

표적 특성에 따른 모노펄스 레이더 불확도 연구

장용식* · 류충호 · 김환우

A monopulse radar uncertainty study classified on target property

Yong-sik Jang* · Chung-ho Ryu · Whan-woo Kim

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

요 약

일반적으로 모노펄스 레이더의 오차 수준은 다중경로 간섭, 글린트, 동적 지연오차 등의 환경적 오차 요인이 제거된 이상적인 경우를 가정하고 있다. 따라서 지금까지는 외부 환경적 오차 요인이 포함된 모노펄스 레이더의 계측 불확도를 추정하여 왔다. 본 연구에서는 각기 다른 특성의 표적에 대해서 어떤 종류의 오차 요인이 모노펄스 레이더 계측 불확도에 영향을 미치는지 살펴보았다. 이를 실험적으로 증명하기 위해서 먼저 환경적 오차 요인이 완벽히 제거된 이상적인 환경에서의 모의 실험 결과를 기술하였다. 이 결과와 함께 지상에 고정된 교정장치, 저속으로 기동하는 교정구, 고속으로 기동하는 비행표적에 대한 불확도를 추정함으로써 오차 요인이 포함된 각기 다른 특성의 표적에 대한 모노펄스 레이더 계측 불확도를 정량적으로 비교 고찰하였다.

ABSTRACT

In general, an error budget of monopulse radar is proposed by manufacturer who assuming that all of external environmental error resources such as multipath, glint, dynamic lag variation are removed. So until now, a measurement uncertainty of monopulse radar can be discussed including external environmental error resources. In this paper, it is described that which kinds of error resource can effect on monopulse radar measurement uncertainty for different target property. To prove it experimentally, at first a simulation result is described assuming that all of external environmental error resources are removed. It only includes receiver thermal noise. And then, monopulse radar measurement uncertainty estimation results tracking on calibration target which is fixed on specific position, calibration sphere which is moving slowly, weapon systems firing test which is moving fast are described quantitatively. All of these targets have different dynamic property.

키워드 : 모노펄스 레이더, 오차 요인, 표적 특성, 계측 불확도

Key word : Monopulse Radar, Error Budget, Target Property, Measurement Uncertainty

Received 12 September 2016, Revised 30 September 2016, Accepted 05 October 2016

* Corresponding Author Yong-sik Jang(E-mail:153692@add.re.kr, Tel:+82-41-671-2189)

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2017.21.1.229>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

일반적으로 계측자료가 얼마나 정확한지의 여부는 참값(true value)과 측정값(measured value)에 대한 비교를 통해 알 수 있다. 그러나 고속으로 기동하는 표적에 대한 위치 정보의 경우, 정확한 참값을 알 수 없다. 동종 또는 서로 다른 특성의 계측 장비로부터 획득된 데이터의 차이만을 비교 할 수 있을 뿐이다.

또한 고속으로 기동하는 표적에 대한 위치 정보를 모노펄스 레이더로 추적할 경우, 참값과 측정값의 차이인 오차 성분이 커지면 추적 실패의 위험성이 증가할 뿐 아니라, 추적 실패에 대비하여 계측 여유성을 확보하기 위해서 고가의 레이더를 추가로 병행 운용해야 한다. 또한 추적에 실패하지 않더라도 획득된 계측 데이터의 신뢰도가 저하될 수밖에 없다. 뿐만 아니라 내외부적으로 추적 데이터 신뢰도 제고에 대한 요구가 꾸준히 증대되고 있는 실정이다.

