



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

모노펄스 레이더에서 적응형 칼만
필터를 이용한 각 추적 성능 분석

濟州大學校 大學院

에너지應用시스템學部 電子工學專攻

宋 承 彦

2017 年 2 月

모노펄스 레이더에서 적응형 칼만 필터를 이용한 각 추적 성능 분석

指導教授 高 碩 峻

宋 承 彦

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 12 月

宋承彦의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2016 年 12 月

Performance Analysis Angle Tracking
Using Adaptive Kalman Filter in
Monopulse Radar

SeungEon Song
(Supervised by professor Seokjun Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment
of the requirement for the degree of
Master of Science

Major of Electronic Engineering
Faculty of Applied Energy System
Graduate School
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2017. 02.

목차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iv
Abstract	v
제 1 장 서론	1
제 2 장 모노펄스 레이더	3
2.1 모노펄스 기본	3
2.2 4혼 모노펄스 레이더	7
제 3 장 RCS와 글린트 모델링	9
3.1 Rader Cross Section	9
3.2 글린트	10
3.3 RCS와 글린트 모델링	12
제 4 장 경로 모델링	24
4.1 경로 모델링	24
4.2 발사체 경로에 잡음 적용	27
제 5 장 칼만 필터	30
5.1 확장 칼만 필터	30
5.2 적응형 칼만 필터	32
제 6 장 결론	42
참고문헌	43

LIST OF FIGURES

Fig.1. Monopulse Radar Block Diagram	3
Fig. 2. Two Squinted Patterns in 2 Horn Monopulse Radar	5
Fig. 3. Sum Pattern in 2 Horn Monopulse Radar	5
Fig. 4. Difference Pattern in 2 Horn Monopulse Radar	6
Fig. 5. Difference to Sum Ratio in 2 Horn Monopulse Radar	6
Fig. 6. Illustration of 4 Horn Monopulse radar Concept	7
Fig. 7. Phase Front for a Point Source and a Complex Target	11
Fig. 8. Probability Density Function of Glint	12
Fig. 9. Generation Algorithm of RCS and Glint	17
Fig. 10. Joint PDF of the dependently generated Glint and RCS	18
Fig. 11. Joint PDF of the Independently generated Glint and RCS	18
Fig. 12. The Generated RCS	19
Fig. 13. The Generated Glint	19
Fig. 14. Autocorrelation of the Generated RCS	20
Fig. 15. Autocorrelation of the Generated Glint	20
Fig. 16. PDF of the Generated RCS	21
Fig. 17. PDF of the Generated Glint	21
Fig. 18. Glint Generation Method in Azimuth and Elevation	22
Fig. 19. KSLV- I Launch Sequence	24
Fig. 20. Track Model	25
Fig. 21. Range Model	25
Fig. 22. Azimuth Model	26
Fig. 23. Elevation Model	26
Fig. 24. Thermal Noise for Range	27
Fig. 25. The Generated Angle Error	28
Fig. 26. Azimuth Applied Glint and Thermal Noise	29

Fig. 27. Elevation Applied Glint and Thermal Noise	29
Fig. 28. Extend Kalman Filter Algorithm	30
Fig. 29. Adaptive Kalman Filter Algorithm	32
Fig. 30. Angle Error Standard Deviation	34
Fig. 31. Covariance of Extend Kalman Filter and Adaptive Kalman Filter	34
Fig. 32. Kalman Filter Result in Azimuth	35
Fig. 33. Kalman Filter Result in Elevation	35
Fig. 34. Kalman Filter Result in Azimuth Error	36
Fig. 35. Kalman Filter Result in Elevation Error	36
Fig. 36. Kalman Filter Result RMS in Azimuth Error	37
Fig. 37. Kalman Filter Result Mean in Azimuth Error	37
Fig. 38. Kalman Filter Result RMS in Elevation Error	38
Fig. 39. Kalman Filter Result Mean in Elevation Error	38
Fig. 40. Extension of Kalman Filter Result Mean in Elevation Error	39

LSIT OF TABLES

Table 1. Glint RMS for Target Shape	13
Table 2. KSLV- I Position over Time	24
Table 3. RMS of Kalman Filter Result in Azimuth Error	41
Table 4. RMS of Kalman Filter Result in Elevation Error	41
Table 5. Mean of Kalman Filter Result in Azimuth Error	41
Table 6. Mean of Kalman Filter Result in Elevation Error	41

Abstract

Angle error is a factor obstructing to track accurate position in tracking radars. Noise can be divided as follows; thermal noise, servo noise, and glint. The signal transmitted from radar is not reflected from a single point when the signal reflected by complex target. Resultantly, the amplitude and phase of the received signal can be changed because the target has lots of scatterers. The changes of the amplitude and the phase mean Glint and RCS, respectively. Although the Glint and RCS that caused by the same scatters are uncorrelated, however, they are not independent completely. So this paper uses a method for generating the Glint and RCS by using same random number generator. And the time correlations of the Glint and RCS are respectively implemented in frequency domain by using each power spectral density of them. In general, Kalman filter used in tracking radars is designed with assuming thermal noise. But, noise variance varies with range. Therefore this paper purposes adaptive Kalman filter of which measurement noise covariance varies with range. This paper can verify an ability of Kalman filter and adaptive Kalman filter to track KSLV- I (Korean Satellite Launch Vehicles).

제 1 장 서론

추적 레이더는 매우 짧은 시간에 폭이 좁은 펄스를 연속적으로 예리한 지향성 안테나를 통하여 표적에 위치시킴으로서 표적의 현재 위치를 추적하는 장치이다. 전체 혹은 일부의 유용한 레이더 자료인 거리, 고도각, 방위각, 도플러 주파수 변화는 목표물의 미래 위치를 예측하는데 사용된다. 즉, 레이더는 거리, 각도, 도플러 혹은 임의의 이들의 조합을 추적한다[1].

추적 레이더에서 각 추적은 매우 중요한 요소이다. 각 오류가 커질수록 목표물과 레이더 사이의 거리에 비례하여 추적 위치와 목표물 사이의 오차는 더 커지기 때문에 각 오류는 정확한 각 추적을 방해한다. 이 때문에 정확한 추적을 위해서는 잡음을 제거하는 것이 중요하다.

레이더의 송신 신호는 목표물에서 반사될 때 단일 지점에서만 반사되지 않는다. 단일 목표물이라도 송신 신호가 반사되는 산란체는 무수히 많이 존재한다. 이와 같이 여러 산란체에서 반사되는 신호는 수신 신호의 진폭과 위상 변화를 야기시킨다[2].

목표물의 각 산란체에서 반사되는 비율을 Target Cross Section이라 하고, 이러한 Target Cross Section이 수신 신호에 미치는 총 영향을 RCS(Radar Cross Section)라고 한다. 일반적으로, 산란체들에 의한 수신 신호의 진폭 변화를 RCS로 표현한다. 또한 다수의 산란체로부터 수신되는 신호는 위상 변화를 일으키고, 결과적으로 수신 신호의 동위상면(Phase front)이 변하게 된다. 이러한 현상은 추적 레이더의 성능을 저하시키는 요인으로 글린트(Glint)라 일컫는다[3].

정확한 글린트의 모델링은 레이더 보어사이트와 목표물 표면 사이의 각도 차이, 목표물 표면의 상태, 목표물의 움직임 등을 고려하여 산란체의 위치를 정한다. 그 후, 각 각 산란체에서 수신 신호를 계산하여 그 신호를 합하여야한다. 하지만 위의 조건을 전부 가정 할 때 고려해야 하는 변수가 많기 때문에 본 논문에서는 글린트를 통계학적인 분포를 통하여 모델링 한다. 글린트의 통계학적 분

포는 제2 자유도를 갖는 Student's T분포를 사용 하였다[4][5]. 하지만 Student's T분포는 실제 글린트의 분포와 QQ-Plot 분석결과 차이 때문에 가우시안과 다른 분포를 혼합하여 새로운 분포를 사용하였다[6].

본 논문에서는 수신신호의 위상변화에 해당하는 글린트와 진폭변화인 RCS의 원인을 분석하고, 확률적으로 글린트와 RCS를 생성한다. 글린트와 RCS의 개별적인 상관값은 전력스펙트럼밀도(PSD: Power Spectral Density)를 이용하여 주파수축에서 필터링하여 생성하였다. 또한 RCS의 평균값은 KSLV-II 위성 발사체가 L-경로를 지나고, 모노스테틱(monostatic)일 때 평균값을 사용하였다 [7]. 글린트와 RCS간 상관성은 존재하지 않지만, 동일한 산란체에 의해 발생하므로 완벽히 독립이라고 보기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 동일한 랜덤 신호 생성기를 사용하여 글린트와 RCS를 생성하는 방법을 사용하였다.

레이더는 비선형 시스템이고, 비 가우시안 잡음의 특성을 갖는다. 비선형 시스템 특징 때문에 목표물의 다이내믹 모델은 구 좌표계에서 측정된 정보를 직각 좌표계에서 모델링 한다. 일반적으로 비선형 시스템에서 확장 칼만필터와 Unscented 칼만 필터가 쓰이고, 최근에는 Masreliez 필터, Gaussian mixture 칼만 필터 등 다양한 알고리즘이 소개 되고 있다[8]. 본 논문에서는 거리에 따라 측정 공분산을 변형 시키는 적응형 칼만필터를 제시한다.

제 2 장 모노펄스 레이더

2.1 모노펄스 기본

일반적으로 레이더는 송신 신호와 수신 신호의 시간차를 이용해서 거리를 계산한다. 하지만 목표를 추적해야하는 추적레이더는 표적과의 거리만으로는 목표를 추적할 수 없다. 목표의 위치를 정확히 알기 위해서는 거리 정보뿐 아니라 다른 정보 또한 필요하다. 추적레이더는 거리, 고도각, 방위각, 도플러 주파수 변화의 조합은 이용하여 표적을 추적한다. 고도각 혹은 방위각 정보를 얻기 위한 방법으로 순차적 로빙과 원추형 스캔 방식이 있으나 이 방법은 각 정보를 얻기 위해서는 최소한의 펄스가 필요하다. 이것은 각 펄스의 진폭 변동에 따라 추적 성능이 떨어지는 단점이 있다. 하지만 각 정보를 하나의 펄스에서 얻을 수 있다면 위와 같은 단점이 사라지는데, 이것이 모노펄스 방식이다. 모노펄스 레이더는 각 정보를 얻기 위해 하나의 펄스에서 두 개의 서로 겹치는 안테나 패턴을 이용한다. 수학적으로 송신에서는 합신호가 이용되며, 수신에서는 합신호와 차신호가 이용된다. 수신된 신호 중에서, 차신호는 각 오류의 크기를 나타내면, 합신호는 거리 측정과 오류 신호의 부호를 알기 위한 기준 신호로 이용된다.

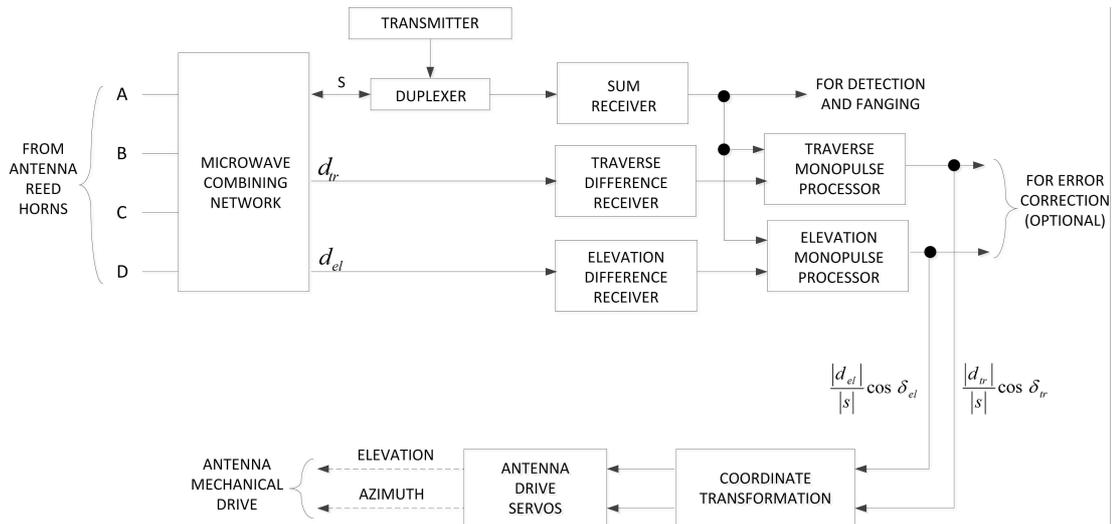


Fig.1. 모노펄스 레이더의 동작 흐름도

Fig. 1은 4혼 모노펄스 레이더의 동작 흐름도이다[9]. 여기서 혼은 레이더에서 펄스를 수신하는 부분을 말하는데, 각 혼마다 서로 다른 아테나 패턴을 나타내게 된다. 일반적으로 모노펄스 레이더를 설명할 때는 2혼 모노펄스 레이더를 사용하는데, 2혼 모노펄스 레이더는 거리와 방위각을 측정 할 수 있는 레이더이다. 2혼 모노펄스 레이더에서 각 혼에 수신되는 신호의 크기는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$V_1 = \frac{\cos[\pi k_\theta(\theta - \theta_{sq})]}{1 - [2k_\theta(\theta - \theta_{sq})]^2} \quad (2-1)$$

$$V_2 = \frac{\cos[\pi k_\theta(\theta + \theta_{sq})]}{1 - [2k_\theta(\theta + \theta_{sq})]^2} \quad (2-1)$$

식 (2-1), (2-2)에서 θ_{sq} 는 Squint angle로 모노펄스 레이더의 일종인 AN/FPS-16의 값인 0.358을 사용 하였다[9]. k_θ 는 Beamwidth constant로 AN/FPS-16의 1.19를 사용 하였다. 그리고 각 오류를 알기 위한 합신호와 차신호 그리고 각 오류와 비례하는 voltage gain은 다음과 같이 계산 된다.

$$s = (V_1 + V_2) / \sqrt{2} \quad (2-3)$$

$$d = (V_1 - V_2) / \sqrt{2} \quad (2-4)$$

$$v_g = s/d \quad (2-5)$$

Fig. 2는 각 혼에서 수신 되는 신호를 정규화시켜 각 오류에 따라 표현한 것이다. Fig. 3과 Fig. 4는 각 오류에 따른 합신호와 차신호를 나타낸다. Fig. 5는 각 오류에 따른 voltage gain을 나타낸다[9]. voltage gain은 선형성을 이루기 때문에 모노펄스 레이더에서 각 오류를 계산 할 수 있게 된다.

