

3차원 레이더 궤적 생성 및 성능 분석

임형용* 장연수* 이태우* 황재덕* 윤동원*

*한양대학교

Performance Analysis of Three-Dimensional Radar for Angle and Distance Errors

Hyeongyong Lim* Yeonsoo Jang* Taewoo Lee* Jaeduck Hwang* Dongweon Yoon*

*Hanyang University, Seoul, Korea

E-mail : dwyoon@hanyang.ac.kr

요 약

레이더 시스템에서 3차원 궤적 정보는 목표물 추적을 위해 필수적이다. 이때 3차원 레이더는 수신 신호를 통해 방위각, 고각 및 거리를 추정하여 3차원 궤적 정보를 얻게 된다. 수신 신호에 따라 추정된 각도들과 거리는 오차를 가지게 되며 이 오차의 정도에 따라 3차원 레이더 시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 분석이 요구되어진다. 본 논문에서는 3차원 레이더 시스템의 각도 및 거리 오차에 따라 추정된 3차원 궤적 정보와 실제 궤적 정보에 대해 RMSE (Root Mean Square Error)를 통해 성능을 분석한다.

ABSTRACT

In radar systems, information of three-dimensional (3D) trajectory is necessary for tracking targets. The information of 3D trajectory for a 3D radar can be obtained by estimating the azimuth angle, the elevation angle, and the distance. The estimated information of the angles and the distance has errors according to received signals. Since these errors affect performances of 3D radar systems, performance analysis of 3D radar for the angles and the distance errors is required. In this paper, the performance of 3D radar systems is analyzed by root mean square error (RMSE) between true trajectory information and the estimated trajectory information according to the angles and the distance errors.

키워드

3차원 레이더, 각도 오차, 거리 오차, RMSE.

I. 서 론

레이더는 기본적으로 목표물 탐지한 후 목표물까지의 거리를 알아내기 위해 주로 이용된다 [1]. 최신 레이더 시스템에서 이러한 기본적인 정보 이외에도 3차원 궤적 정보는 목표물 추적을 위해 필수적이다. 이때 3차원 레이더는 수신 신호를 통해 방위각, 고각 및 거리를 추정하여 3차원 궤적 정보를 얻게 된다. 실제 레이더 운용 환경에서는 잡음 등의 영향으로 인해 수신 신호에 따라 추정된 각도들과 거리는 오차를 가지게 되며 이 오차의 정도에 따라 3차원 레이더 시스템의 추적 성능에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 3차원 레이더 시스템의 각도 및 거리 오차에 따라 추정된 3차원 궤적 정보와 실

제 궤적 정보에 대해 RMSE (Root Mean Square Error)를 통해 성능을 분석한다.

II. 거리 및 각도에 대한 RMSE

모노펄스 (Monopulse) 레이더는 단일 펄스 송신 신호를 이용하지만, 복수의 빔 로브를 수신하여 방위 정보를 얻도록하는 방식이다 [1]. 모노펄스 레이더에서 정보를 얻기위한 방식으로는 진폭 비교 방식, 위상 비교 방식 등이 있으며, 이 때 거리 정보에 대한 통계적 분석을 통해 RMSE는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta R = \frac{c}{\beta \sqrt{2\gamma}} \quad (1)$$

여기서 $c = 3 \times 10^8$ m/s, γ 는 수신 신호 대 잡음비 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)이고, β 는 실효 대역폭 (Effective Bandwidth)로 다음 식으로 정의된다.

$$\beta^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df} \quad (2)$$

사각형 펄스 (Rectangular Pulse)에 대해 (2)를 구해 (1)에 대입하여 사각형 펄스 이용 시 거리에 대한 RMSE는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta R = \sqrt{\frac{t_r \tau}{4\gamma}} \quad (3)$$

여기서 t_r 은 펄스의 상승 시간 (Rise Time)이고 τ 은 펄스 지속 시간 (Pulse Duration)이다. 같은 방식으로 의사 사각형 펄스 (Quasi-Rectangular Pulse), 사다리꼴 펄스 (Trapezoidal Pulse), 삼각형 펄스 (Triangular Pulse), 가우시안 펄스 (Gaussian Pulse), 코사인 펄스 (Cosine Pulse) 등의 거리에 대한 RMSE를 구할 수 있다 [1].

