[3]. 모노펄스 추적 범위가 넓으면 초기 추적 및 재연결 등이 용이하지만, 이를 위해 안테나 빔폭의 증가가 필요하며 이에 따른 주빔(Main Beam)의 이득감소가 발생하여 통달거리가 감소하게 된다. 즉, 통달거리, 정확도, 추적범위간의 적절한 트레이드오프가 필요하다.

이러한 단점과 모노펄스시스템의 추적 정확도를 향상시키기 위해 ML(Maximum Likelihood) 기반의 모노펄스와 MR(Monopulse Ratio) Curve 선형화 등에 대한 연구가 이루어졌다^[4~5]. MR Curve 선형화에 의해 추적 범위가 넓어지게 되면, 넓은 추적 범위에 대해 높은 정확도의 추적이 가능하게 되어, 일반적 연결 상태뿐만 아니라 일시적 추적 단절 후, 신호 재입사에 의한 추적 시 재 연결 확률 향상을 기대할 수 있다. 하지만 이러한 방식은 단일 파라볼라 안테나를 사용하는 모노펄스 추적 시스템에는 적용할 수 없다.

모노펄스 추적과 함께 $\alpha\beta$ 필터를 적용함으로써 추적 정확도 향상^[7] 및 일시적 추적 단절 후 신호 재입사에 의한 재 연결 확률 향상을 기대할 수 있으며, 모노펄스 추적 범위가 넓을수록 그 확률은 증가하게 된다. 고정 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터는 평활인자(Smoothing Factor)가 큰 경우, 오차각은 줄어들지만 추적 지연이 발생하고, 추적 각속도가 증가하게 되면 추적 오차도 증가하게 된다. 이와는 반대로 평활인자가 작은 경우, 추적 각속도가 증가하게 되면 평활인자가 큰 경우보다 오차각은 상대적으로 작게 되지만, 추적 각속도가 감소해도 오차각은 증가하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최적의 이득값을 선택하는 연구가 Kalata^[8]에 의해 제안되

었다. 하지만 최적의 이득값을 선택하기 위해서는 표적의 운동모델과 모노펄스 시스템의 통계적 특성을 알아야 하며 또한 선택 후, 최적 이득값을 고정으로 사용해야 한다.

따라서 본 논문에서는 기존 시스템에 알고리즘 변경만으로 일반적인 추적 상황에서 추적 오차를 향상시키고 일시적 추적 단절 후 신호 재 입사에 의한 재 연결 확률 향상을 위해 최소거리 연산방식의 모노펄스 오차각 산출방식을 제안한다. 또한 추적 중 시스템에서 예측되는 각속도에 따른 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 방식을 제안함으로써 목표물의 운동모델에 대한 공정오차나 모노펄스 시스템의 측정오차의 표준편차를 알지 못해도 각속도에 따라 가변적으로 적용할 수 있도록 한다.

본 논문의 II장에서는 최소거리 연산방식의 모노펄스 오차각 산출방법과 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터에 대하여 기술한다. III장에서는 모의실험을 통하여 제안된 최소거리 연산방식의 모노펄스 성능과 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터의 추적 성능을 검증하고, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

통신 신호 추적 성능 향상을 위해 본 논문에서는 모노펄스 오차각 산출 방식과 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터를 이용한 향상 방안을 제시한다.

1. 제안된 모노펄스 (Monopulse) 오차각 산출

일반적인 레이더의 모노펄스 시스템에는 3채널 모노펄스 시스템 방식이 적용되지만, 본 연구에서는 이동형 통신신호 추적 시스템에 적합하며, 크기, 무게 및 비용 등을 절감할 수 있는 단일채널 모노펄스 시스템 방식을 적용하였다.

그림-1에 나타나 있듯이, 단일채널 모노펄스 시스템은 4개의 혼 안테나 및 모노펄스 비교기와 저잡음 증폭

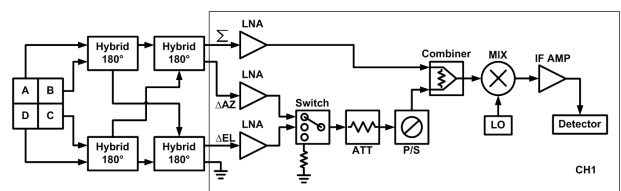


그림 1. 단일채널 모노펄스시스템 구조

Fig 1. Single-channel monopulse system configuration.