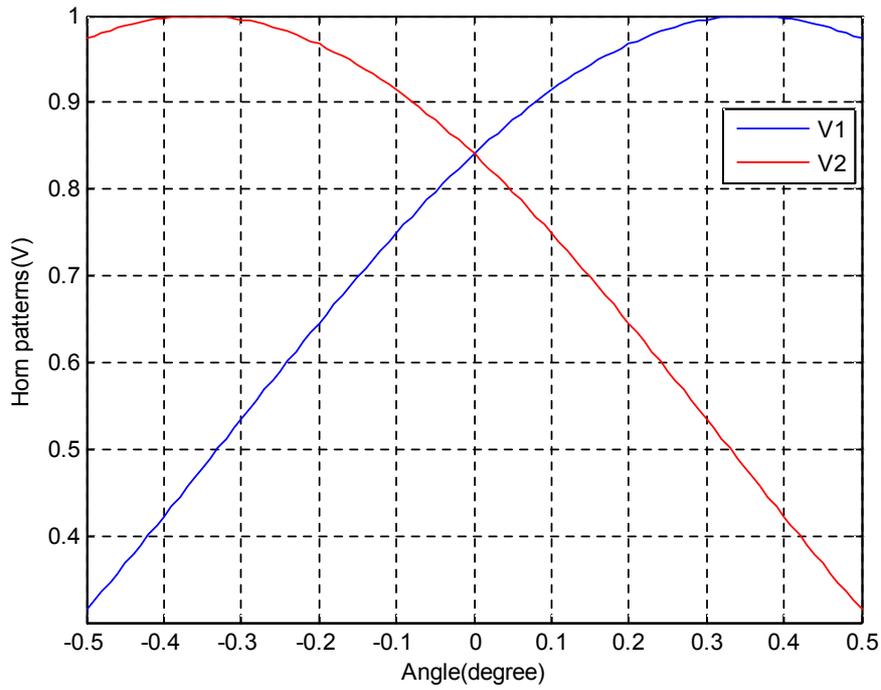


Fig. 2. 2혼 모노펄스 레이더의 각에 따른 혼별 신호

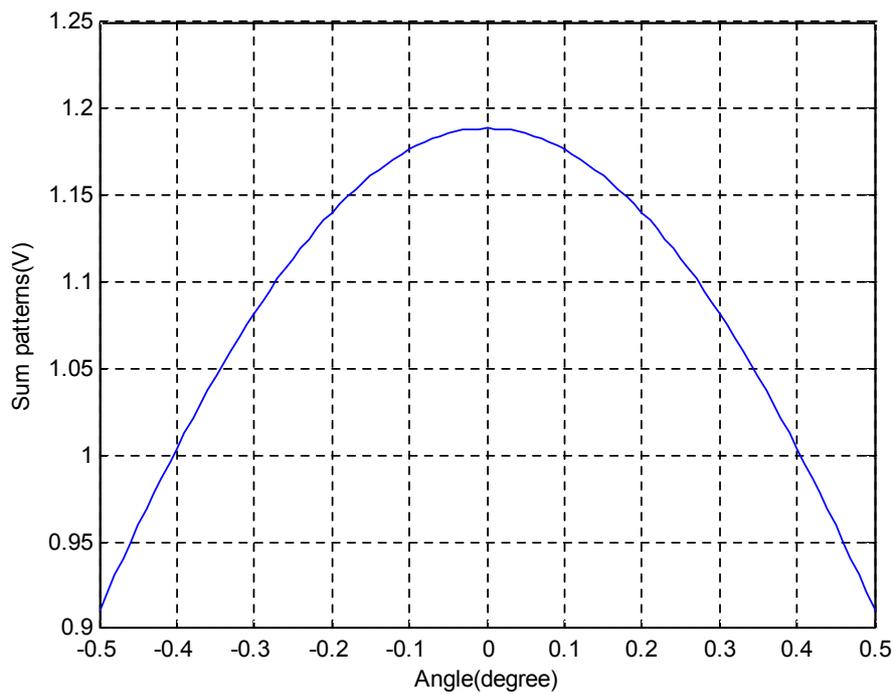


Fig. 3. 2혼 모노펄스 레이더에서 각에 따른 합신호

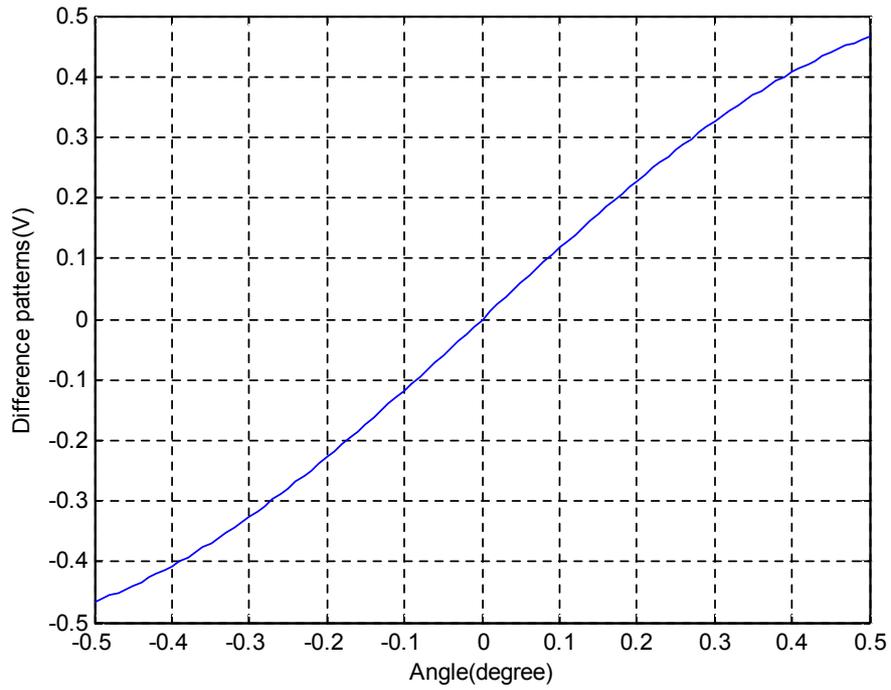


Fig. 4. 2혼 모노펄스 레이더에서 각에 따른 차신호

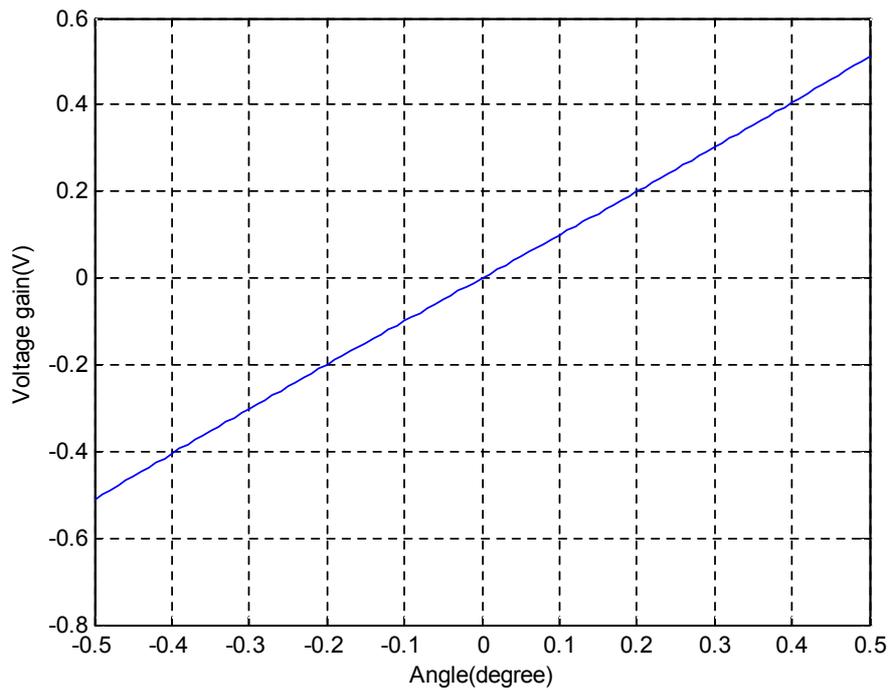


Fig. 5. 2혼 모노펄스 레이더에서 각에 따른 S/D 신호

2.2 4혼 모노펄스 레이더

4혼 모노펄스 레이더는 수신 신호를 받는 혼이 4개인 모노펄스 레이더를 말한다. 4혼 모노펄스 레이더는 거리와 방위각과 고도각을 측정 할 수 있다. 4개의 혼은 일반적으로 다음과 같이 구성된다.

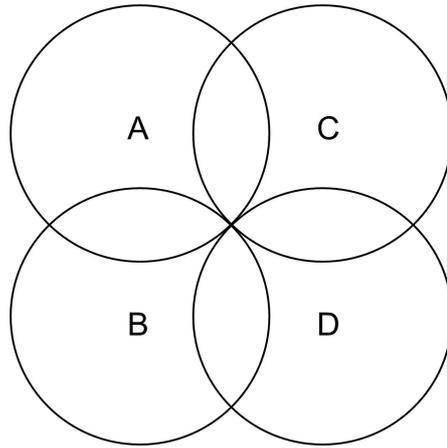


Fig. 6. 4혼 모노펄스 레이더의 혼의 구성

A, B, C, D 4개의 혼 중심이 레이더의 중심이 되고, 레이더의 중심과 혼의 중심 사이의 각이 Squint angle이 된다.

각 혼에서 수신되는 신호의 크기는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$A = \frac{\cos[\pi k_{\theta} \sqrt{(\theta - \theta_{sq})^2 + (\phi + \theta_{sq})^2}]}{1 - [2k_{\theta} \sqrt{(\theta - \theta_{sq})^2 + (\phi + \theta_{sq})^2}]^2} \quad (2-6)$$

$$B = \frac{\cos[\pi k_{\theta} \sqrt{(\theta - \theta_{sq})^2 + (\phi - \theta_{sq})^2}]}{1 - [2k_{\theta} \sqrt{(\theta - \theta_{sq})^2 + (\phi - \theta_{sq})^2}]^2} \quad (2-7)$$

$$C = \frac{\cos[\pi k_{\theta} \sqrt{(\theta + \theta_{sq})^2 + (\phi + \theta_{sq})^2}]}{1 - [2k_{\theta} \sqrt{(\theta + \theta_{sq})^2 + (\phi + \theta_{sq})^2}]^2} \quad (2-8)$$

$$D = \frac{\cos[\pi k_{\theta} \sqrt{(\theta + \theta_{sq})^2 + (\phi - \theta_{sq})^2}]}{1 - [2k_{\theta} \sqrt{(\theta + \theta_{sq})^2 + (\phi - \theta_{sq})^2}]^2} \quad (2-9)$$

4혼 모노펄스 레이더의 합신호와 차신호는 다음과 같이 계산된다.

$$S = \frac{1}{2}(A+B+C+D) \quad (2-10)$$

$$d_{az} = \frac{1}{2}[(C+D)-(A+B)] \quad (2-11)$$

$$d_{el} = \frac{1}{2}[(A+C)-(B+D)] \quad (2-12)$$

4혼 모노펄스 레이더에서 voltage gain은 2혼 모노펄스 레이더와 동일한 방식으로 얻을 수 있다.

제 3 장 RCS와 글린트 모델링

3.1 Radar Cross Section

RCS(Radar Cross Section)는 목표물이 레이더 신호를 반사하는 정도를 말한다. 레이더와 목표물간의 거리가 R일 때, 목표물에 수신된 신호를 P_{di} 라고 하면 목표물에서 반사되는 전력의 양은 다음과 같다.

$$P_r = \sigma P_{di} \quad (3-1)$$

여기서 σ 는 Target cross section이다. P_{Dr} 은 안테나에서 수신되는 전력밀도(power density)로 다음과 같다.

$$P_{Dr} = P_r / (4\pi R^2) \quad (3-2)$$

식 (3-1)과 (3-2)를 이용하면 σ 는 다음과 같다.

$$\sigma = 4\pi R^2 \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (3-3)$$

레이더에서 목표물이 충분히 멀리 떨어졌다고 가정하면, 식 (3-3)은 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\sigma = 4\pi R^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \left(\frac{P_{Dr}}{P_{Di}} \right) \quad (3-4)$$

위 식 (3-4)는 단일 산란체에 대한 RCS이다. 모든 산란체를 고려하면, RCS

는 다음과 같다[2].

$$\sigma_t = \frac{1}{4\pi} \int_{\phi_s=0}^{2\pi} \int_{\theta_s=0}^{\pi} \sigma(\theta_s, \phi_s) \sin\theta_s d\theta d\phi_s \quad (3-5)$$

하지만 RCS를 구하는 방법에 대한 표준은 존재하지 않는다. 다만 평균 혹은 중앙값을 얻을 수는 있는데 이것은 cross section을 묘사한 확률 밀도 함수에 의존한다[3].

3.2 글린트

일반적으로 목표물은 다수의 산란체를 갖고 있다. 글린트는 목표물의 여러 산란체들로부터 반사되는 간섭들 때문에 발생하는 위상 변화이다. 이러한 위상 변화로 인하여 추적 레이더가 목표물의 위치를 측정할 때, 목표물의 중심이 이동되어 측정된다.

Fig. 7은 목표물에 의한 위상 변화율과 산란체들 사이의 관계를 나타낸다. Fig. 7에서 θ 는 목표의 실제 각(aspect angle)이고, θ_a 는 글린트 오류를 포함한 각이다. $\nabla\phi$ 는 동위상면의 변화율이고, δ 는 위상, e_r, e_θ 는 각 각 원형 좌표계에서 단위 벡터를 나타낸다.