일반적으로 모노펄스 레이더의 오차 수준은 시스템 제작사의 사양서에 의해서 확률적으로 제시되고 있다. 그러나 이러한 오차 수준은 외부의 환경적 오차 요인이 제거된 이상적인 경우를 가정하고 있다. 따라서 지금까지는 모든 외부 환경적 오차 요인이 포함된 추적 환경에서의 모노펄스 레이더 계측 불확도를 경험적으로 추정하였다. 그리고 환경적 오차 요인이 완벽히 제거될 경우, 오차 요인이 포함된 추적 환경에서의 계측 불확도보다 막연히 일정 수준 이상 향상된 수준일 것이라 추측하여온 것이 현실이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 모노펄스 계측 레이더의 불확도에 영향을 미치는 여러 가지 오차 요인을 살펴본 뒤, 각각의 오차 요인이 완벽히 제거된 이상적인 환경에서의 모의실험 결과와, 오차 요인이 포함된 추적 환경에서 특성이 서로 다른 표적에 대한 계측 불확도를 정량적으로 비교 고찰하고자 한다. 이를 위하여 먼저 레이더 시스템 사양서에서 제시된 수준으로 오차 신호를 생성하는 모의실험을 수행하여 불확도를 추정하고, 그 결과를 실제 추적 환경에서 특성이 서로 다른 몇 가지 종류의 표적에 대한 불확도 추정결과와 비교 기술함으로써, 각기 다른 특성의 표적에 따라 어떤 오차 요인이 모노펄스 레이더의 계측 불확도에 영향을 미치는지 살펴보고자한다.

II. 오차이론

2.1. 용어의 정의

오차 e 는 계측 장비에 의해 측정된 값(measured value)과 참값(true value)의 차이로 정의되며 수식 1과 같이 나타낸다.

$$e = U_{measured} - U_{true} \quad (1)$$

교정(calibration)이란 오차를 줄이기 위한 활동으로서 계측에 필요한 보정을 실시함을 의미한다. 정확도(accuracy)는 참값에 접근하는 정도를 나타낸다. 정밀도(precision)는 참값에 대한 외견상의 근접도이다. 즉 측정값의 반복성 혹은 일관성의 정도를 나타내며 측정값의 평균으로부터 분산정도를 나타낸다. 그림 1은 정확도와 정밀도에 대한 내용을 그림으로 표시한 것이다.



Fig. 1 Accuracy and Precision

그림 1에서 (a)는 다트 판의 중심부로부터 다트가 산개한다. 이는 정확하지만 정밀하지 않은 경우이다. (b)는 다트가 다트 판의 중심부에서 일정한 거리만큼 떨어져서 다트 군을 형성하고 있다. 즉 정밀하지만 정확하지 않다. (c)는 정확하고 정밀한 경우로서 다트가 다트 판의 중심부에 밀집해있다.

최근 측정의 소급성(traceability)을 위해 측정 불확도 개념이 확산되고 있다. 왜냐하면 측정 대상에 대한 물리량의 참 값을 명확히 알 수 없으므로, 오차만으로는 측정결과의 품질을 올바르게 표현할 수 없기 때문이다. 따라서 측정 불확도(uncertainty)란 불확실성, 즉 믿을 수 없음의 뜻을 가지며, 측정된 물리량으로부터 합리적인 기인하는 범위의 값으로 정의되어지며, 특정한 방법으로 평가되고 보고되어진 불확도는 측정 대상의 기대값이 특정 신뢰 수준에서 실제로 놓여질 구간을 추정하게 된다.

2.2. 오차의 표현

오차는 계통적인(systematic) 요소인 바이어스 성분과 무작위 성분인 잡음(noise)으로 구별할 수 있다. 오차 성분이 모두 상수로 기술되는 이상적인 경우에는 하나의 숫자로 표시 가능할 것이며, 이 숫자로 정규화한 자료를 사용하여 오차 보정 자료로 사용할 수 있을 것이다. 바이어스 성분은 오차의 평균값으로 표현하며 측정 자료의 정확도를 나타내고, 무작위 성분인 잡음은 오차의 표준편차로 표현하며 정밀도를 나타낸다.