기(LNA: Low Noise Amplifier), 신호결합기, 위상변환기 및 믹서 등으로 구성된 단일채널 모노펄스 수신기로 구성된다. 모노펄스 비교기 출력인 Σ , ΔAZ , ΔEL 신호에 대하여 P/S(Phase Shifter)에 의해 합신호 대비 각각 $0^\circ/180^\circ$ 위상차가 있는 차신호를 생성하고 각각에 대하여 합신호와 결합한 후, 식 (1)과 같은 연산을 통해 Δ/Σ 비를 얻을 수 있다^[6].

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = P_0 - P_{180} \quad (1)$$

일반적인 모노펄스 오차각 추적 과정은 측정된 Δ/Σ 비로부터 선형성이 보장되는 부분의 Δ/Σ 기울기(Monopulse Ratio)인 $r_{\Delta/\Sigma}$ 를 정하여 식 (2)와 같은 방식으로 오차각을 추정하게 된다.

$$\theta_e = (P_0 - P_{180})/r_{\Delta/\Sigma} \quad (2)$$

식 (2)에서 볼 수 있듯이 모노펄스 오차각은 MR Curve의 기울기인 $r_{\Delta/\Sigma}$ 에 의해서 결정된다. 그림-2는 본 연구를 위해 제작된 프로토타입 안테나와 모노펄스 수신기를 이용하여 측정된 MR Curve의 기울기 결과값을 보여주고 있다.

결과값 중 Δ/Σ 는 -20dBm 에서 -80dBm 까지의 범위에서 10dBm 수신레벨 간격으로 측정된 MR Curve이며, entireRatio는 측정된 MR Curve 중 전체 범위의 끝부분값을 이용한 $r_{\Delta/\Sigma}$ 값이다. linearRatio는 측정된 MR Curve 중 선형성이 보장되는 부분값(약 $-0.7^\circ \sim +0.7^\circ$)을 이용한 $r_{\Delta/\Sigma}$ 값이며, midRatio는 측정된 MR Curve의 평균에 의한 $r_{\Delta/\Sigma}$ 값이다.

식 (2)와 그림-2에서 유추할 수 있듯이, 시스템에 적용하는 $r_{\Delta/\Sigma}$ 값에 따라서 θ_e 의 오차는 크게 달라질 수 있다. 특히 수신신호의 입사 방향이 MR Curve의 선형

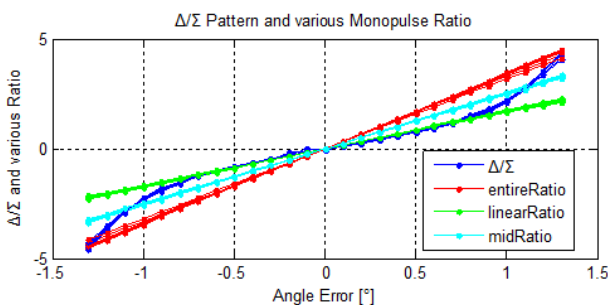


그림 2. 모노펄스 Δ/Σ 패턴 및 모노펄스 기울기
Fig. 2. Monopulse Δ/Σ Pattern and Ratio.

성이 보장되는 영역 밖에서 입사되는 경우 θ_e 의 오차는 더욱 증가하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 그림-1의 합신호 대비 각각 $0^\circ/180^\circ$ 위상차가 있는 차신호에 대한 결합 신호를 측정하여 메모리에 저장하고, 추적 시 측정된 신호와의 최소거리(Minimum Distance)를 측정하여 오차각을 산출하는 방식을 제안한다. 식 (3)과 (4)는 제안한 최소거리 측정에 의한 오차각 산출식을 나타낸 것이다.

$$\theta_e = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \{d(i)\} \times 0.1 - 1.3 \quad (3)$$

$$d(i) = \sqrt{(V_{P_0}(i) - m_{P_0})^2 + (V_{P_{180}}(i) - m_{P_{180}})^2} \quad (4)$$

여기에서, $V_{P_{0,180}}$ 은 측정된 동위상, 역위상에 대한 합신호의 저장값을 나타내며, $m_{P_{0,180}}$ 은 현재 측정된 동위