각 오류는 글린트 때문에 발생한다. 글린트는 위상 변화에서 발생하기 때문에 원형 좌표계에서 위상 변화는 다음과 같이 표현 할 수 있다[11].

$$\nabla\phi = \frac{\partial\phi}{\partial R} e_r + \frac{1}{R} \frac{\partial\phi}{\partial\theta} e_\theta \quad (3-6)$$

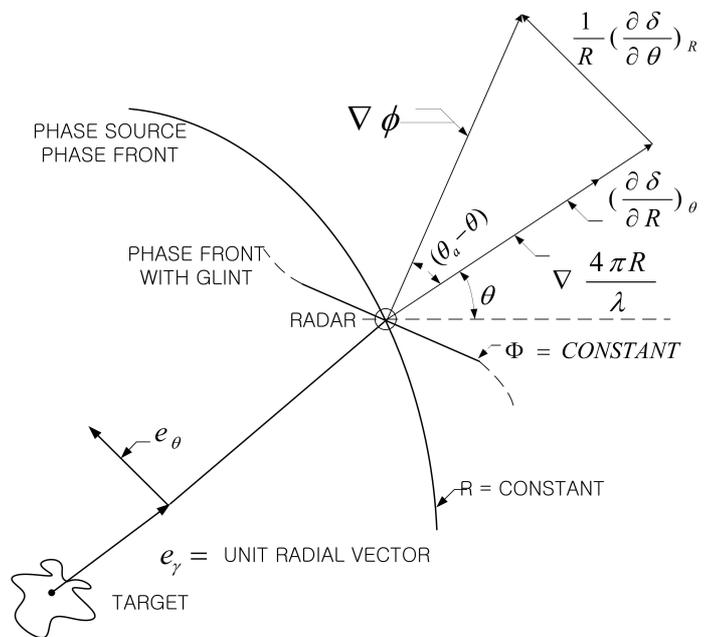


Fig. 7. 하나의 산란체와 목표물에 의한 동위상면

동위상면의 변화로 발생하는 각 오류는 기하학적 해석을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan(\theta_a - \theta) = \tan(\epsilon) = \frac{\frac{1}{R} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}}{\frac{\partial \phi}{\partial R}} = \frac{\frac{1}{R} \frac{\partial \delta}{\partial \theta}}{\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{\partial \delta}{\partial R}} = \frac{\lambda}{4\pi R} \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \quad (3-7)$$

여기서 식 (3-7)의 각각의 미분성분은 다음과 같다.

$\partial \delta / \partial R$: aspect angle에 의한 위상 오류

$\partial \delta / \partial \theta$: 산란체에 의해 발생한 위상 기울기

변화율 $\nabla(4\pi R/\lambda)$ 은 가정된 목표에 대한 동위상면의 외향 법선(outward normal)이다. 각을 거리의 단위로 표현하면, 글린트 ∇W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla W = R \cdot \tan(\varepsilon) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \quad (3-8)$$

결국, 산란체의 수가 증가하여도 글린트는 위상의 변화율과 aspect angle에 의해서만 발생하게 된다.

3.3 RCS와 글린트 모델링

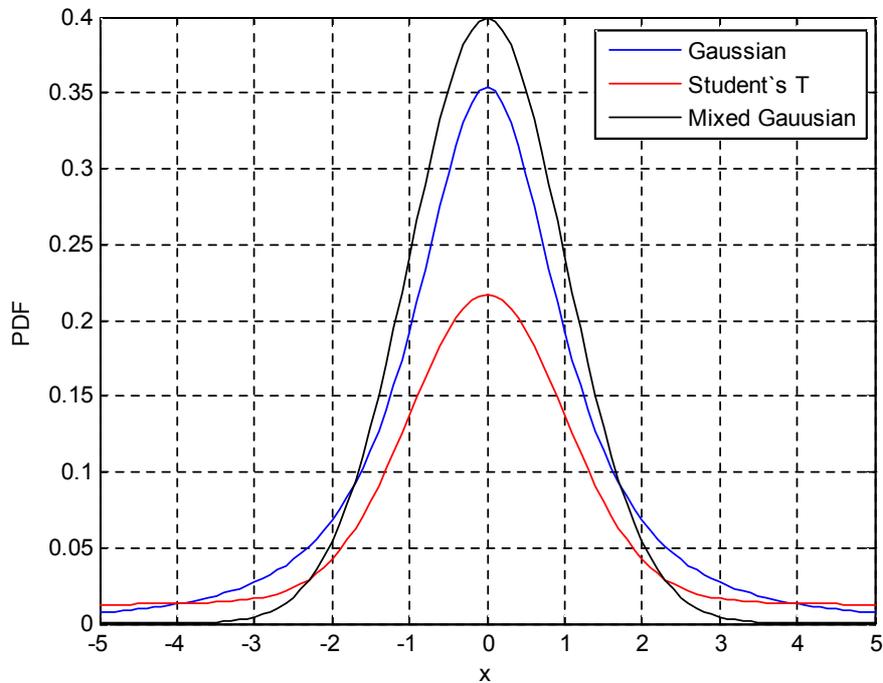


Fig. 8. 글린트의 확률밀도함수

1980년대 Borden과 Mumford는 글린트의 분포를 제2 자유도를 갖는 Student's T로 모델링하였다 [4]. 하지만 Martin과 Zeh는 글린트 기록의 Q-Q Plot을 분석한 결과로부터 가우시안(Gaussian)과 라플라시안(Laplacian)을 혼합한 분포를 제시하였다[12]. Fig. 8은 글린트의 모델이 되었던, 가우시안, Student's T 그리고 혼합 가우시안(Mixed Gaussian)의 확률 밀도함수를 나타낸다. 혼합 가우시안이 다른 분포들 보다 꼬리 부분에서 급격히

떨어지는 형태를 볼 수 있고, Student's T는 꼬리가 두꺼운 가우시안 형태임을 알 수 있다. 아래의 식은 혼합 가우시안 분포 $f(\nabla W)$ 를 나타낸다.

$$f(\nabla W) = (1-i)f_g(\nabla W) + if_l(\nabla W) \quad (3-9)$$

여기서 $f_g(\nabla W)$ 는 가우시안 분포이며, $f_l(\nabla W)$ 는 라플라시안 분포를 나타낸다. 그리고 i 는 0과 1사이의 상수이다. 일반적인 글린트 스펙트럼은 레이더 주파수와 물체의 움직임 때문에 발생하는데 다음과 같다[13].

$$N(f) = \sigma_{ang}^2 \frac{2B}{\pi(B^2 + f^2)} \text{ [power/Hz]} \quad (3-10)$$

여기서 B [Hz]는 글린트 잡음의 대역폭을 나타내며, σ_{ang} 는 각에 대한 글린트 오차(angular glint error)의 RMS이다.

Table 1. 물체의 모양에 따른 글린트의 RMS

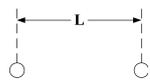
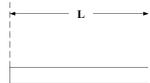
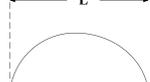
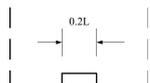
Geometrical Approximation	Radius of Gyration(R)	Angle Scintillation (RMS) $\sigma = R/\sqrt{2}$
	0.5L	0.35L
	0.29L	0.2L
	0.25L	0.18L
	0.14L	0.1L

Table 1은 물체 모양에 따른 글린트의 RMS값을 보여준다. 또한 글린트는 거리에 따라 RMS값이 변하게 되는데 그 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_{ang}(angular\ mils) = \sigma_{ang}(m)/r(km) \quad (3-11)$$

이와 같이 글린트는 거리가 멀어질수록 그 크기가 줄어들게 된다[13].

만일 1 개의 원형 모양 산란체로 이루어진 목표물이 거리 R에 존재한다고 가정하면, RCS는 시간에 따라 변화가 없고 글린트도 존재하지 않는다. 이와 같이 진폭과 위상이 변하지 않는 경우를 기준(reference)으로 가정한다면 수신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{ref}(t) = A_r \exp(j\omega t) \exp(j\frac{2\pi 2R}{\lambda}) \quad (3-12)$$

여기서 A_r 는 거리 R에 위치한 단일 목표물로부터 수신된 신호의 진폭이며, 위상은 $\phi_r = 4\pi R/\lambda$ 이다. 그러나 N개의 산란체로 구성된 목표물로부터 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \exp[j(\omega t - kr_i)] = A(t) \exp(j\omega t) \exp(j\phi(t)) \quad (3-13)$$

여기서 a_j 는 j-번째 산란체로부터 수신된 신호의 진폭, r_j 는 j-번째 산란체에 대한 신호의 왕복 거리이며, $k=2\pi/\lambda$ 는 파수이다. 식 (3-13)은 진폭과 위상이 서로 독립이라고 가정한 경우의 결과식이다 [4, 14]. 따라서 진폭은 식 (3-5)에서의 평균값에 해당하는 RCS에 대한 시간 변화로 나타나며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) = A_r + A_e(t) \quad (3-14)$$

여기서 평균 RCS는 $\sigma_t = E[A(t)] = A_r$ 와 같으며, $A_e(t)$ 는 여러 산란체들로 인해 발생하는 진폭의 변화를 나타낸다.

RCS를 확률적으로 분석할 때는 일반적으로 Swerling 모델을 활용한다. Swerling 모델은 총 5가지가 있다. I, II는 산란체가 고르게 분포한 형태로 레일레이(Rayleigh)분포를 따른다. III, IV는 중심 산란체가 있고, 그 주위에 부 산란체가 존재하는 형태로 제4자유도를 갖는 카이제곱 분포를 따른다. 이때 I, III은 저주파적 특성을 갖고, II, IV는 고주파적 특성을 갖게 된다[15]. 본 논문에서 사용한 RCS의 저주파 성분에 대한 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다 [13].

$$A^2(f) = \frac{0.12B}{B^2 + f^2} \{(\text{fractional modulation})^2 / \text{Hz}\} \quad (3-15)$$

여기서 $B[\text{Hz}]$ 는 반값전력 대역폭이다.

RCS와 글린트 모두 목표물의 산란체에 의하여 영향을 받는다[4]. 하지만 RCS는 수신 신호의 진폭에 변화를 의미하고, 글린트는 수신 신호의 위상에 변화를 의미한다.

일반적인 레일레이 분포와 그에 따른 위상 생성 과정은 Fig. 9의 (a)와 같다. 상관성이 있는 가우시안 분포 2개를 각각 I채널과 Q채널로 이용하여 생성하게 된다. 그리고 이 때, 두 채널을 이용하여 위상 성분 또한 구할 수 있는데, 이때 생성된 위상 성분은 균일 분포를 나타내게 된다.

하지만 글린트는 균일 분포를 갖지 않기 때문에 Fig. 9의 (b)와 같이 별도의 생성 알고리즘이 필요하다. 글린트는 혼합 가우시안 분포를 따르기 때문에 상관성이 있는 가우시안 분포와 라플라시안 분포를 혼합하여 생성 하였다.

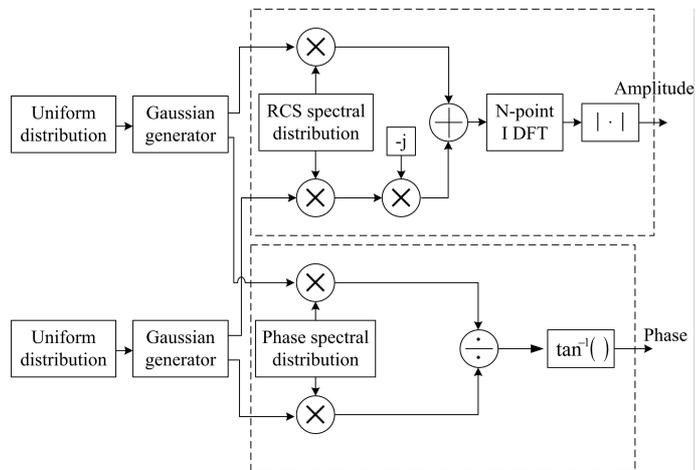
그렇지만 RCS와 글린트의 원인이 되는 산란체는 동일하기 때문에 두 성분은 상관성이 존재하지 않으나, 완전히 독립이라고는 할 수 없다. 그렇기 때문에 산란체가 균일하게 분포한다고 가정하면, RCS와 글린트는 Fig. 9의 (c)와 같이 독립된 2개의 균일 분포로부터 생성된다. (c)의 윗 부분인 RCS는 2개의 균일

분포로부터 가우시안 분포를 생성한 후 RCS 스펙트럼을 적용 시킨다. 이 후 RCS 스펙트럼이 적용된 가우시안은 I, Q 채널이 되어 더해진다. IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform) 과정 후에 절대값을 사용하여 레일레이 분포인 RCS가 생성된다. 아랫 부분인 글린트는 가우시안과 라플라시안 분포가 혼합된 형태이기 때문에 균일 분포를 각각 글린트의 스펙트럼을 적용시킨 가우시안과 라플라시안 분포로 생성한 후 혼합하였다. 또한, 라플라시안 분포에 글린트의 스펙트럼을 적용시키기 위하여 균일분포에서 글린트의 스펙트럼을 적용시키고 라플라시안 분포를 생성하였다.