측정값 $\{x_i|x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 의 평균값을 \bar{x} 이라고 하면 표준편차(standard deviation, σ)는 아래 수식 2와 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

수식2에서 $(x_i - \bar{x})$ 은 측정값과 평균값의 차이, 즉 오차를 의미한다. 순시적인(instantaneous) 오차값 x_e 는 수식 3으로 정의된 평균 \bar{x} 를 중심으로 제한된 범위에 있게 된다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

따라서 제곱근평균(RMS, root mean square) 오차값은 수식 4와 같이 정의된다.

$$x_s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_e^2 \quad (4)$$

확률 오차(probable error)는 첨두 오차(peak error)와 0 사이의 값을 갖으며, 대부분의 경우, 평균 오차가 0이 아니라면, 제곱근평균 오차는 바이어스 성분과 무작위 성분의 합으로 표현되며 수식 5와 같다.

$$x_s^2 = \bar{x}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

수식 5에서 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 는 오차의 분산(variance)을 의미하며 이 값에 근(root)을 취한 것이 수식 2와 같

이 표준편차가 된다. 수식 3과 수식 5의 오차는 특정 경우만이 아니라 측정 자료의 오차 분포도와 같은 임의 조건에서도 적용 가능하다[1].

III. 모노펄스 레이더

3.1. 모노펄스 레이더 특성

모노펄스 레이더는 각도를 측정함에 있어서 기본적으로 단일 펄스를 사용하는데, 그 동작 방식에 착안하여 모노펄스 레이더로 명명되어진다. 모노펄스 각도 추적 시스템은 페루프(closed loop) 서보 시스템을 사용하여 추적 안테나의 보어사이트를, 움직이는 표적을 향해 지향하기 위하여, 기계적으로 구동하는 두 개의 직교성(orthogonal)을 나타내는 각 좌표계(방위각, 고각)에서 각 오차 신호를 획득한다. 모노펄스 각도 측정 방식에는 몇 가지 방식이 있으며, 가장 범용으로 활용되는 방식은 동시에 수신되는 신호의 진폭을 비교하는 진폭 비교(amplitude comparison) 모노펄스 방식이다[2].

진폭비교 모노펄스 레이더는 두 개의 안테나 주엽 패턴을 일정한 방향차이로 이격(squinted or offset) 시켜서, 그 합과 차 신호의 전압비 Δ/Σ 를 이용하여 각도를 추정한다. 합/차 패턴은 수신기에만 적용되는데 반해, 합 패턴은 송신기에만 적용된다. 차 패턴으로 수신된 신호는 각도 오차의 크기정보를 제공한다. 합 패턴의 위상과 차 패턴의 위상을 비교하여 각도 오차의 방향을 결정한다[3].

3.2. 모노펄스 레이더 오차 요인

일반적인 모노펄스 레이더 오차 요인은 표 1과 같다 [2, 3]. 모노펄스 레이더의 오차 요인은 여러 가지 방법으로 분류할 수 있다. 먼저 주파수 분포에 따라서는 DC 형태의 바이어스 성분과 AC 형태의 무작위 성분으로 나눌 수 있다. 오차의 원인에 따라서는 레이더의 존재적인 오차, 표적 의존적인 오차, 전파 오차와 그 밖의 기계적 오차로 나눌 수 있다. 시스템 입력 시점에 따라서는 추적 오차(tracking error : 보어사이트 축이나 거리 게이트가 표적으로부터 떨어지게 만듦)와 변환 오차(translation error : 출력 데이터가 보어사이트 축과 거리 게이트의 위치를 잘못 나타냄)로 구분할 수 있다[4].

Table. 1 Monopulse radar error resource[2]

source	bias error	random error
radar dependent track error	boresight RF, IF tuning receiver phase target amplitude antenna mislevel	receiver termal noise multipath wind gusts servo electric noise servo mechenic noise
radar dependent translation error	pedestal align/bent antenna align/bent antenna bent axis orthogonal solar radiation	pedestal/antenna incline bearing wobble gear nonlinearity/backlash
target dependent track error	dynamic lag	glint dynamic lag variation scintillation
propagation error	refraction of troposphere/ionosphere	irregularities in tropospheric/ionospheric refraction
instrumentation error	optical parallax	granularity error optical parallax variation

대부분의 경우, 이러한 성분들은 상관관계(correlation)를 가지지 않으며, 전체 오차는 제곱근평균오차의 합으로 표현할 수 있다. 추적 수행전 정밀한 교정을 수행한 모노펄스 레이더의 경우, 바이어스 성분에 의한 오차가 거의 존재하지 않는다.