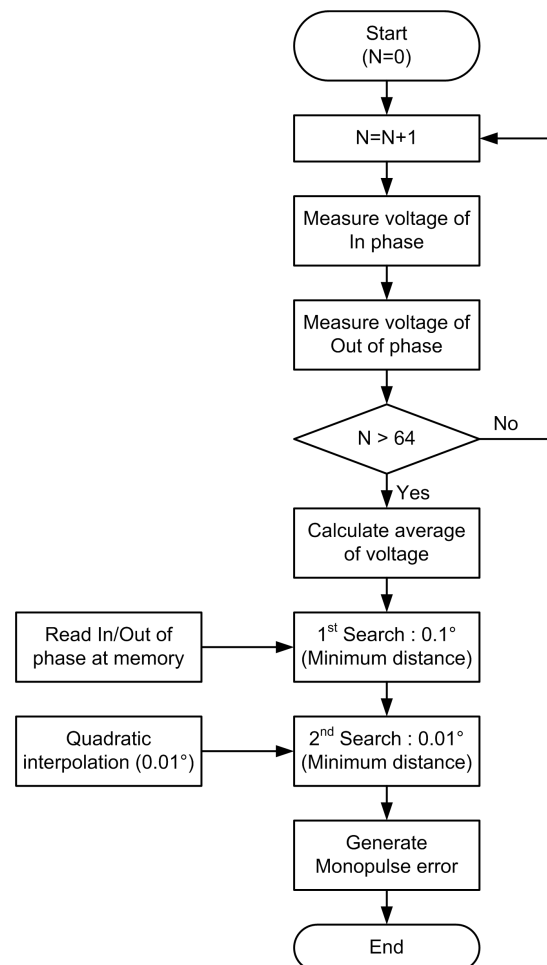


그림 3. 제안된 모노펄스 알고리즘 흐름도
Fig. 3. The flow of proposed monopulse algorithm.

상, 역위상에 대한 합신호를 나타낸다.

그림-3은 단일채널 모노펄스 수신기를 이용한 제안된 모노펄스 오차각 연산방식에 대한 알고리즘 순서도를 나타낸 것이다. 동위상, 역위상 전압 측정 과정에서 발생하는 잡음은 수신기에 따라 다르며 본 연구에 제작된 수신기의 선형성이 보장되는 영역에서 약 0.1° 내의 오차를 갖는다. 따라서 식 (3)과 (4)에서 알 수 있듯이 제안된 방식을 사용하게 되면 연산량은 증가하지만, MR Curve 전 영역에 대해 약 0.1° 내/외의 모노펄스 오차각 오차가 발생할 것을 예측할 수 있다.

2. 제안된 가변 이득 방식의 $\alpha \beta$ 필터

앞서 기술된 모노펄스 추적은 측정 잡음을 포함하고 있어 추적 안테나의 안정적인 구동과 측정 정확도 향상을 위해 $\alpha\beta$ 필터를 적용한다.

그림-4는 일반적인 고정 이득 방식의 $\alpha\beta$ 추적기의 개념도를 나타낸 것이다. 여기에서 p 와 s 는 각각 예측값(predicted values)과 평활화값(smoothed values)을 나타낸다.

위치와 각속도에 대한 물리적인 운동개념으로부터 필터에 대한 알고리즘은 다음 식과 같이 타나낼 수 있다^[3].

$$x_s(n) = x(n|n) = x_p(n) + \alpha(x_0(n) - x_p(n)) \quad (5)$$

$$\dot{x}_s(n) = \dot{x}(n|n) = \dot{x}_s(n-1) + \frac{\beta}{T}(x_0(n) - x_p(n)) \quad (6)$$

x_0 는 위치의 샘플 입력값이며, 예측 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_p(n) = x_s(n|n-1) = x_s(n-1) + T\dot{x}_s(n-1) \quad (7)$$

본 논문에서는 $\alpha\beta$ 필터의 계수 결정방법으로 페이딩

메모리 필터를 사용하였으며 평활인자 ξ 값 ($0 \leq \xi \leq 1$)을 기반으로 이득계수를 계산한다. 이 때 이득계수는 다음과 같다.

$$\alpha = 1 - \xi^2 \quad (8)$$

$$\beta = (1 - \xi)^2 \quad (9)$$

ξ 값이 1에 가까울수록 heavy smoothing을 의미하며, 0에 가까울수록 little smoothing을 의미한다^[3].

(5)~(7) 식을 위치와 각속도 추정기반의 수식으로 정리하면 다음과 같다^[4].

$$\bar{s}[n|n-1] = \Phi \hat{s}[n-1|n-1] \quad (10)$$

$$e[n] = \theta[n] - A \bar{s}[n|n-1] \quad (11)$$

$$\hat{s}[n|n] = \bar{s}[n|n-1] + K e[n] \quad (12)$$

여기에서 시스템 모델링에 의한 Φ , A 와 이득 행렬인 K 는 다음과 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$A = [1 \ 0] \quad (14)$$

$$K = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta/T \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (10)~(15)를 이용하여 모노펄스 추적이 정상적인 경우에는 모노펄스 추적 오차각을 $\alpha\beta$ 필터의 측정값으로 전달하고, 단절 시에는 단절 전 $\alpha\beta$ 필터의 예측값을 $\alpha\beta$ 필터의 입력으로 전달하는 방식으로 예측하도록 하였다. 이때 방위각에 대한 추정값은 식 (12)로부터 얻게 되며 $\hat{s}[n|n]$ 는 식 (16)과 같이 각도와 속도에 대한 추정값으로 구성된다.