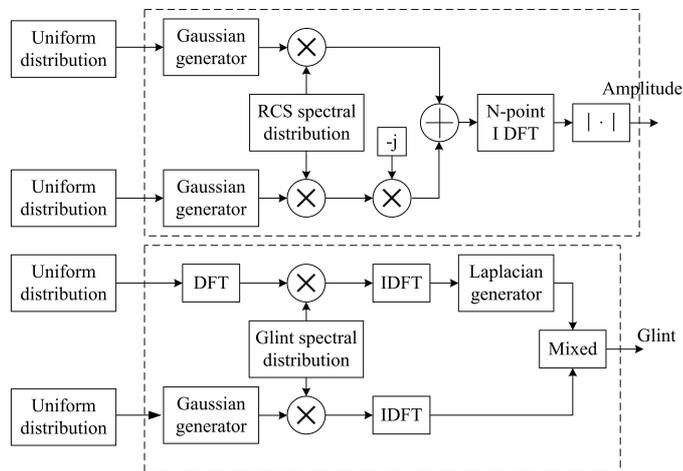
RCS와 글린트를 생성할 때, Fig. 9의 (b)와 같이 독립적으로 생성한 경우와 (c)와 같이 비독립적으로 생성한 경우 차이를 보기 위해서 결합 확률분포를 확인하였다. Fig. 10은 Fig. 9의 (b)와 같이 RCS와 글린트를 독립적으로 생성한 결합 확률밀도함수를 나타냈고, Fig. 11은 Fig. 9의 (c)와 같이 RCS와 글린트를 비독립적으로 생성한 결합 확률밀도함수를 나타낸다. RCS와 글린트의 결합 확률밀도 함수는 RCS는 진폭, 글린트는 위상이 원인이 되어 발생하기 때문에 다음과 같은 방법으로 생성한 함수의 분포를 사용하였다.

$$RCS \cdot \exp(j \cdot glint) \quad (3-16)$$

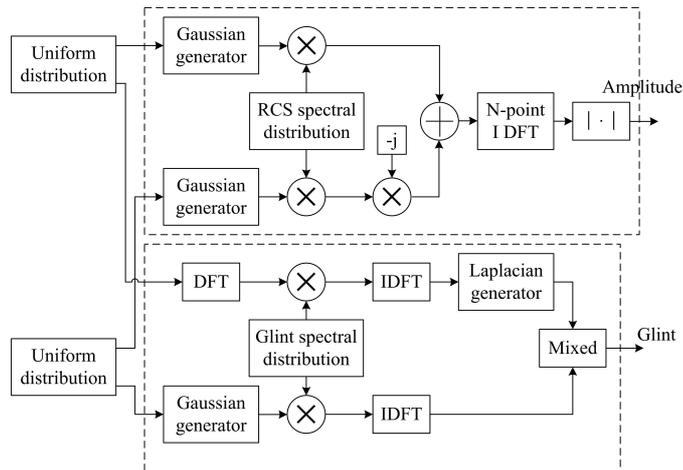
비독립적으로 생성한 결합 확률분포는 Real 값에서는 좌우가 균일한 형태를 Imag 값에서는 양수 값이 좀 더 나타나는 형태 보인다. 독립적으로 생성하면 결합 확률밀도함수가 비독립적인 경우와 비교하여 기울어져 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. RCS와 글린트 생성 알고리즘