각도에 대한 RMSE는 [2] 및 [3]에서 제시되어 있으며 아래 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\delta \theta = \frac{k \theta_B}{k_s \sqrt{B \tau \gamma (f_p / \beta_n)}} \quad (4)$$

여기서 k 는 모노펄스 레이더에 대해서는 1, 코니컬 스캔 (Conical-Scan) 레이더에 대해서는 1.4의 값을 가지고, θ_B 는 3 dB 빔 폭 (Beamwidth), B 는 대역폭, f_p 는 펄스 반복 주파수 (PRF: Pulse Repetition Frequency) 및 β_n 은 서보 대역폭 (Servo Bandwidth)이다. 일반적으로 $B\tau \approx 1$, $f_p / 2\beta_n$ 은 펄스 중첩의 개수이며, k_s 는 4혼 모노펄스 레이더에 대해 1.57, 코니컬 스캔 레이더에 대해 1.5의 값을 가진다.

III. Generalized Gaussian Noise

2장과 같은 RMSE를 가지는 Random 샘플을 발생시키기 위하여 확률 밀도 함수 (PDF: Probability Density Function)로 Generalized Gaussian Noise (GGN)을 고려하며 그 PDF는 다음

과 같다 [4].

$$p(n|\mu, \sigma, \alpha) = \frac{\alpha \Lambda}{2\Gamma(1/\alpha)} \exp(-\Lambda^\alpha |n - \mu|^\alpha) \quad (5)$$

여기서 Λ 는 Normalizing Coefficient로써

$$\Lambda = \frac{\Lambda_0}{\sigma} = \sqrt{\frac{2\Gamma(3/\alpha)}{N_0\Gamma(1/\alpha)}} \quad (6)$$

이며, α 는 PDF의 Shaping 파라미터, μ 는 평균, $\sigma^2 = E[N^2] - \mu^2 = N_0/2$ 로 GGN의 분산, $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이다. $\alpha = 1$ 일 경우 Laplacian Noise, $\alpha = 2$ 일 경우 Gaussian Noise, $\alpha = \infty$ 일 경우 Uniform Noise가 된다. 식 (5)와 같은 PDF를 가지고 RMSE가 (1) 및 (4)를 만족하도록 거리, 방위각 및 고각에 대한 Random 샘플을 발생시켜 3차원 궤적 정보를 얻을 수 있다.

IV. 성능 분석

성능 분석을 위하여 목표물의 궤적은 직선이라 가정한다. 이는 초고속 소형 물체에 적합한 궤적 모델이다. 사용된 펄스는 사각형 펄스를 가정하였으며, 4혼 모노펄스 레이더에서 방위각 및 고각을 추정한다. 성능 분석을 위하여 사용된 파라미터들을 표 1에 나타내었다.

표 1. 레이더 및 목표물 파라미터

Parameter	Value
t_r	50 ns
τ	350 ns
PRF	100
θ_B (Elevation)	0.5 °
θ_B (Azimuth)	0.95 °
레이더 위치	(0, 0, 3) m
Target 초기 위치	(3000, 4000, 50) m
Target Velocity	1000 m/s

위와 같은 파라미터를 적용하여 $\alpha = 2$ 및 SNR=20 dB에서 3차원 궤적 정보를 그림 1 및 2에 나타내었다. 그림 1에서는 목표물의 초기 위치에서부터 1000 m/s의 속도의 레이더쪽으로 움직이는 목표물을 표 1의 파라미터를 갖는 모노펄스 레이더로 추정한 3차원 궤적 좌표이다. 이를 레이

다에서 목표물 방향으로 바라보았을 때의 궤적, 즉 2차원으로 퍼트려진 정도를 그림 2에 나타내었다. 표 1에 적용된 파라미터 중 각도 추정과 연관된 고각의 3 dB 빔폭이 0.5, 방위각의 3 dB 빔폭이 0.95로 방위각의 3 dB 빔폭이 약 2배 정도 크게 적용되어 있고, 이에 따라 가로보다 세로로 퍼트려진 정도가 더 적은 것을 확인할 수 있다.