따라서 본 연구에서는 표 1에서 제시한 오차 요인 중, 무작위 성분에 의한 오차 요인만을 고려하기로 한다. 단, 표 1에 제시된 무작위 성분에 의한 오차 요인 중 전파 전파 오차(propagation error)의 경우, 모노펄스 레이더 내부 자료처리 알고리즘에 의해 대기환경 조건에 따라 실시간 대기 굴절률 보정이 이루어지며, 기계적 오차는 표적 추적임무 수행 준비 과정에서 별자리 교정(star calibration)을 수행하기 때문에 광학 시차가 극히 미미한 수준이므로 다른 오차 요인에 비교해서 상대적으로 미미한 수준이다[5,6].

3.3. 모노펄스 레이더 오차와 불확도

모노펄스 레이더의 잡음은 표적 추적 도중 발생하는 시스템 손실, 수신기 열화에 의한 열잡음, 경로손실, 다중경로간섭 등, 다양한 경로 상에서 발생 할 수 있다. 본 연구에서는 바이어스 성분 오차는 교정을 통해 0이라 가정하고, 무작위 오차만 고려하기로 한다.

일반적으로 계측 레이더 기준의 거리, 방위각, 고각 측정값 r_m, θ_m, ϕ_m 는 아래 수식 6과 같이 표현된다.

$$r_m = r + \tilde{r}, \quad \theta_m = \theta + \tilde{\theta}, \quad \phi_m = \phi + \tilde{\phi} \quad (6)$$

측정값 r_m, θ_m, ϕ_m 는 참값 r, θ, ϕ 와 무작위 오차 $\tilde{r}, \tilde{\theta}, \tilde{\phi}$ 의 합으로 표현된다. 이 각각의 오차성분은 서로 독립적이고 평균이 0, 분산이 각각 $\sigma_r^2, \sigma_\theta^2, \sigma_\phi^2$ 인 가우시안(gaussian) 잡음으로 가정하였다. 모노펄스 레이더는 표적까지의 거리, 방위, 고각을 측정할 뿐 아니라, 측정값의 오차정보(IORF, LRRF, UDRF)를 출력한다. 여기서 IORF는 거리의 오차(In Out Radio Frequency)로 단위는 m이며, LRRF는 방위각의 오차(Left Right RF)로써 단위는 rad, UDRF는 고각의 오차(Up Down RF)이며 역시 단위는 rad이다. LRRF, UDRF 오차 신호는 모노펄스 레이더의 보어사이트 방향과 표적까지의 RF(Radio Frequency) 신호가 이루는 각도 오차 성분을 나타낸다[7].

그림 2는 본 연구에서 소개된 모노펄스 레이더의 거리, 방위각 RMS 무작위 오차 성분을 표기한 것이다.

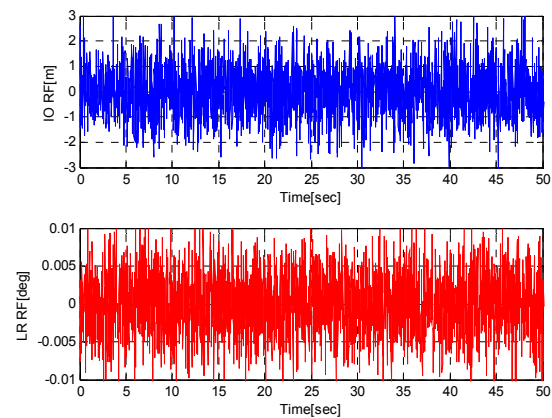


Fig. 2 Random RMS error signal

본 연구에서는, 20ms 간격으로 획득되는 모노펄스 레이더 오차 신호를 50개씩 1초 단위로 이동 윈도우(moving window) 방식을 적용하여, 거리, 방위각, 고각에 대한 각각의 잡음 오차의 표준편차를 A형 불확도도 산출하였다[8].