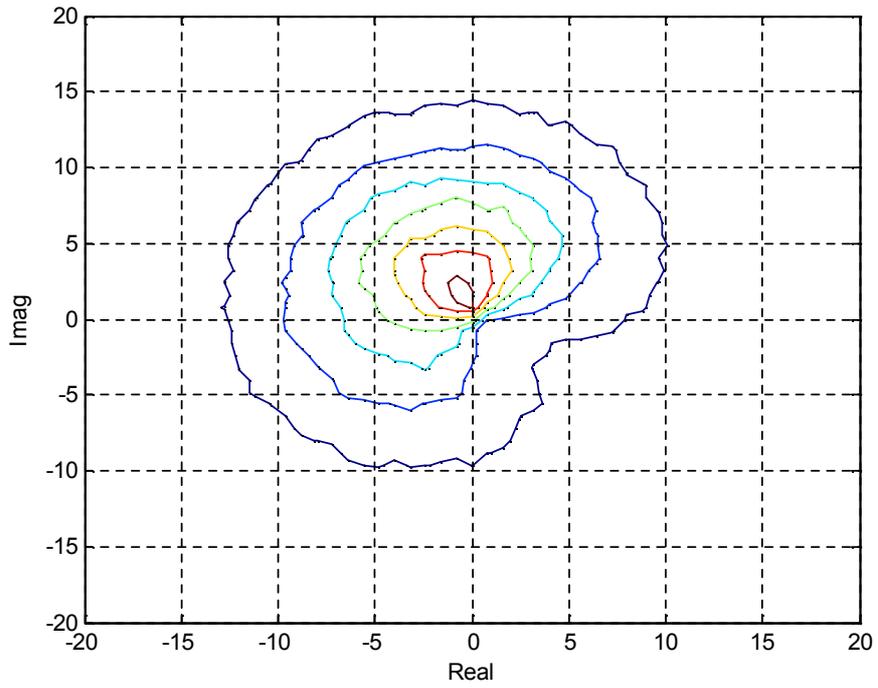


Fig. 10. 독립적으로 생성된 글린트와 RCS의 결합 확률밀도함수

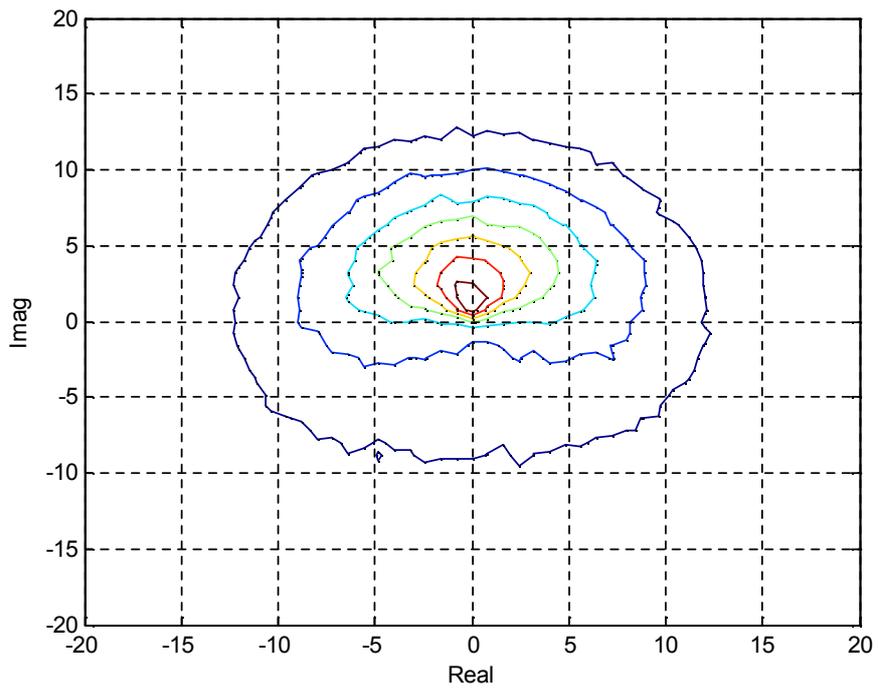


Fig. 11. 비독립적으로 생성된 글린트와 RCS의 결합 확률밀도함수

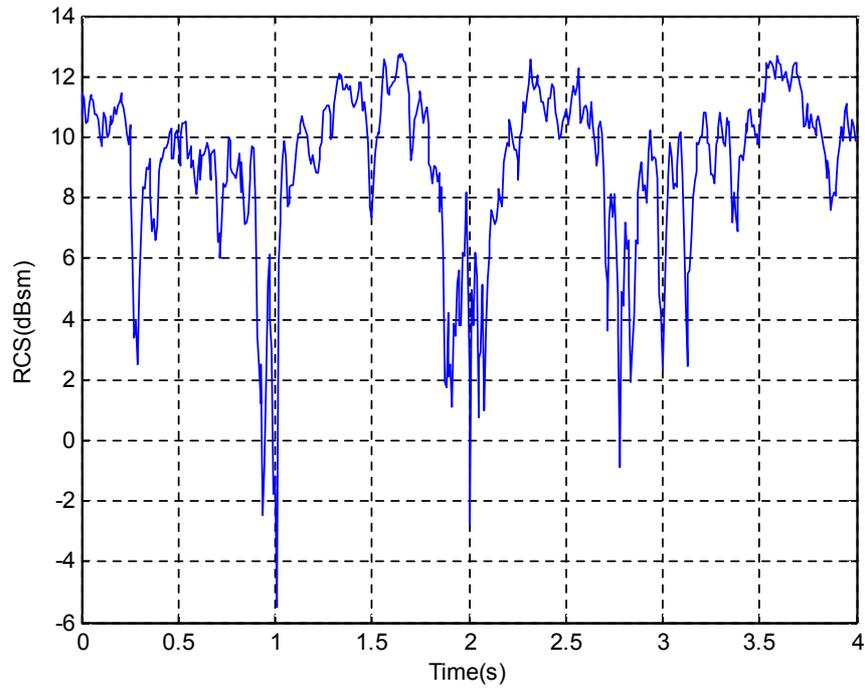


Fig. 12. 생성된 RCS

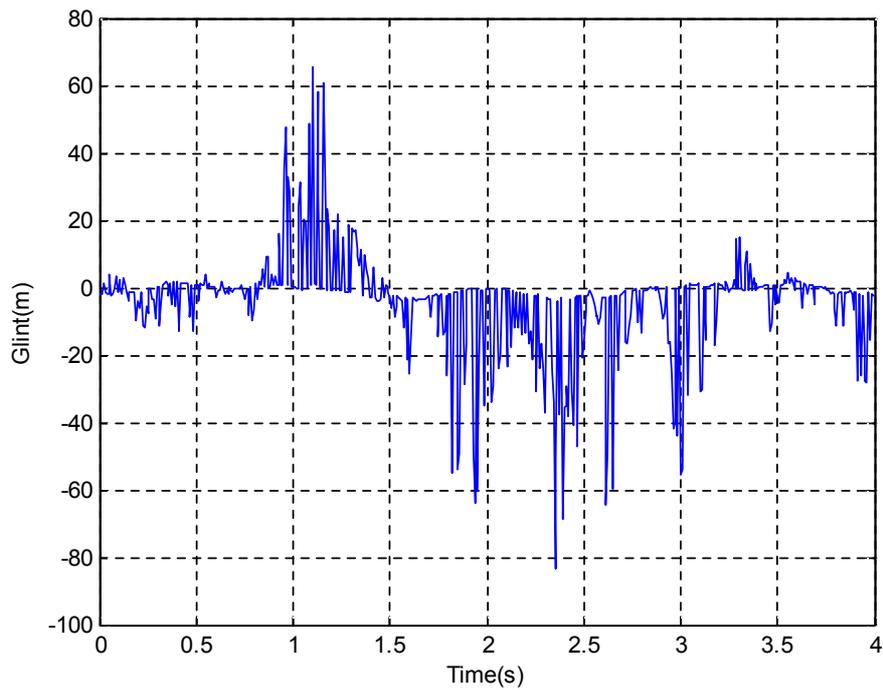


Fig. 13. 생성된 글린트

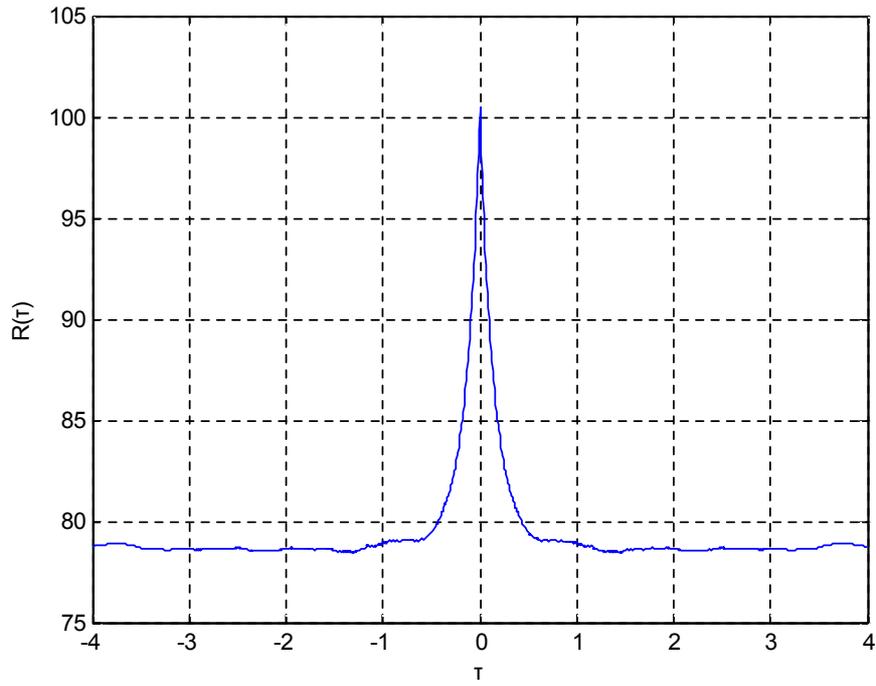


Fig. 14. 생성된 RCS의 자기상관

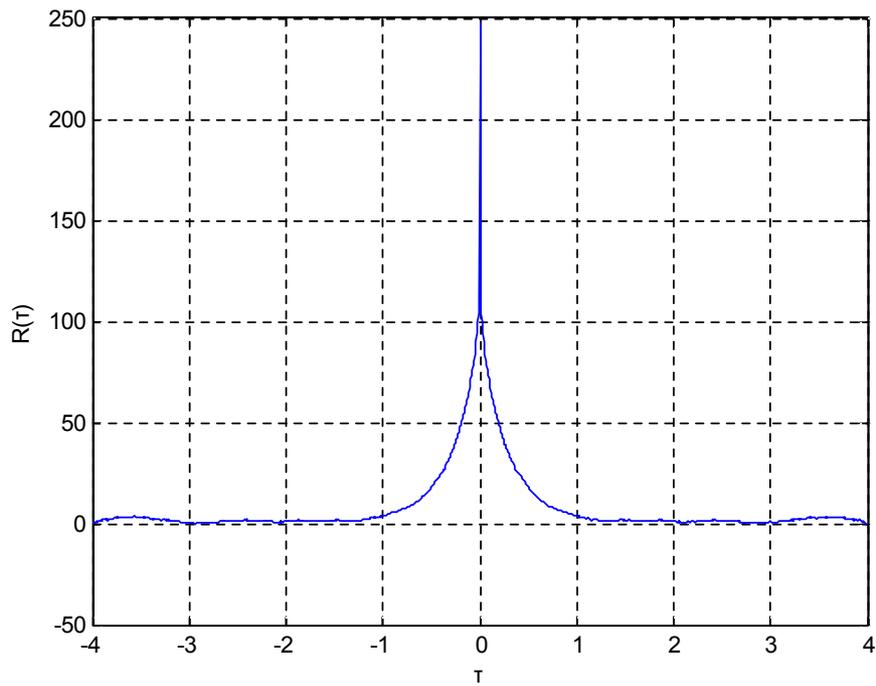


Fig. 15. 생성된 클린트의 자기상관

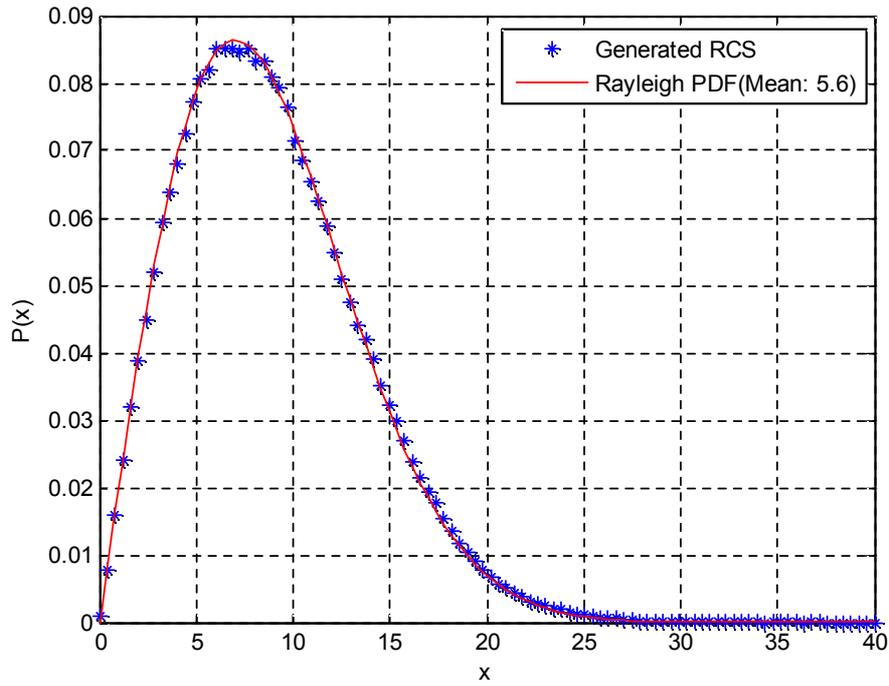


Fig. 16. 생성된 RCS의 확률밀도함수

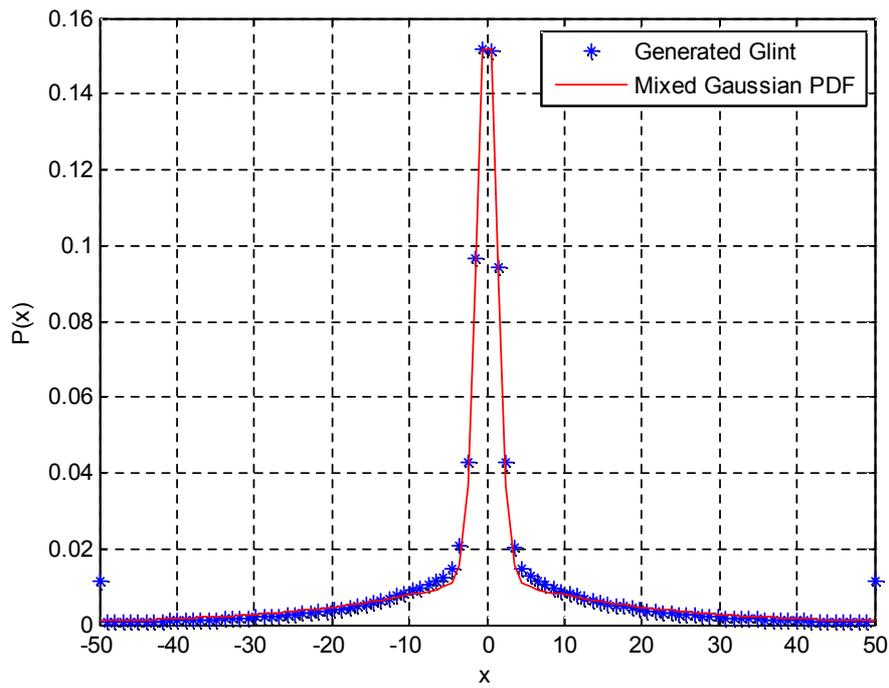


Fig. 17. 생성된 글린트의 확률밀도함수

Fig. 12와 13은 본 논문에서 제시된 구조인 Fig. 9을 기반으로 생성된 RCS와 글린트의 형태를 나타낸다. 이 때 RCS의 크기는 고히 레이더에서 측정된 L-경로를 지나는 KSLV-II에 대한 모노스태틱(monostatic) RCS의 평균값인 5.6dBm을 이용하였다[7]. 글린트는 위성 발사체를 간략화된 구조인 Table 1에서 우주발사체의 높이인 47.5m를 사용하여 직사각형으로 모델링하였다[13].

Fig. 14와 15는 RCS와 글린트의 자기상관을 나타낸다. Fig. 14에서 보여주고 있는 RCS의 자기상관은 레일레이 함수의 평균 때문에 위로 drift된 형태를 나타낸다. Fig. 15에서 보여주고 있는 글린트의 자기상관은 라플라시안 분포와 가우시안 분포의 혼합 과정에서 랜덤적인 영향으로 인하여 델타 함수 형태가 나타난다. 결과적으로, 위에서 보여주고 있는 자기상관을 주파수 영역으로 푸리에 변환하면, 각각 식 (3-10)과 (3-12)에 주어진 결과와 동일하게 된다.

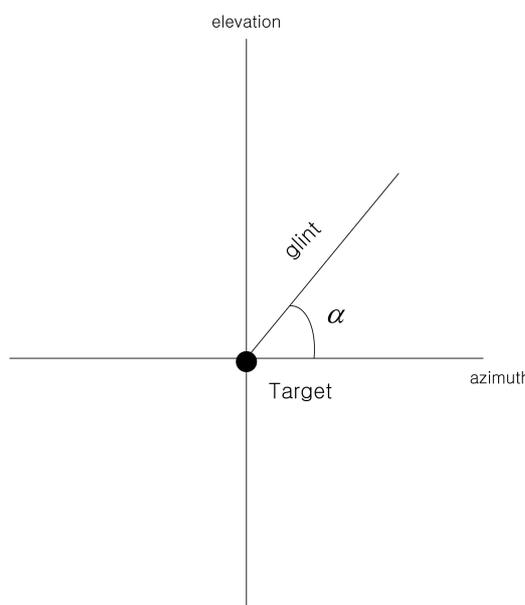


Fig. 18. 선형 글린트를 방위각과 고도각으로 생성하는 방법

Fig. 16과 17은 RCS와 글린트의 확률밀도함수를 나타낸다. RCS는 산란체가 고른 Swelling II모델인 레일레이 분포를 사용하였다. KSLV-II의 평균값 5.6dBsm을 사용하였기 때문에 평균이 5.6인 레일레이 분포가 나타난다. 글린

트는 47.5m인 우주발사체를 직사각형으로 모델링하였으며 σ_{rms} 는 9.5m로 두었다. 라플라시안 분산이 가우시안 분산보다 커야하므로 라플라시안 분산을 가우시안 분산의 100배로 두었다[5]. Fig. 15에서 혼합 가우시안의 라플라시안 분산은 178.7, 가우시안 분산은 1.787이다. 하지만 이렇게 생성된 글린트는 선형 글린트로 방위각과 고도각에 상관없이 생성된 글린트이다. 이 글린트를 방위각과 고도각에 적용하기 위해서 생성된 선형 글린트를 $0 \sim 2\pi$ 사이의 균일 분포로 생성된 각으로 회전 시켰다. Fig. 18는 선형 글린트를 방위각과 고도각으로 표현하는 방법을 보여준다. 이때, α 는 $0 \sim 2\pi$ 사이의 균일 분포이다.

제 4 장 경로 모델링

4.1 경로 모델링



Fig. 19. KSLV- I 발사 시퀀스

Table 2. KSLV- I 의 시간에 따른 위치

이벤트	비행시간(s)	상거리(km)	고도(km)
이륙	0	0.1	0
최대 추력 도달	0.2	0.1	0
음속돌파	54	7.2	0.8
페어링 분리	215	177	245
1단 엔진 정지 명령	229	193	303
1, 2단 분리	232	196	316
	395	303	1052
2단 점화	453	304	1390
위성 분리	540	302	2054

발사체 경로는 KSLV- I 의 경로를 모델링 하였다[16]. 레이더는 제주추적소의 위치를 가정 하였고, 발사체의 발사 방향은 적도와 평행되게 발사된다고 가정하였다.