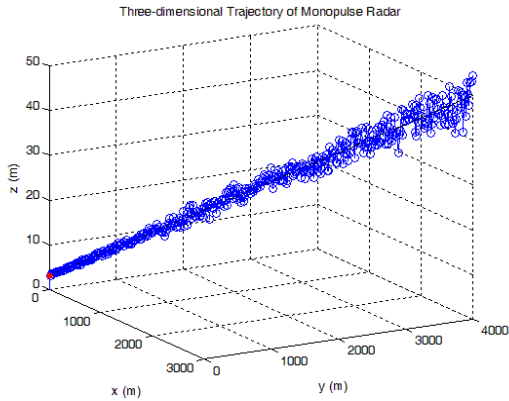


그림 1. 3차원 궤적 정보

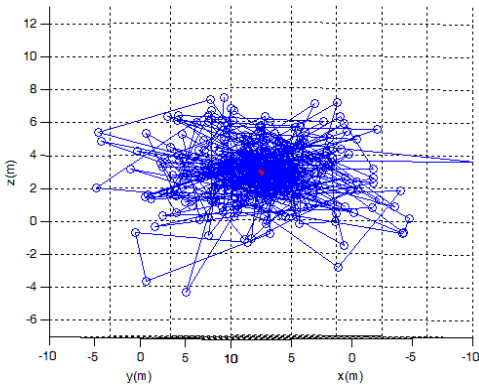


그림 2. 레이다에서 목표물 방향으로 바라본 3차원 궤적 정보

위에서 얻은 궤적 자료를 서로 다른 SNR마다 반복시켜 SNR에 따른 3차원 궤적 정보의 RMSE를 구할수 있으며 이는 그림 3에 나타내었다. SNR이 커짐에 따라 3차원 궤적 정보의 RMSE는 거리 및 각도 오차와 유사하게 $1/\sqrt{\gamma}$ 에 비례하는 것을 확인할 수 있다.

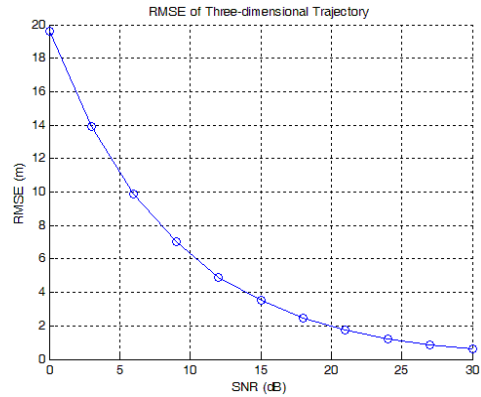


그림 3. SNR에 따른 3차원 궤적의 RMSE

V. 결 론

본 논문에서는 3차원 레이다 시스템의 각도 및 거리 오차에 따라 추정된 3차원 궤적 정보와 실제 궤적 정보에 대해 RMSE를 통해 성능을 분석하였다. 성능 분석을 위해 거리 및 각도에 대한 RMSE를 적용하였고 SNR이 커짐에 따라 3차원 궤적의 RMSE는 거리 및 각도 오차와 유사하게 $1/\sqrt{\gamma}$ 에 비례하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 논문에서 적용하는 Generalized Gaussian Noise의 확률 밀도 함수를 실제 발생하는 데이터의 통계치를 적용해 더욱 적절한 α 를 적용하면 실제 환경에 적합한 3차원 궤적 정보를 얻어 낼 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD1200190D).

참고문헌

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [2] D. K. Barton, *Modern Radar System Analysis*, Norwood, MA: Artech House, 1988.
- [3] D. D. Howard, "Tracking Radar," in *Radar Handbook*, M. I. Skolnik, Ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [4] H. Soury, F. Yilmaz, and M.-S. Alouini, "Average bit error probability of binary coherent signaling over generalized fading channels subject to additive generalized Gaussian noise," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 785-788, Jun. 2012.