그림 3은 그 중에서 거리 무작위 오차에 대한 확률분포함수(pdf, probability distribution function)를 나타낸 결과이다.

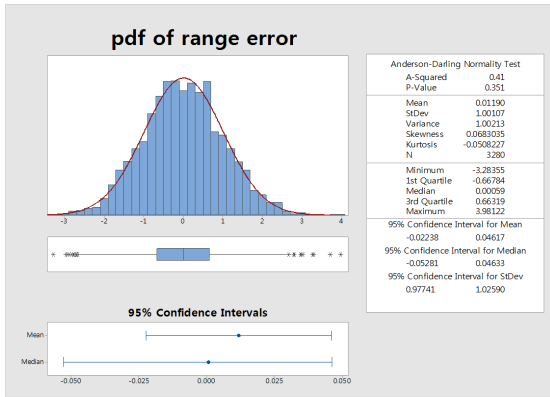


Fig. 3 pdf of range error signal

RMS는 수식 5로 계산되었으며, 동일한 값에 대한 정규분포 곡선은 일반적인 수식을 적용하여 얻을 수 있다. 확률 오차 x_{50} 는 정규분포의 경우에 수식 7과 같이 주어진다[9].

$$x_{50} = 0.6745 \sigma_x \quad (7)$$

정규분포는 알고 있지 않는 특성을 가진 오차에 대하여 주로 적용하는데, 여러 가지 조건에 대하여 근사적으로 접근한다. 오차가 잡음 특성을 갖는 경우, 침투 오차는 평균값으로부터 $3\sigma_x$ 의 편차를 갖는 값을, peak to peak 오차는 평균값으로부터 $6\sigma_x$ 편차를 갖는 값을 말한다. 정규분포상에서 $3\sigma_x$ 를 초과할 확률은 0.3%에 불과하다.

IV. 불확도 추정결과

4.1. 모의오차 신호의 불확도

본 절에서는 모노펄스 레이더 제작사의 사양서에서 제시하는 이상적인 잡음환경, 즉 수신기 열잡음만을 고려한 오차 신호를 모의로 생성하고, 생성된 오차 신호를 이용하여 계측 불확도를 추정하였다.

본 연구에서 소개된 모노펄스 레이더는, 외부 환경에 의한 오차 요소가 없다고 가정할 경우, 거리와 각도의 RMS 오차는 각각 2 m, 0.15 mil 수준이다. 이와 같은 수준으로 거리의 오차 평균이 0, 표준편차가 1m, 각도 오차 평균이 0°, 표준편차가 0.075mil인, 바이어스 성분이 완벽히 제거된 이상적인 오차 신호를 모의로 생성하면, 그 결과는 그림 4와 같다. 그러나 이는 가상의 오차 신호일 뿐, 실제 추적 환경에서는 다중경로 간섭, 서보 잡음, 글린트, 서보지연 등 다양한 외부의 오차 요인들이 포함되기 때문에 시스템 사양서에 제시된 위 값들을 절대적으로 신뢰할 수는 없다[10,11].

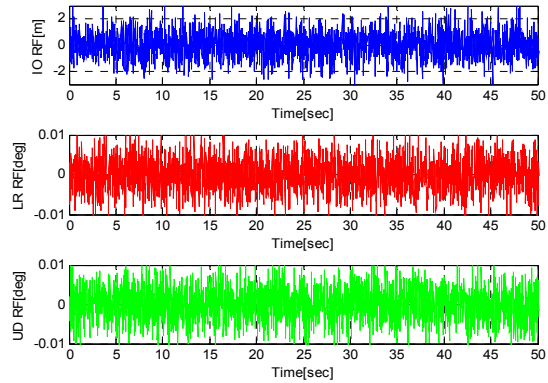


Fig. 4 Simulated error signal

그림 4의 이상적인 모의오차 신호를 이용한 거리, 방위각 고각 불확도 추정 결과는 그림 5와 같다.