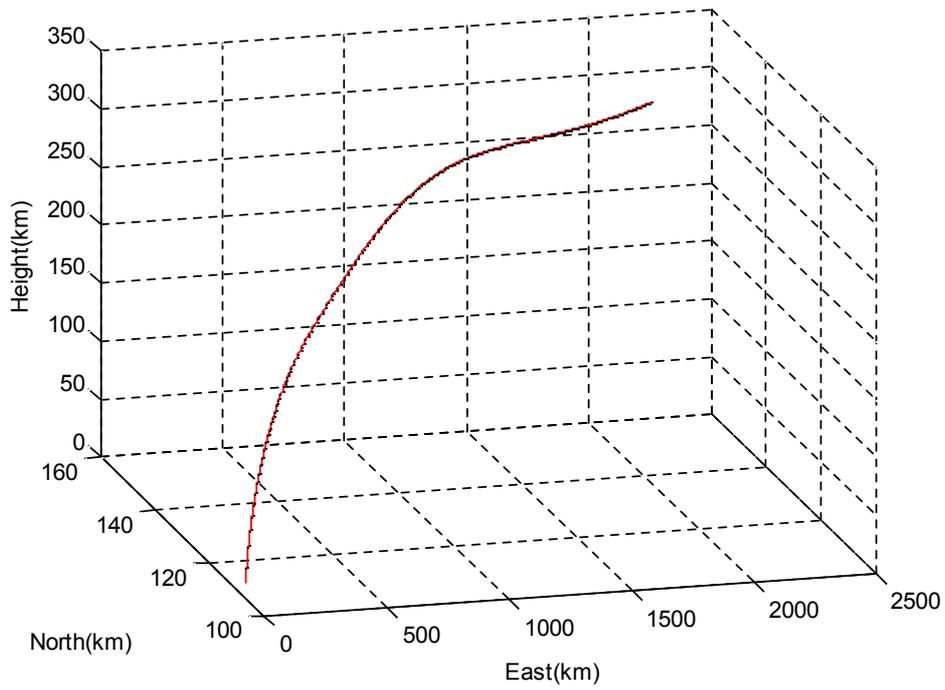


Fig. 20. 전체 경로 변화

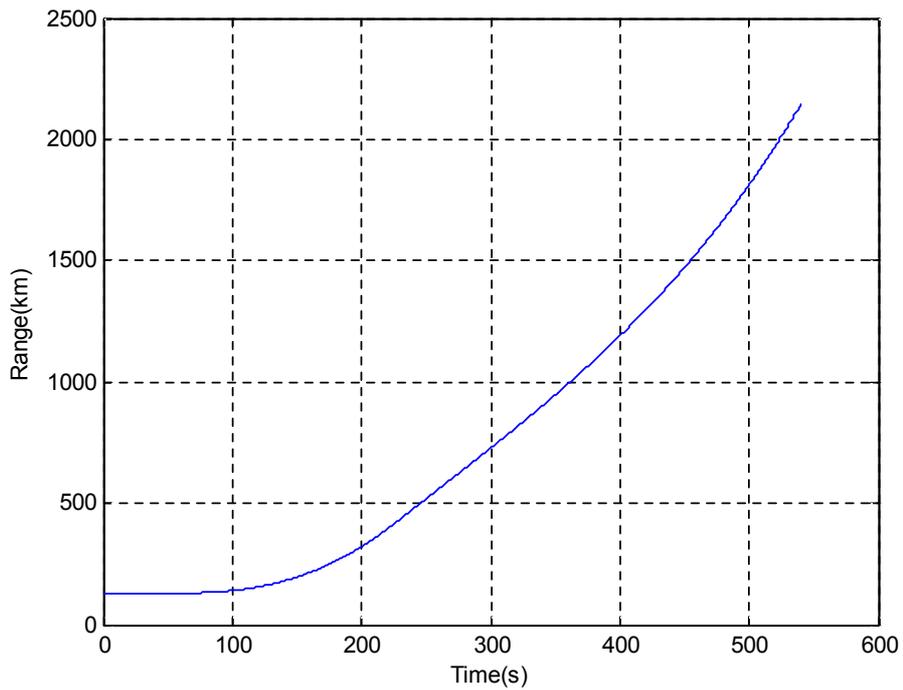


Fig. 21. Range 변화

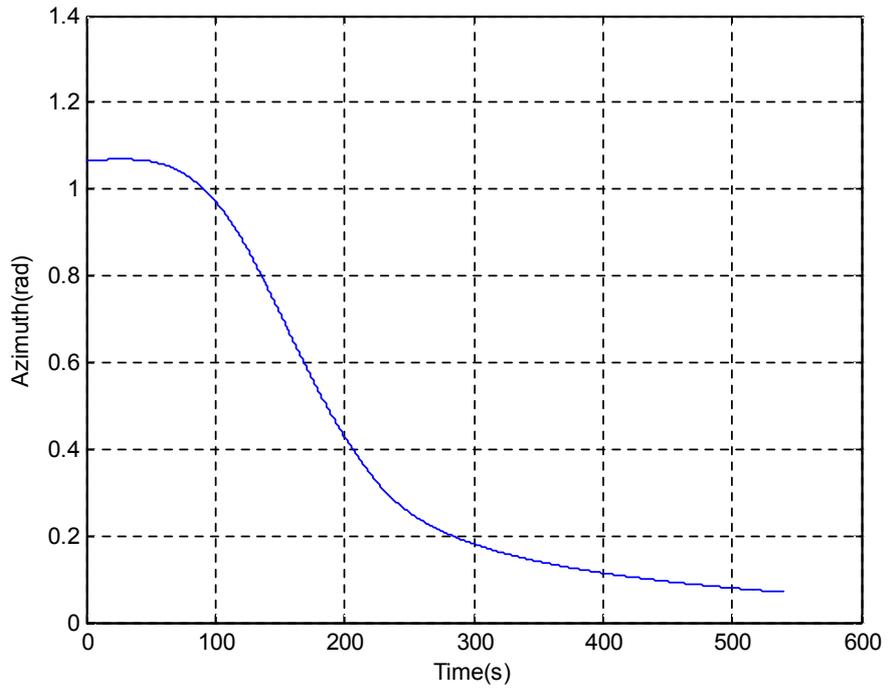


Fig. 22. Azimuth 변화

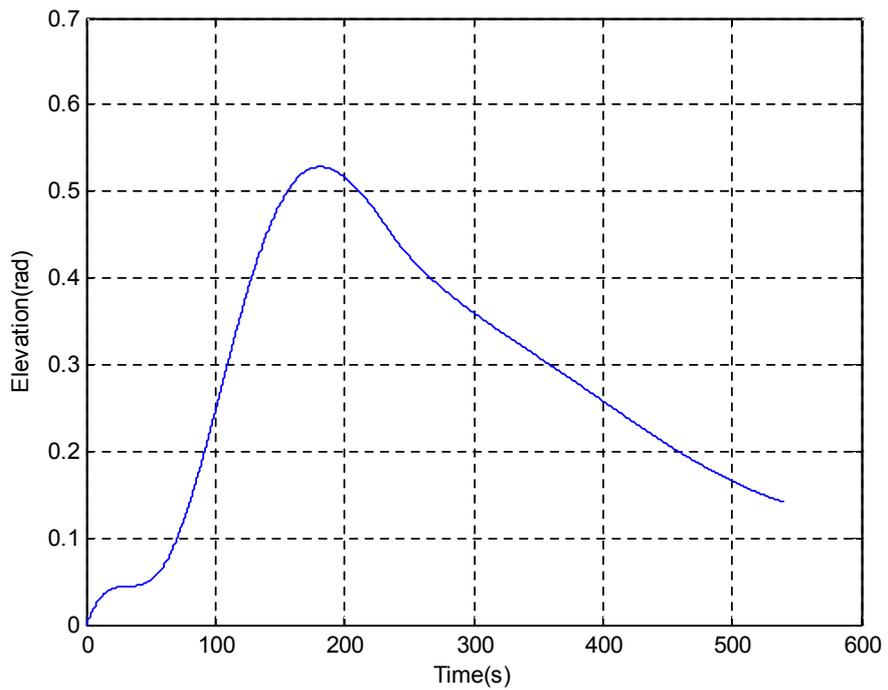


Fig. 23. Elevation 변화

4.2 발사체 경로에 잡음 적용

열잡음의 SNR은 레이더 수식에 의해서 다음과 같이 계산될 수 있다[3].

$$(SNR)_o = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F R^4} \quad (4.1)$$

여기서 P_t 는 레이더의 최대 송신 전력으로 500kW, G 는 안테나 이득으로 41dB, λ 는 레이더 파장으로 $c/500\text{Hz}$, c 는 빛의 속도, σ 는 물체의 RCS, k 는 볼츠만 상수로서 $1.38 \times 10^{-23} \text{joule/degree Kelvin}$, T_e 는 Kelvin 온도로서 290K, B 는 수신기 대역폭으로 8MHz, F 는 noise figure로 12dB, R 은 레이더와 목표 사이의 거리이다. 위에 나온 수치들은 AN/FPS-16 레이더 특징을 사용 하였다 [10].

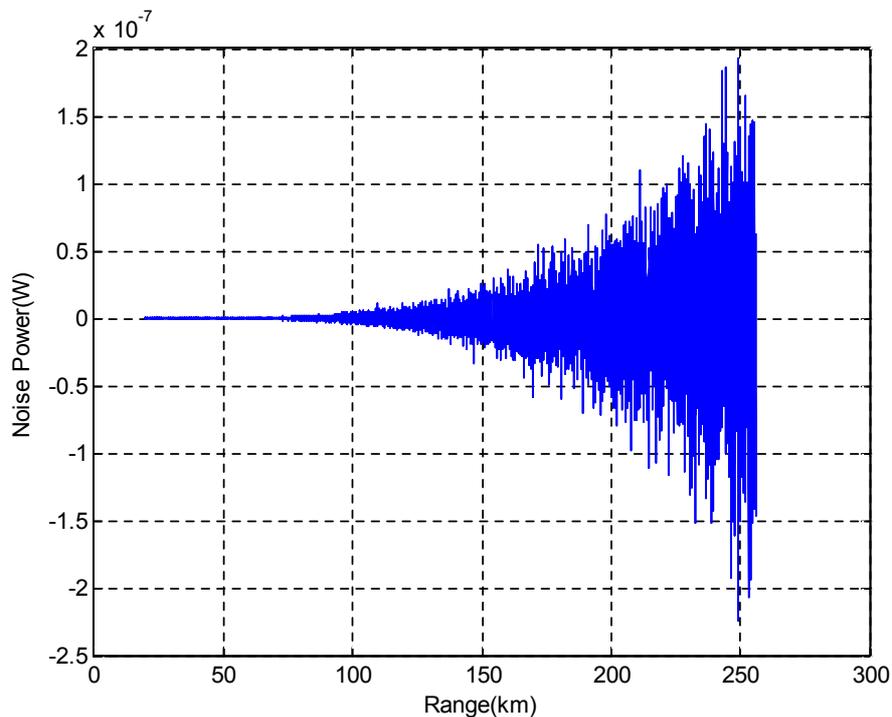


Fig. 24. 거리에 따른 열잡음

Fig. 24는 식(4.1)에 따라 생성된 열잡음의 형태이다. AN/FPS-16의 일반적인 최대 탐지 거리인 274km를 참고하여 약 250km까지만 모델링 하였다 [9].

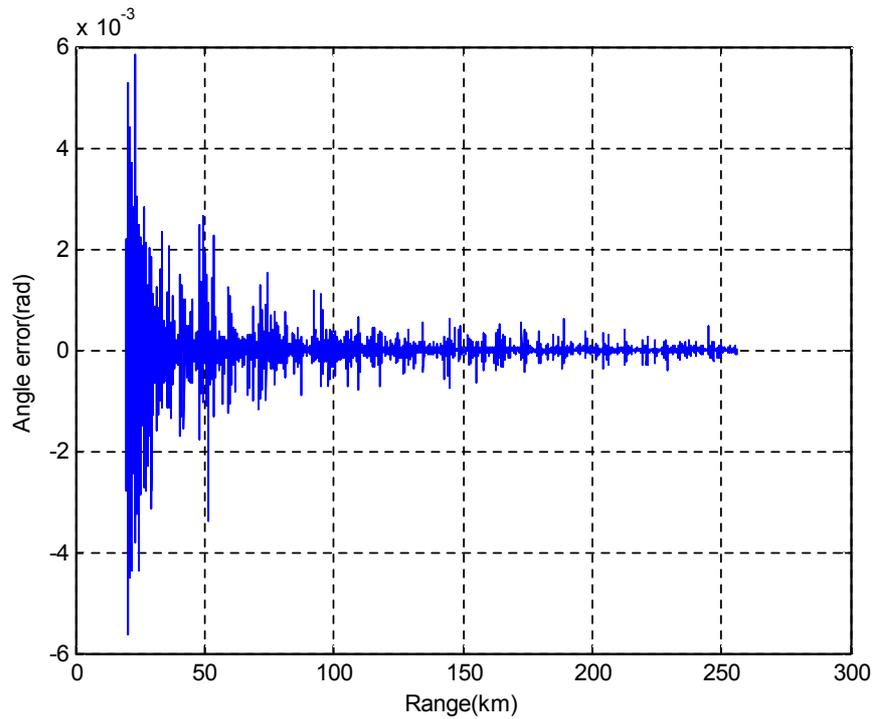


Fig. 25. 생성된 각 오류

Fig. 25는 방위각과 고도각에 적용될 글린트와 열잡음이 고려된 오류이다. 이 오류는 3장에서 생성한 글린트와 RCS를 2장에서 고려한 모노펄스 레이더에 적용하여 얻을 수 있다. 이러한 형태의 오류를 고도각과 방위각에 적용한 경로는 아래의 Fig. 26과 Fig. 27과 같다.

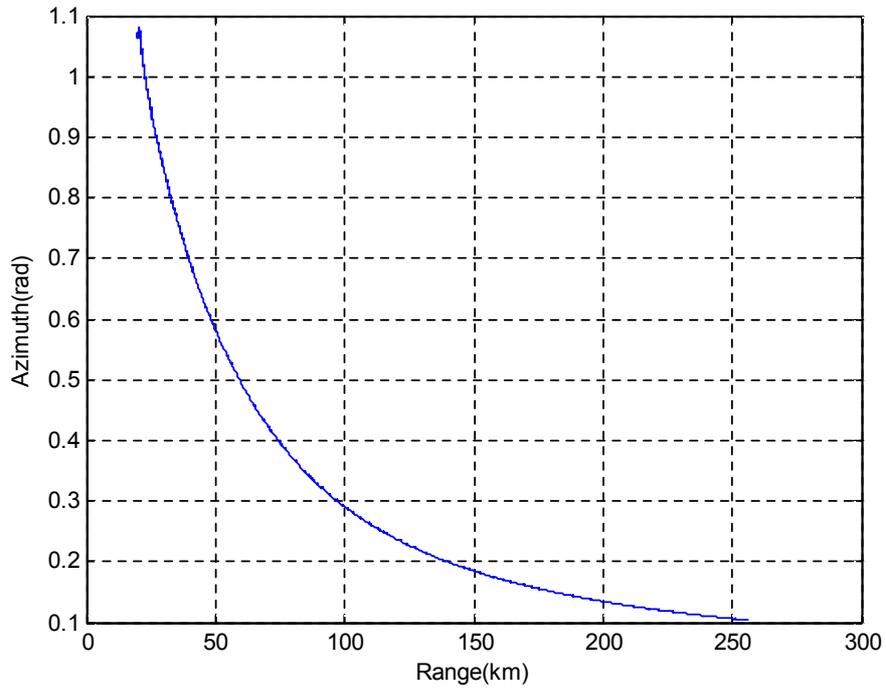


Fig. 26. 클린트와 열잡음이 적용된 방위각

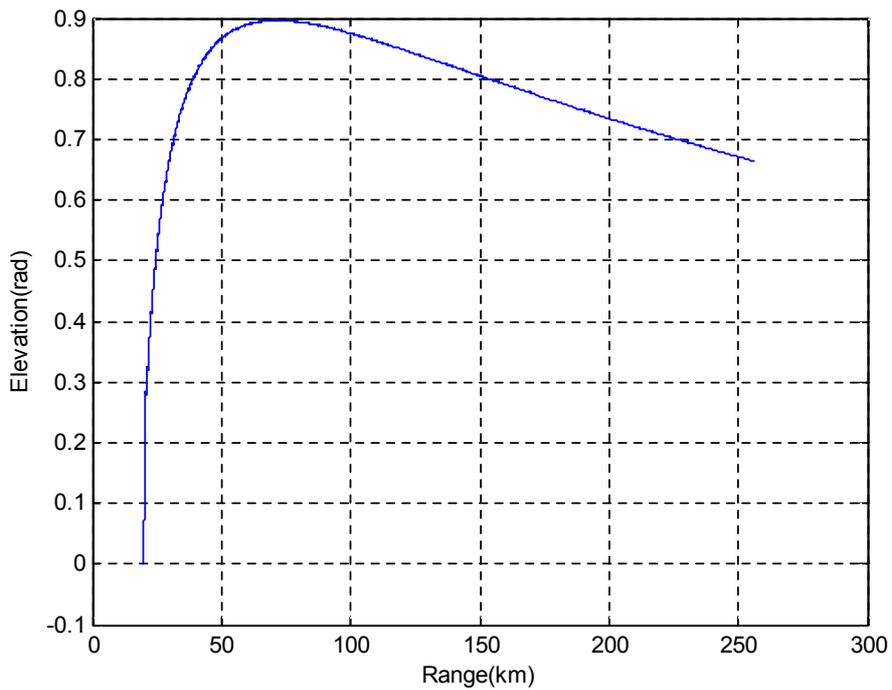


Fig. 27. 클린트와 열잡음이 적용된 고도각

제 5 장 칼만 필터

5.1 확장 칼만 필터

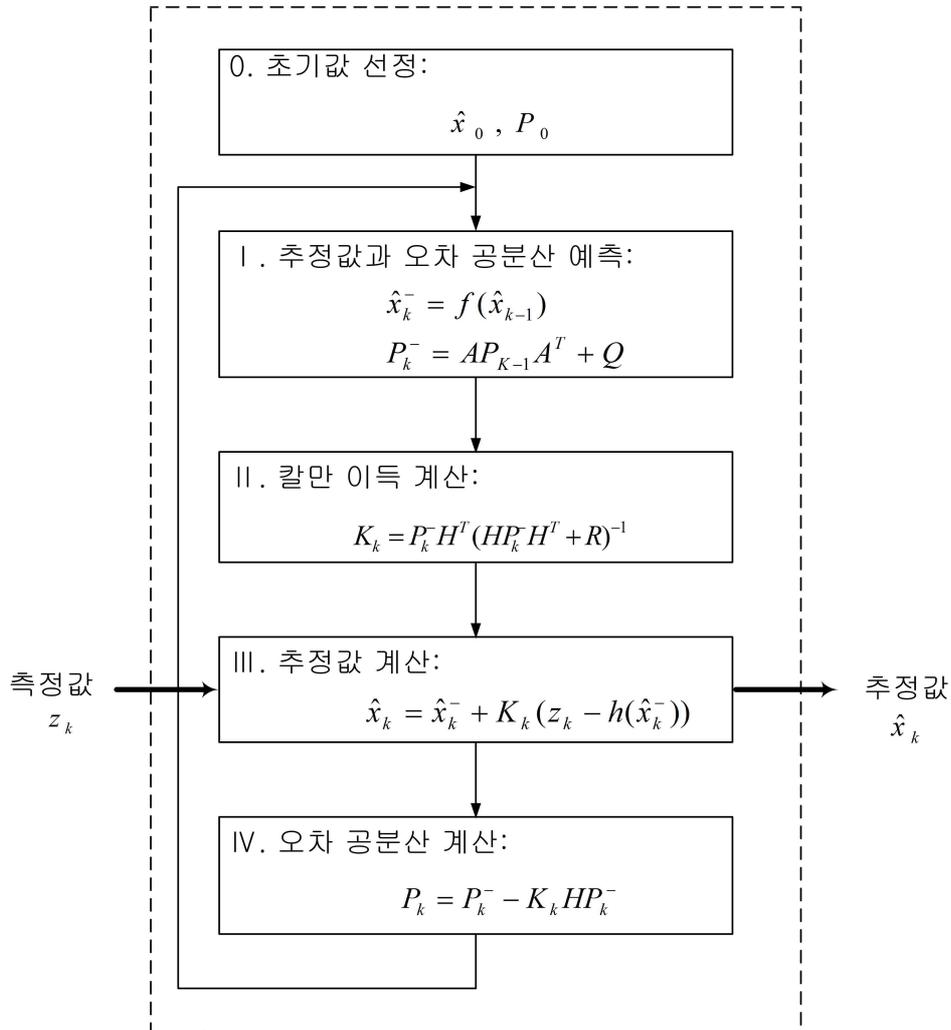


Fig. 28. 확장 칼만 필터 알고리즘

일반적으로 상태 추정을 위해서 칼만 필터를 사용한다. 칼만 필터는 예측과 추정과정을 번갈아 가며 계산하는데 그 알고리즘은 Fig. 28과 같다[17].