$$\hat{s}[n|n] = [\hat{\theta}(t), \hat{v}(t)] \quad (16)$$

하지만, 식 (8)과 (9)에서 알 수 있듯이 ξ 값에 따라 추정값은 다르게 나타날 수 있다. ξ 값이 1에 가까워질 경우, 추정값은 예측값에 가까운 값이 되지만, 이와 반대로 ξ 값이 0에 가까워질 경우, 추정값은 예측값에 최대한의 오차값을 반영한 결과가 된다. 즉, 일반적인 $\alpha\beta$ 필터에서는 고정된 ξ 값을 적용하기 때문에 구현이 용이하지만, 추적 각속도에 따라 추정 오차값이 달라진다.

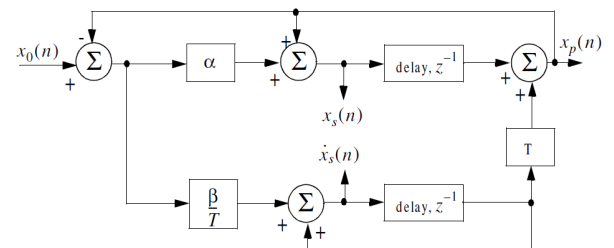


그림 4. $\alpha\beta$ 추적기 구조
Fig. 4. Implementation for an $\alpha\beta$ tracker.

따라서 본 논문에서는 추적 중 시스템에서 예측되는 추적 각속도의 변화에 따라 이득을 변화시켜 목표물에 대한 추적성과 일시적 단절 시 재연결 확률을 향상시킬 수 있는 가변이득 방식을 제안한다.

추적 각속도는 고정방식에서의 일정시간 동안의 방위각 추산값인 $\hat{\theta}(t)$ 의 변화량에 대한 이동 평균을 이용하여 식(17)~(18)과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{\nu}_{ai}[n] = \frac{\hat{\theta}[n]}{\hat{\theta}[n-1]} \quad (17)$$

$$\rho[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{\nu}_{ai}[n-m] \quad (18)$$

$K[n]$ 은 가변 이득행렬로서 평활인자인 $\xi[n]$ 값에 따라 변경된다. 가변 평활인자인 $\xi[n]$ 값을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\xi[n] = 0.99 - \epsilon[1 - \rho[n]] \quad (19)$$

$$K[n] = \begin{bmatrix} 1 - \xi^2[n] \\ (1 - \xi[n])^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\hat{s}[n|n] = \bar{s}[n|n-1] + K[n]e[n] \quad (21)$$

$\rho[n]$ 은 일정시간(N) 동안 방위각 변화량에 대한 정규화된 이동평균을 나타낸다. ϵ 값은 임의상수로서 $\xi[n]$ 값의 최적화를 위하여 시스템에 적합한 값을 설정한다. 즉 본 상수의 값으로써 시스템에 적합한 ξ 값의 범위를 제한할 수 있다.

방위각의 변화가 클 경우 평균값 $\rho[n]$ 은 상대적으로 큰 값을 갖게 되며, $\xi[n]$ 값은 little smoothing 특성을 갖게 된다. 이는 예측값에 최대한의 오차값을 반영하여 추정값을 구한다는 의미이다. 반대로 방위각의 변화가 작을 경우 $\xi[n]$ 값은 heavy smoothing 특성을 갖게 되어 예측값에 가까운 추정값을 구하게 된다.

이러한 방위각의 변화량을 이용한 가변이득 방식은 추적 각속도에 비례하여 ξ 값이 가변되어 고정 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터보다 향상된 정확도를 확보할 수 있으며 일시적 단절 후 재연결 확률을 높일 수 있게 된다.