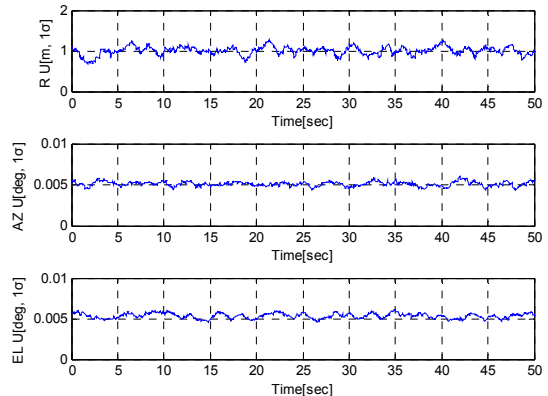


Fig. 5 Uncertainty of simulation error signal

모의실험의 경우, 시간이 경과하더라도 추적 오차가 일정한 수준을 유지하기 때문에 거리, 방위각, 고각 불확도 결과도 일정한 수준을 유지함을 확인할 수 있다.

4.2. 교정장치 계측 불확도

모노펄스 레이더의 보어사이트 교정을 위해서 레이더에서 458 m 이격된 지점에 위치한 고정형 교정장치를 추적하였다. 추적결과와 함께 획득된 IORF, UDRF, LRRF 오차 신호를 이용하여, 4.1절과 동일한 방법으로 거리, 방위각, 고각 불확도를 산출하면 그림 6과 같다.

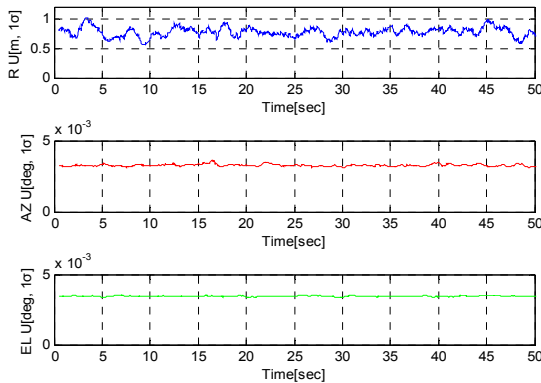


Fig. 6 Uncertainty of fixed calibration target track

거리 불확도는 모의 오차신호 수준인 1 m, 방위각, 고각 불확도는 각각 0.005° 이하임을 확인할 수 있다. 교정장치 추적의 경우, 지상에 고정된 위치의 교정장치를 추적하기 때문에 기본적인 수신기 열잡음이 포함되며, 교정장치가 모노펄스 레이더보다 낮은 지역에 위치한 지형적인 여건에 의해 다중경로 간섭에 의한 오차 성분이 다소 포함될 수 있다.

4.3. 교정구 계측 불확도

모노펄스 레이더는 RCS(Radar Cross Section) 교정을 위해 교정구 추적을 실시한다. 본 절에서는 교정구 계측 불확도를 설명한다. 헬륨가스를 가득 채운 풍선에 알루미늄 재질의 6인치 교정구를 매단 후 모노펄스 레이더로 추적을 실시하였으며, 추적결과와 함께 획득된 IORF, UDRF, LRRF 오차 신호를 이용하여, 4.1절과 동일한 방법으로 거리, 방위각, 고각 불확도를 산출하면 그림 7과 같다.

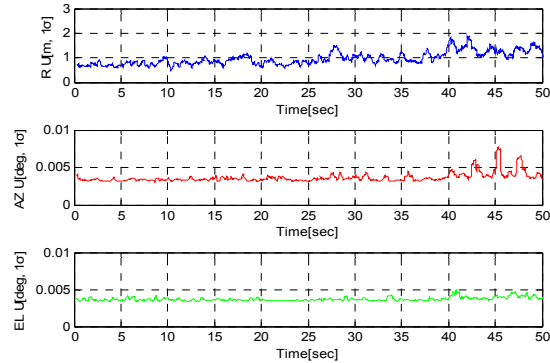


Fig. 7 Uncertainty of flying sphere track

거리 불확도는 추적 초기 구간 약 20초 부근까지 1 m 수준을 유지하다가 이후 점진적으로 증가하여 약 50초 부근까지 2 m 수준으로 증가한다. 방위각 불확도는 추적 초기 구간 약 40초 부근까지 0.005° 수준을 유지하다가 50초까지 간헐적으로 약 0.008°까지 증가하기도 한다. 고각 불확도는 추적 구간 내내 안정적으로 최대 0.005° 수준을 유지한다.