기본적으로 칼만 필터는 추정값과 오차 공분산의 초기값이 필요하다. 그 후 추정값과 오차 공분산을 다음과 같이 예측하게 된다.

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} \quad (5.1)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (5.2)$$

여기서 A는 시스템 모델이고, Q는 시스템 잡음의 공분산을 의미한다. 예측 과정 후에는 다음 같이 칼만 이득을 계산한다.

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5.3)$$

여기서 H는 측정 모델이고, R은 측정 잡음의 공분산이다. 추정값과 오차 공분산은 다음과 같이 계산하게 된다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (5.4)$$

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (5.5)$$

본 논문에서 사용된 시스템 모델과 측정 모델은 다음과 같은 행렬을 사용하였다[12]. 시스템 모델은 직각 좌표계에서 거리와 속도에 관한 행렬이고, 측정 모델은 구좌표계와 직각좌표계 사이의 관계식이다.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

$$H = \begin{pmatrix} \frac{x_k}{r_k} & 0 & \frac{y_k}{r_k} & 0 & \frac{z_k}{r_k} & 0 \\ \frac{-y_k}{x_k^2 + y_k^2} & 0 & \frac{-x_k}{x_k^2 + y_k^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-x_k z_k}{r_k^2 \sqrt{x_k^2 + y_k^2}} & 0 & \frac{-y_k z_k}{r_k^2 \sqrt{x_k^2 + y_k^2}} & 0 & \frac{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}{r_k^2} & 0 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

5.2 적응형 칼만 필터

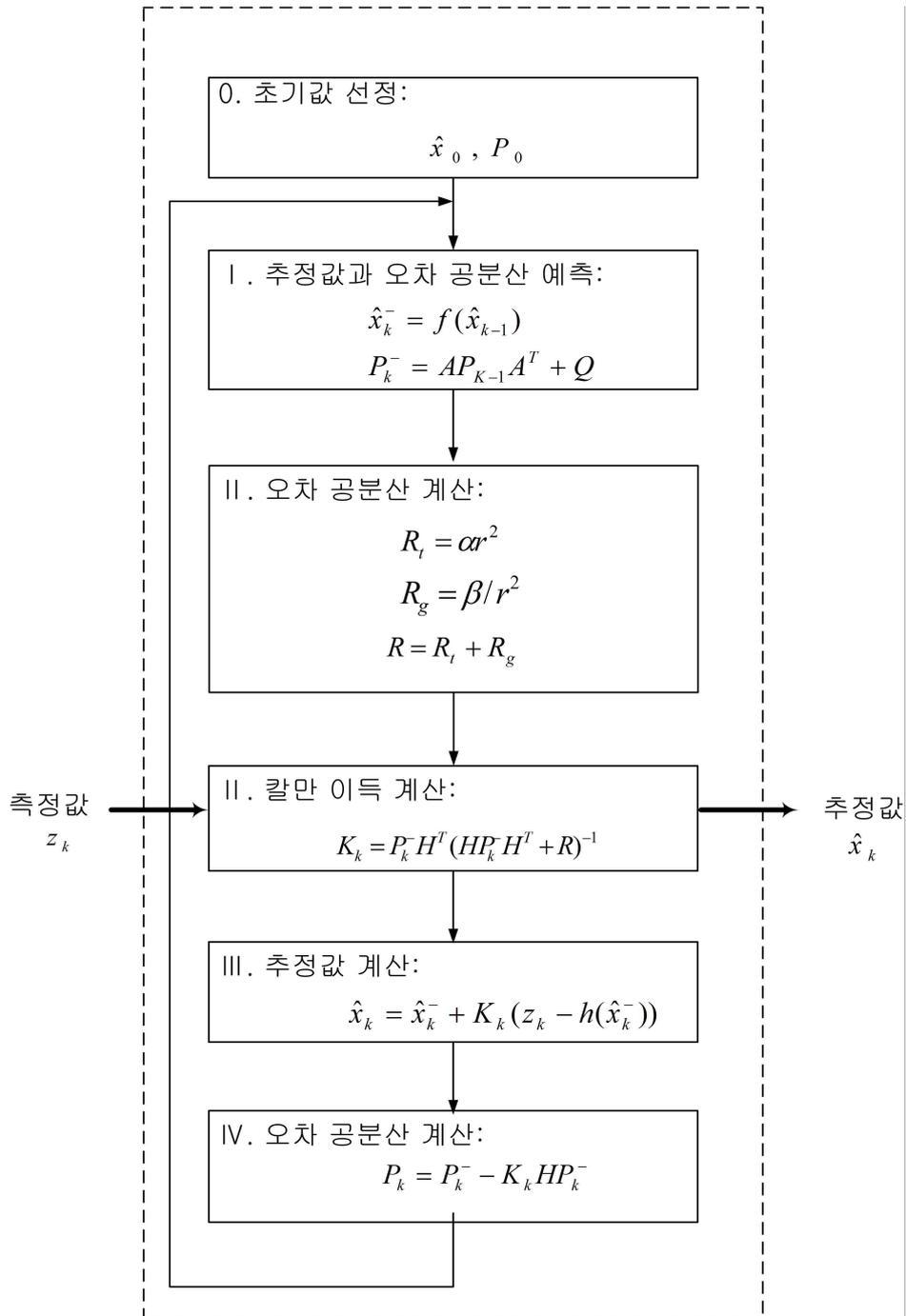


Fig. 29. 적응형 칼만 필터 알고리즘

일반적으로 확장 칼만 필터의 측정 잡음의 공분산은 고정되어 있다. 하지만 추적 레이더에 있어서 잡음은 거리에 따라서 그 크기가 변하게 된다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 거리에 따라 측정 잡음 공분산이 변하는 적응형 칼만 필터를 제시한다. Fig. 29는 본 논문에서 제시하고자 하는 적응형 칼만 필터의 알고리즘이다. 적응형 칼만 필터 알고리즘은 기본적인 확장 칼만 필터 알고리즘에 오차 공분산을 계산 하는 과정이 추가 되었다. 오차 공분산 계산 과정에서 R_t 와 R_y 는 각각 열잡음과 글린트의 오차 공분산을 의미한다. α 는 열잡음, β 는 글린트의 기본 오차공분산을 의미한다. 단, 본 논문에서 적응형 칼만 필터의 성능은 고도각과, 방위각에서의 성능만을 판단하려 하기 때문에 거리는 정확한 추적을 하고 있다고 가정 한다. Fig. 30은 2500개의 각 오류의 표준편차이다. Fig. 31은 물체 추적시 시간에 따른 잡음 공분산의 변화를 나타낸다. 오차 공분산은 실험적으로 표준 편차의 약 16배의 값을 사용하였다. 확장 칼만 필터의 잡음 공분산은 적응형 칼만 필터의 잡음 공분산의 평균값을 사용하였다.