III. 모의실험

모의실험은 모노펄스 추적 정확도 향상과 가변 이득

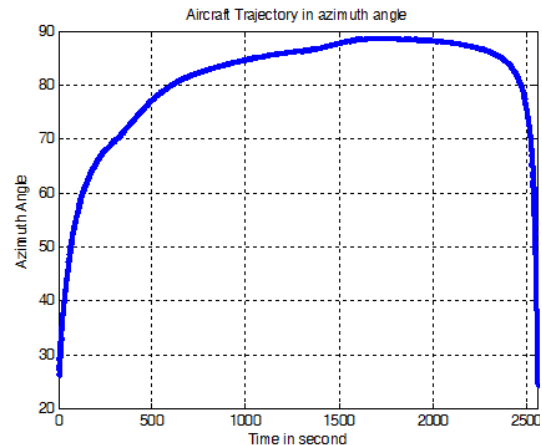


그림 5. 방위각 기준의 유인기 모의궤적
Fig. 5. Simulation trajectory of the aircraft by azimuth angle.

방식의 $\alpha\beta$ 필터 2가지에 대하여 수행하였다. 모노펄스 추적 정확도 모의실험은 그림-2의 실 측정 데이터를 사용하였다. 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 모의실험은 유인기의 모의궤적을 생성하고, 지상 통신신호 추적장비의 위치를 기준으로 상대 방위각으로 환산하여 시험하였다. 유인기 모의궤적의 생성 조건은 다음과 같다.

- 유인기 최고 속도 : 950km/h
- 초기 추적 고도 / 거리 : 20,000ft / 3km
- 이동 경로 : 서쪽 → 동쪽 → 선회 → 서쪽
- 이동 직선 거리(편도) : 약 200km

그림-5는 지상 통신신호 추적장비의 위치를 기준으로 방위각에 대한 모의궤적을 나타낸 것이며 이때 유인기의 운동은 임의 구간별 등속 및 등가속 조건을 복합적으로 적용하였다.

1. 모노펄스 (Monopulse) 추적 오차 모의실험

특정 모노펄스 기울기를 사용하는 일반적인 방식과 제안된 최소거리에 의한 오차각 산출방식의 기본적인 성능을 비교하기 위하여 그림 2의 측정된 MR Curve를 이용하였다. 모의시험은 입사 각도와 측정 전압 오차별로 각 1000번의 몬테칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 통해 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하였다. 이 때 측정 전압 오차의 평균은 0이고 표준편차는 동위상/역위상 측정 전압(Voltage)의 10% 크기를 갖는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 가하였으며

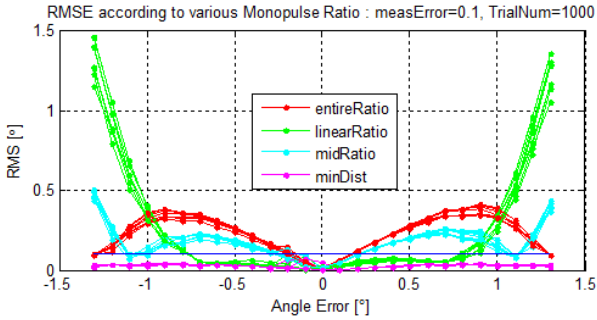


그림 6. 모노펄스 정확도 모의실험 결과
Fig. 6. Simulation result of Monopulse Ratio Curve.

그림-2의 수신레벨 별로 시험을 수행하였다.

그림-6의 결과에서 알 수 있듯이 일반적인 MR Curve의 특정 기울기를 사용하는 방식 중 선형성이 보장되는 부분만을 이용하는 linearRatio를 적용한 방식이 가장 우수 하였으나, $\pm 0.7^\circ$ 이상에서는 오차가 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 일반적인 통신 추적용 모노펄스 시스템의 안테나의 반전력 빔폭은 1° 내외로 수신기 열 잡음 및 안테나 구동 오차를 고려할 때 $\pm 0.7^\circ$ 를 초과하는 범위에서는 추적을 수행하기 어렵다. 반면 제안된 최소거리를 이용한 오차각 산출 방식은 $\pm 1.3^\circ$ 전 범위에서 0.1° 내의 오차를 유지함을 알 수 있다. 즉, 일반적인 모노펄스 연산방식의 선형구간 기울기를 사용한 경우에 비해 0.1° 오차가 발생하는 범위가 약 $\pm 0.6^\circ$ 증가함을 알 수 있다. 또한 추적 범위가 현저하게 확장됨으로써 일시적 단절 후 신호 재입사에 의한 재연결 확률도 높아짐을 알 수 있다.

2. 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 추적 오차 모의실험

가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터 성능 입증을 위하여 고정 이득 방식과 RMS 오차를 비교하는 모의실험을 수행하였다. 실험은 그림-5에 나타난 방위각 기준의 유인기 모의궤적을 적용하였으며, $\alpha\beta$ 필터에 사용되는 모노펄스 측정값은 모의궤적 참값에 평균 0, 표준편차 0.1° 인 AWGN을 적용하였다. 이 때, 고정 이득 방식은 평활인자인 ξ 값을 0.9에서 0.99까지 0.01씩 증가시켜 총 10번의 시험을 수행하였다.