이는 서서히 기동하는 교정구 추적의 경우, 수신기 열잡음과 함께 페데스탈 서보 잡음에 의한 오차 요인이 다소 포함될 수 있기 때문이다.

4.4. 고기동 표적 계측 불확도

고속으로 기동하는 비행표적 추적결과와 함께 획득된 IORF, UDRF, LRRF 오차 신호를 이용하여, 4.1절과 동일한 방법으로 거리, 방위각, 고각 불확도를 산출하면 그림 8과 같다.

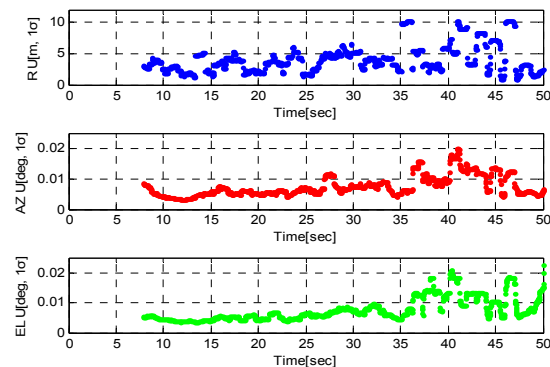


Fig. 8 Uncertainty of high speed moving target

표적신호가 획득된 순간부터 거리 불확도는 4 m 수준에서 탄도 중반이후 최대 10 m 수준으로 증가한다. 방위각 불확도는 최초 0.007° 수준에서 점차 증가하여 탄도 중반이후 최대 0.02° 수준으로, 고각 불확도는 최초 0.006° 수준에서 점차 증가하여 탄도 중반이후 최대 0.02° 수준으로 증가한다. 참고로 상기 비행시험의 탄착 사거리의 약 30 km 이다. 고속 기동 표적의 경우, 수신기 열잡음뿐 아니라, 표 1에서 언급된 모든 오차 요소가 반영될 수 있다.

또한 최대 사거리가 비슷한 비행 표적을 추적한 경우와 하더라도 발사각과 표적형태 등의 비행 시나리오에 따라서 모노펄스 레이더 계측 불확도의 특정 수치는 다소 달라질 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 모노펄스 레이더의 불확도에 영향을 미치는 여러 가지 오차 요인을 제시하고, 무기체계 시험평가 목적으로 운용중인 모노펄스 레이더(RIR-778X)의 시스템 사양서 수준으로 모의실험을 시행하여 이상적인 계측 불확도를 살펴보았다.

모의실험 결과, 최대 거리 계측 불확도는 1m, 각도 계측 불확도는 0.005° 수준임을 확인할 수 있었다. 그리고 그 결과를 동적 특성이 완벽하게 서로 다른 세 가지 추적 대상에 대한 불확도 추정결과와 비교 기술하였다.

첫째, 고정된 위치의 레이더 보어사이트 교정장치를 추적한 결과, 거리 계측 불확도는 1m, 각도 계측 불확도는 0.003° 수준임을 확인할 수 있었다. 교정 장치 추적의 주요 오차 요인으로는 수신기 열잡음, 다중경로 간섭 등이 있을 수 있다.

둘째, 특별한 기동과 저고도 구간 비행을 하지 않는 교정구를 20km까지 추적한 결과, 거리 계측 불확도는 2m, 각도 계측 불확도는 0.005~0.008° 수준임을 확인할 수 있었다. 교정구 추적의 주요 오차 요인으로는 수신기 열잡음, 서보 잡음 등이 있을 수 있다.

셋째, 고속으로 기동하는 30km 탄착 사거리의 비행 표적을 추적한 결과, 거리 계측 불확도는 최대 10m, 각도 계측 불확도는 최대 0.02° 수준임을 확인할 수 있었다. 고속 기동 표적 추적의 주요 오차 요인으로는 수신

기 열잡음, 서보 잡음, 다중경로 간섭, 글린트, 실시간 뒤처짐 오차 등이 있다.

결과적으로 표적의 동적 특성에 따라서 거리 계측 불확도는 최대 약 10배(1m와 10m), 각도 계측 불확도는 최대 4배(0.005°와 0.02°)까지 이상적인 계측 불확도와 정량적으로 차이가 난다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이상적인 추적 환경이 레이더 자체요인과 외부 환경적 요인에 의해 실제 추적 환경과 다르기 때문이다. 만약, 실제 추적 환경이 이상적인 추적 환경 조건에 근접할 경우, 계측 불확도 역시 근접함을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구를 통해, 동적 특성이 각기 다른 표적의 레이더 계측자료에 대한 학술적인 정량적인 불확도 추정방안을 제시함으로써, 무기체계의 전술적 가치를 제고하는 동시에 시험의뢰자의 고객만족도를 극대화시킬 수 있는 계기를 마련할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] P. Suchomski, "Explicit Expression for Debiased Statistics of 3D Converted Measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no.1, pp. 368-370, Jan. 1999.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, 3rd ed, Boston, MA: McGraw Hill, pp. 30-34, pp. 213-238, 2001.
- [3] D. K. Barton, *Modern Radar System analysis*, Boston, MA: Artech House, pp. 13-19, pp. 512-531, 1988.
- [4] N. C. Currie, *Techniques of Radar Reflectivity Measurement*, Dedham, MA: Artech House, pp. 188-194, pp. 208-212, 1984.
- [5] D. K. Barton, *Handbook of Radar Measurement*, Dedham, MA: Artech House, pp. 159-161, pp. 170, pp. 199-212, pp. 240-241, 1984.
- [6] C. H. Ryu, G. H. Hwang, "Instrumentation Radar Accuracy Analysis," ADDR-514-101055, pp. 4-12, 2010.
- [7] S. H. Ye, G. H. Hwang, J. S. Bae, I. H. Seo, K. B. Bae, "Analysis of Dynamic Tracking Performance in Instrumentation Radar," DSTC-409-01026, pp. 17-19, 2001.
- [8] B. S. Yaakov, *Estimation with Applications To Tracking and Navigation*, New York, NY: John Wiley&Sons, Inc. pp. 51-52, pp. 74-78, 2001.
- [9] B. S. Yaakov, D. Lerro, "Tracking with Debiased

Consistent Converted Measurements Versus EKF,” *IEEE Transactions on Aerospace&Electronic Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1016-1017, Jul. 1993.

II Distribution Functions and Further Power Spectra,” Naval Research Laboratory Technical Report AD499609, *Interim Rept, Hastings, A.E.*, pp. 5-9, 1952.

[10] J. E. Meade, H. L. Germin, “Noise in Tracking Radars. Part

[11] RIR-778X, “Theory of operation,” VITRO, 1992.



장용식(Yong-Sik Jang)

2001년 2월 : 금오공과대학교 전자제어공학과(공학학사)
2002년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
2017년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과(공학석사)
※관심분야 : 레이더 신호 처리



류충호(Chung-Ho Ryu)

2000년 2월 : 부산대학교 전자공학과(공학사)
2001년 7월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
2012년 2월 : 충남대학교 전자정보통신공학과(공학석사)
※관심분야 : 레이더 신호 처리, 전자파 수치해석



김환우(Whan-Woo Kim)

1977년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학학사)
1979년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
1988년 6월 : University of Utah 전자공학과(공학박사)
1980년 ~ 현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 정교수
※관심분야 : 레이더 신호 처리