그림-7과 표 1은 평활인자의 변화에 따른 가변 이득 방식과 고정 이득 방식의 추적 오차 RMS 결과를 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 고정 이득 방식의 경우 ξ 값이 0.93일 때 가장 우수한 결과를 보여주고 있지만, 0.90~0.94 범위에서 근소한 차이를 보여주고 있

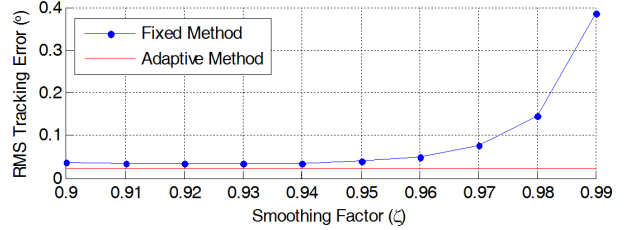


그림 7. 평활인자 ξ 에 따른 추적 오차
Fig. 7. Tracking error by smoothing factor ξ .

표 1. 모노펄스 추적 오차 결과(RMS)
Table 1. RMS of monopulse tracking error.

순서	평활인자 ξ	추적 오차 결과(RMS)	
		고정 이득 방식	가변 이득 방식
1	0.90	0.036	0.024
2	0.91	0.035	
3	0.92	0.034	
4	0.93	0.033	
5	0.94	0.035	
6	0.95	0.039	
7	0.96	0.051	
8	0.97	0.077	
9	0.98	0.145	
10	0.99	0.388	

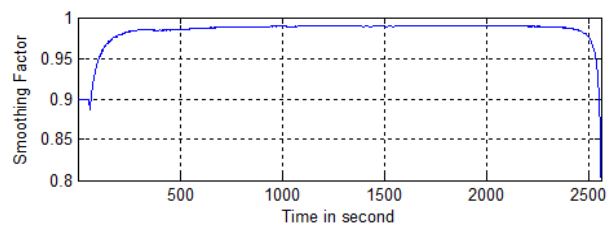


그림 8. 추적 각속도 변화에 따른 ξ 값 변화
Fig. 8. ξ value by variation of tracking angle speed.

다. 하지만, ξ 값이 0.95부터는 추적 오차값이 증가함을 알 수 있다. 이는 예측값에 가까운 추정값을 산정하는 방식인 heavy smoothing 형태이므로, 모의궤적 데이터 중 각속도가 큰 구간에서 추적 오차값이 증가하기 때문이다.

그림-8은 그림-5에 나타난 모의궤적의 방위각에 따라 변화되는 추정된 각속도를 이용하여 가변된 위치별 평활인자를 나타낸 것이다. 가변 이득 방식의 경우 특정 평활인자를 사용하는 고정 이득 방식에 비해 추적 오차가 최대 16배의 성능 향상을 보여주고 있다. 이는

앞에서 설명했듯이, 각속도의 변화에 따라 ξ 값을 변화 시킴으로써, 최적의 추정값을 찾기 때문이다.

일시적 단절 후, 신호 재입사에 의한 재추적 확률 시험은 앞서 기술한 추적 오차 모의실험과 동일한 조건으로 수행하였다. 단, 일시적 단절 조건을 위해 그림-5의 궤적에서 10개의 구간에 임의의 시간동안 모노펄스 추적이 단절됨을 가정하였다. 신호 재입사 시 실제 운용 상황에서는 그림-7의 모의실험 결과와 같이 적용 방식에 따라 재추적 확률은 크게 달라질 수 있지만, 고정/가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터에 대한 비교만을 위하여 재입사 시 오차각과 상관없이 재추적 가능한 것으로 가정하였다. 재추적 성공의 기준은 앞서 진행한 모노펄스 추적 오차 모의실험 결과를 감안하여 신호 재입사 시 오차각은 $\pm 1^\circ$ 이하인 경우로 설정하였다.

표 2와 그림-9는 10개의 단절 구간에 대하여 고정 이득 방식과 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터를 각각 적용할 경우의 재추적 확률을 나타낸 것이다. 고정 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터의 경우 ξ 값에 따라 일부 단절 구간에서는 가

변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터보다 재추적 확률이 높게 나타난 경우도 있지만, 그림-7과 같이 대부분의 추적 상황에서 재연결 확률이 낮게 나타났다.

단절 구간 1, 4, 10의 경우, 가변 이득 방식의 재추적 확률이 고정 이득 방식의 재추적 확률 중 ξ 값을 0.97 및 0.98로 적용한 결과에 비해 낮게 나타났는데, 이는 추적 각속도 오차에 의한 결과이다. 반면, 나머지 단절 구간에서는 가변 이득 방식의 재추적 확률이 고정 이득 방식의 결과에 비해 유사하거나 높게 나타났다. 또한, 가변 이득 방식은 단절 구간 1과 10을 제외한 전 구간에서 80~100%의 재추적 확률을 보여주고 있어, 전체적인 시스템 운용 상황에 적합한 방식으로 볼 수 있다.

고정 이득 방식에서 ξ 값이 0.97인 경우, 높은 재추적 확률을 보이지만 표 1의 결과와 같이 가변 이득 방식에 비해 추적 정확도가 3배 이상 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 두 번째 높은 성능을 보인 ξ 값이 0.98인 경우, 추적 정확도가 가변 이득 방식에 비해 6배 이상 큰 0.145° 의 큰 오차를 나타내어 1° 이하의 협대역 안테나 빔폭을 사용하는 시스템에 사용하기에 적절하지 않다는 것을

표 2. 단절 구간 별 신호 재입사 시 재추적 확률
Table 2. Probability of re-track after re-connection.

순서	단절 구간	재 추적 확률										
		고정 이득 방식(평활인자 ξ)									가변 이득 방식	
		0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98		0.99
1	60 ~ 70	0.053	0.918	0.998	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.281
2	120 ~ 280	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.999
3	350 ~ 500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.822	0.001	1.0	1.0
4	600 ~ 800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.002	0.434	1.0	0.02	0.805	1.0
5	1000 ~ 1300	0.001	0.0	0.002	0.003	0.019	0.064	0.214	0.7	0.999	1.0	1.0
6	1000 ~ 1300	0.002	0.007	0.02	0.025	0.067	0.17	0.403	0.781	0.994	1.0	1.0
7	1000 ~ 1300	0.999	0.159	0.234	0.386	0.59	0.768	0.956	1.0	1.0	1.0	1.0
8	2350 ~ 2400	0.108	0.159	0.234	0.386	0.59	0.768	0.956	1.0	1.0	1.0	1.0
9	2450 ~ 2475	0.0	0.0	0.0	0.002	0.005	0.072	0.305	0.735	0.952	0.027	0.93
10	2500 ~ 2510	0.0	0.0	0.002	0.015	0.123	0.402	0.739	0.875	0.329	0.0	0.619

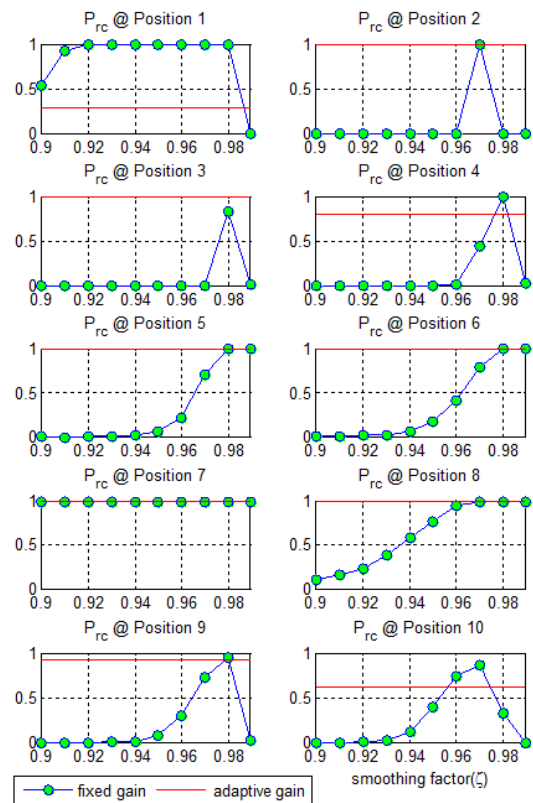


그림 9. 신호 재입사 시 재추적 확률
Fig. 9. Probability of re-track after re-connection.

알 수 있다.

즉, 그림-7과 그림-9의 결과를 통하여 알 수 있듯이 제안된 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터를 적용하면 일반적인 추적 상황에는 추적 오차를 향상 시킬 수 있으며 일시적 단절 후 신호 재입사 상황에서는 전 구간에서 고른 재추적 확률을 얻을 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 항공기와 지상 통신장비 간의 통신링크를 형성하고, 통신신호 추적을 수행하는 진폭비교 방식의 단일채널 구조 모노펄스 시스템에 대한 추적 성능 향상 방안에 대하여 제안하였다.

모노펄스 추적 범위 및 추적 정확도 향상을 위해서 사전 측정된 MR Curve와 추적 시 수집되는 데이터 간의 최소거리를 이용하는 방안을 제시하였으며, 모의실험을 통해 추적 범위 및 추적 정확도가 크게 향상됨을 확인하였다. 제안 방식은 일반적인 모노펄스 연산방식의 선형구간 기울기를 사용한 경우에 비해 0.1° 오차가 발생하는 범위가 약 $\pm 0.5^\circ$ 증가하였다.

또한, 가변 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터를 적용함으로써 일반적인 고정 이득 방식의 $\alpha\beta$ 필터에 비해 추적 정확도와 재추적 확률이 동시에 향상됨을 확인하였다.

제안된 최소거리 모노펄스 추적방식 기반의 가변이득 방식 $\alpha\beta$ 필터는 중요 데이터에 대한 실시간 전송이 주목적인 군 통신장비의 추적시스템에 알고리즘 변경만으로 시스템 성능을 향상 시킬 수 있는 효과적인 방법으로 고려될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] S. Haykin, J. Litva, and T. J. Shepherd, "Radar Array Processing", 1st Ed, New York, 1993.
- [2] Chan-ho An, Hyun Bo Jin, Janghoon Yang, Ui Young Pak, Young-Jae Ryu, Dong Ku Kim "On the Performance Enhancement of a Tactical Monopulse MIMO Radar", The Journal of Korea Information and Communications Society, vol.38A, no. 1, pp. 19-25, June 2013.
- [3] Mahafza and Bassem R., "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", CRCPrILlc, 2005.
- [4] Heung-Su Kim, "Linear Region Extension of

MR Curve in ML Based Monopulse", JKIEES 23(6), pp. 748-751, Jun 2012.

- [5] Nickel, U., "Monopulse estimation with adaptive arrays," Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, vol.140, no. 5, pp. 303-308, Oct 1993.
- [6] Hyuk-Ja Kwon, Young-Jin Lee, and Jin-Woo Jung, "A Study on 1-Channel Monopulse Receiver", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol. 51, NO. 1, pp. 242-240, January 2014.
- [7] Chan-ho An, Janghoon Yang, Rong Ran, Ui Young Pak, Young-Jae Ryu and Dong Ku Kim, "Enhanced monopulse MIMO radar using reliable $\alpha\beta$ filtering," MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2012 - MILCOM 2012, vol., no., pp. 1,6, Oct. 29 2012-Nov. 1 2012.
- [8] Kalata, Paul R., "The Tracking Index: A Generalized Parameter for $\alpha\text{-}\beta$ and $\alpha\text{-}\beta\text{-}\gamma$ Target Trackers," Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, vol. AES-20, no. 2, pp. 174,182, March 1984.

— 저 자 소 개 —



길 현 주(정회원)
1997년 충남대학교 컴퓨터공학과
(공학사),
2012년~현재 성균관대학교
전자전기컴퓨터공학과
석사과정.

<주관심분야 : 통신시스템 및 소프트웨어 설계>



이 영 진(정회원)
2000년 한양대학교 전기/전자
공학과 (공학사),
2003년 한양대학교 전기/전자
공학과 (공학석사),
2010년~현재 삼성탈레스
통신시스템그룹.

<주관심분야 : 신호처리 및 통신시스템 설계>



김 재 신(정회원)
2008년 고려대학교 전기전자과
공학부 (공학사),
2010년 고려대학교 전자전기
공학과 (공학석사),
2010년~현재 국방과학연구소
제2기술연구본부.

<주관심분야 : 무선통신, MIMO, 신호처리, 최적
화이론>



이 은 석(정회원)
1985년 성균관대학교 전자공학과
(공학사),
1988년 일본 Tohoku대학교
정보공학과 (공학석사),
1992년 일본 Tohoku대학교
정보공학과 (공학박사),
1992년~1993년 일본 미쯔비씨 정보전자연구소
특별연구원,
1994년~1995년 일본 Tohoku대학교 Assistant
Prof.,
1995년~현재 성균관대학교 정보통신공학부
교수.

<주관심분야 : 소프트웨어공학, 자가적응형 SW,
오토노믹컴퓨팅, 에이전트지향지능형시스템, CPS
(Cyber Physical System)>