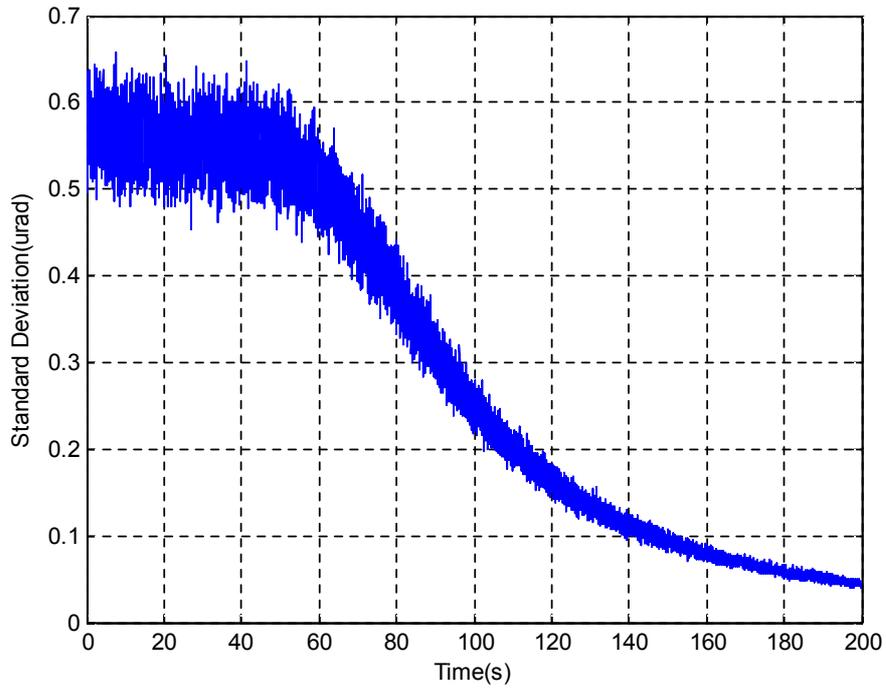


Fig. 30. 각 오류의 표준 편차

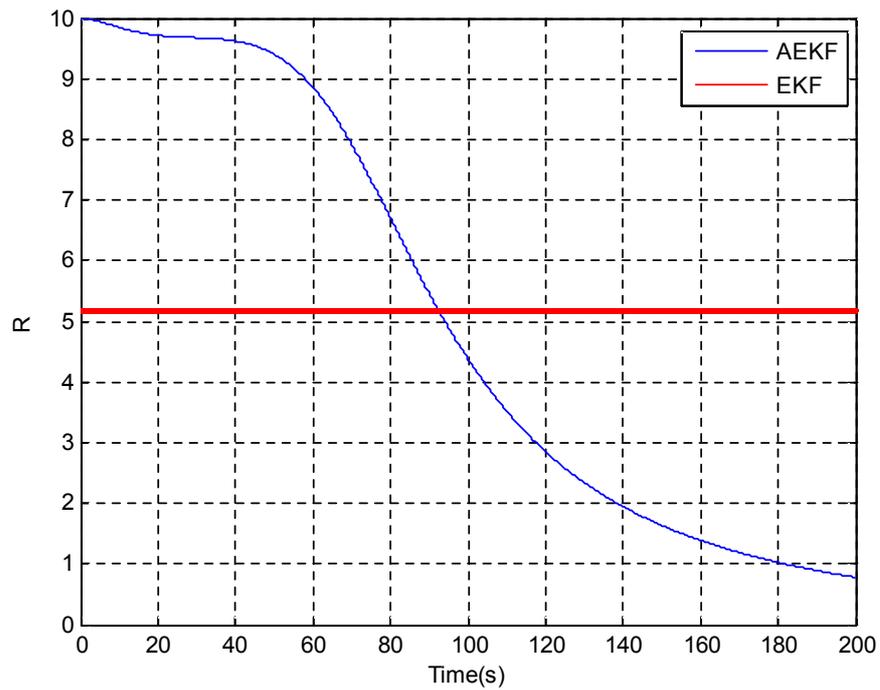


Fig. 31. 확장 칼만 필터와 적응형 칼만 필터의 공분산

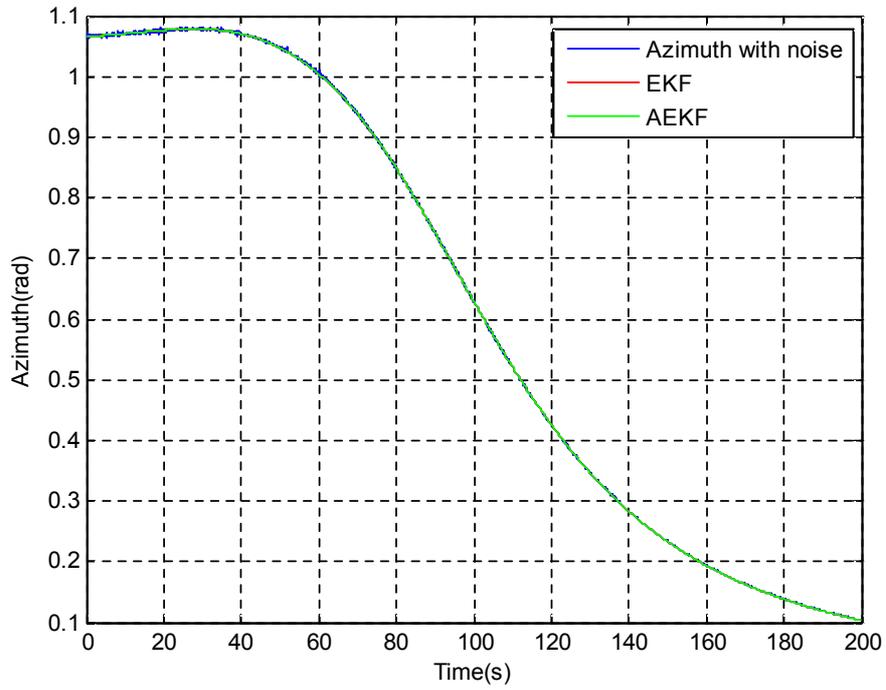


Fig. 32. 방위각에서 칼만 필터 결과

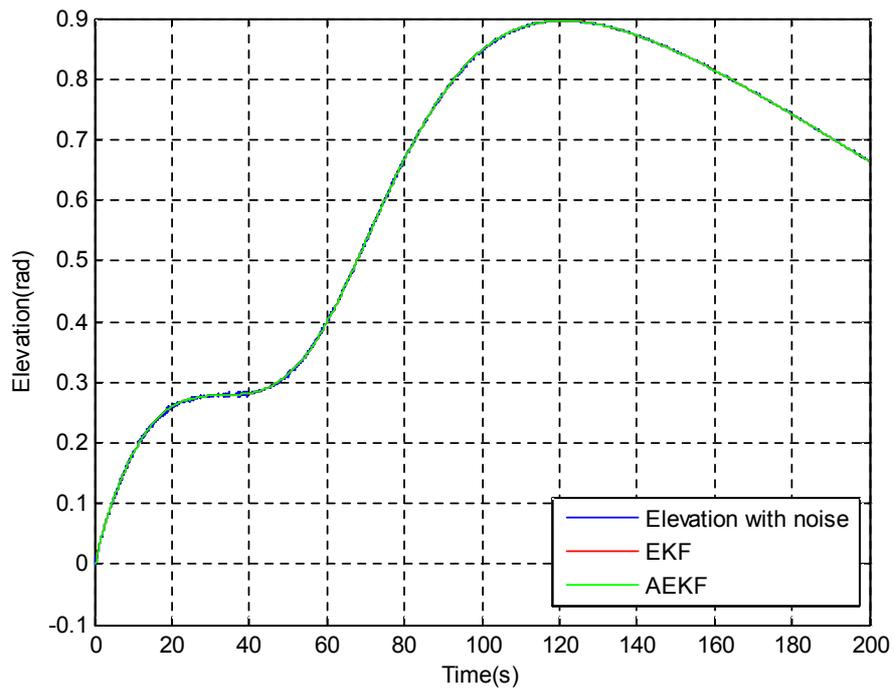


Fig. 33. 고도각에서 칼만 필터 결과

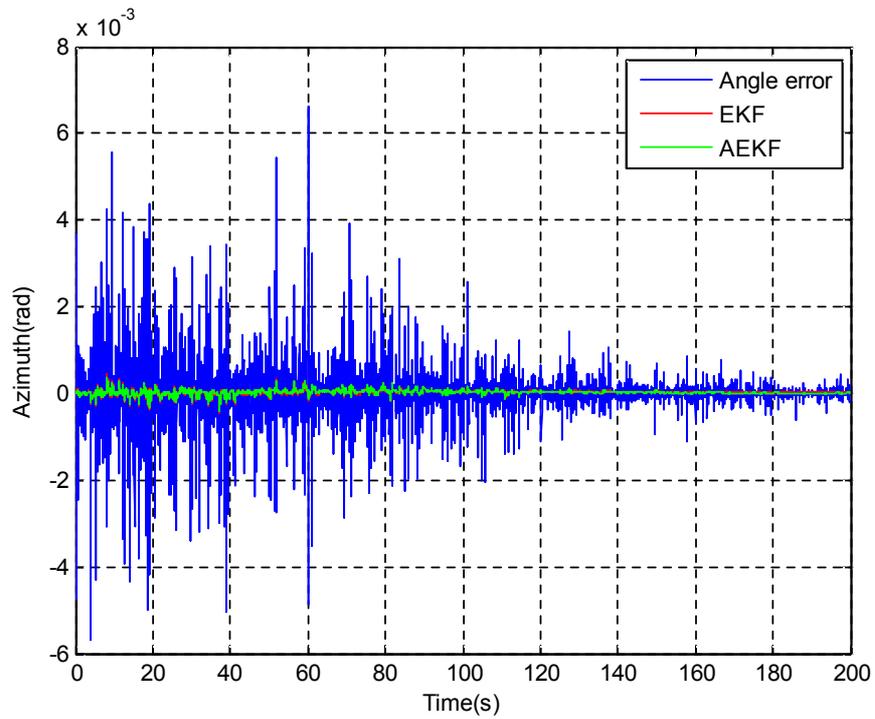


Fig. 34. 방위각 오류에서 칼만 필터 결과

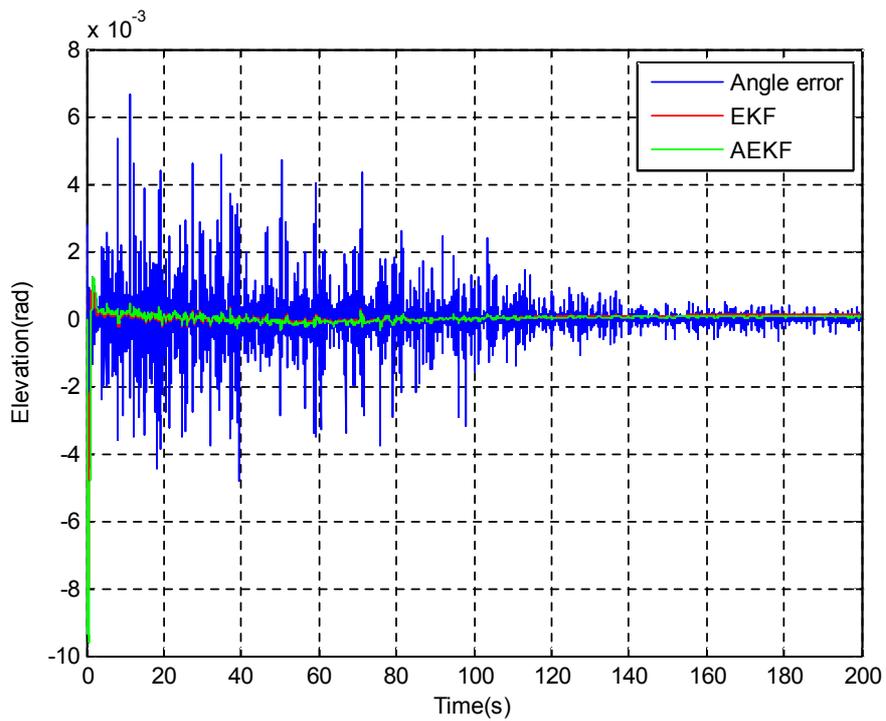


Fig. 35. 고도각 오류에서 칼만 필터 결과

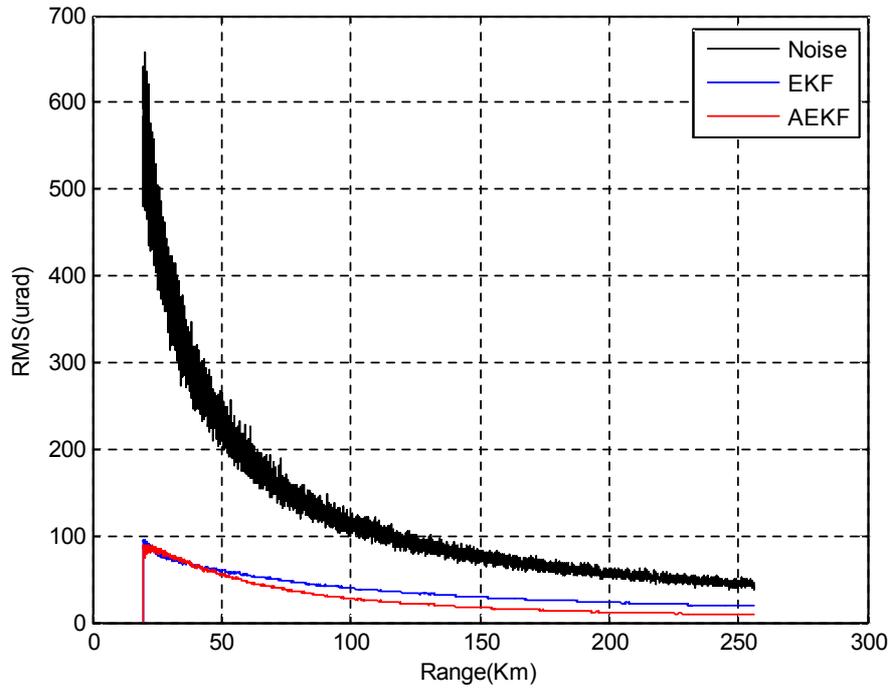


Fig. 36. 방위각 오류에서에서 칼만 필터 결과의 RMS

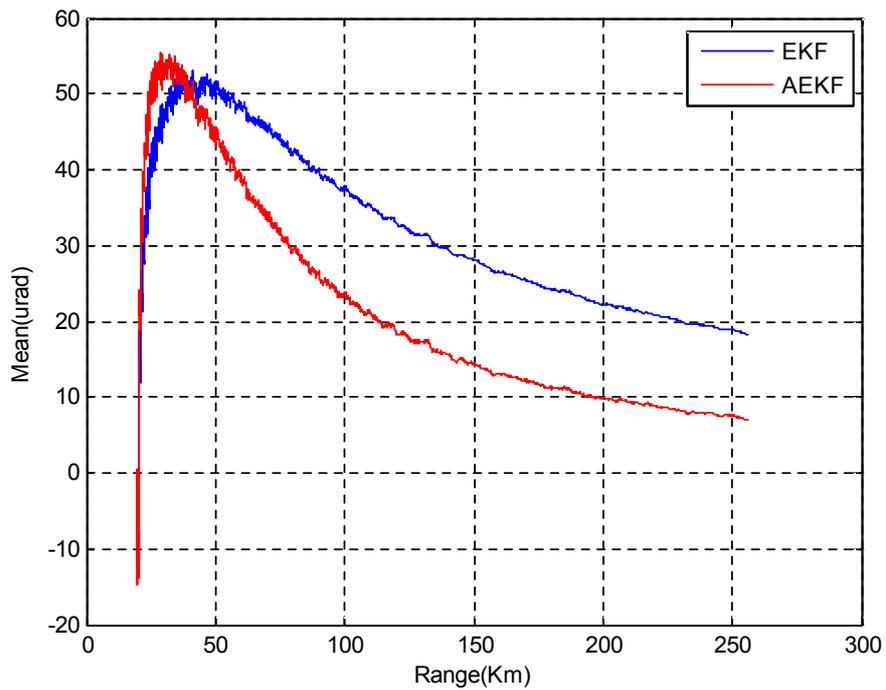


Fig. 37. 방위각 오류에서에서 칼만 필터 결과의 평균

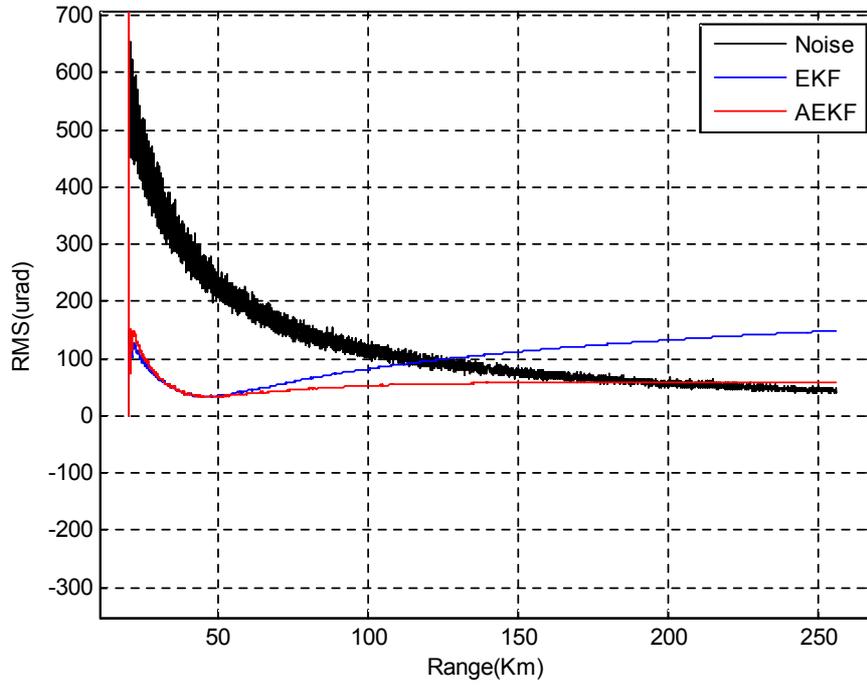


Fig. 38. 고도각 오류에서에서 칼만 필터 결과의 RMS

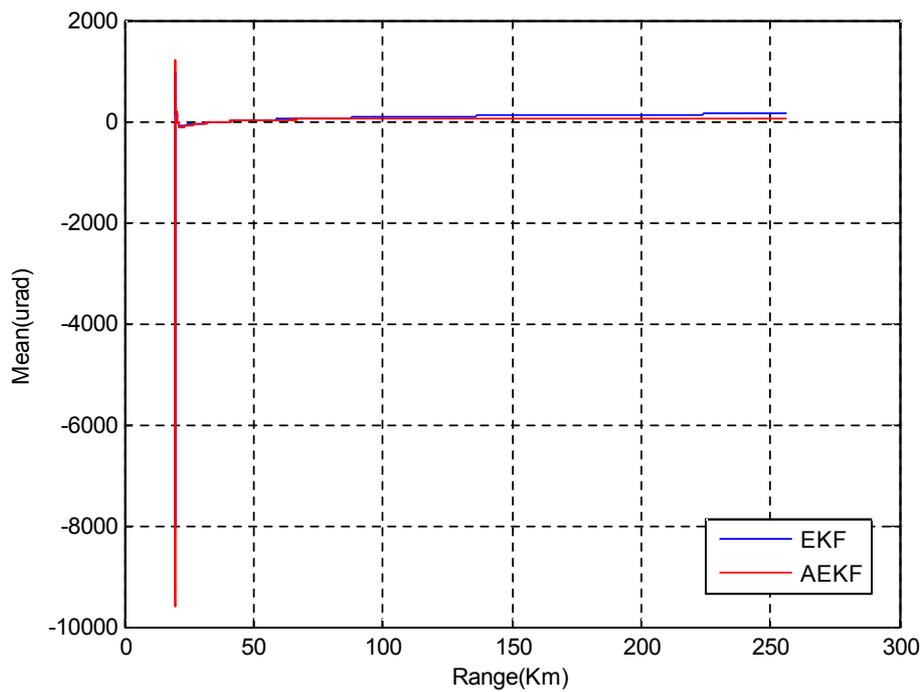


Fig. 39. 고도각 오류에서에서 칼만 필터 결과의 평균

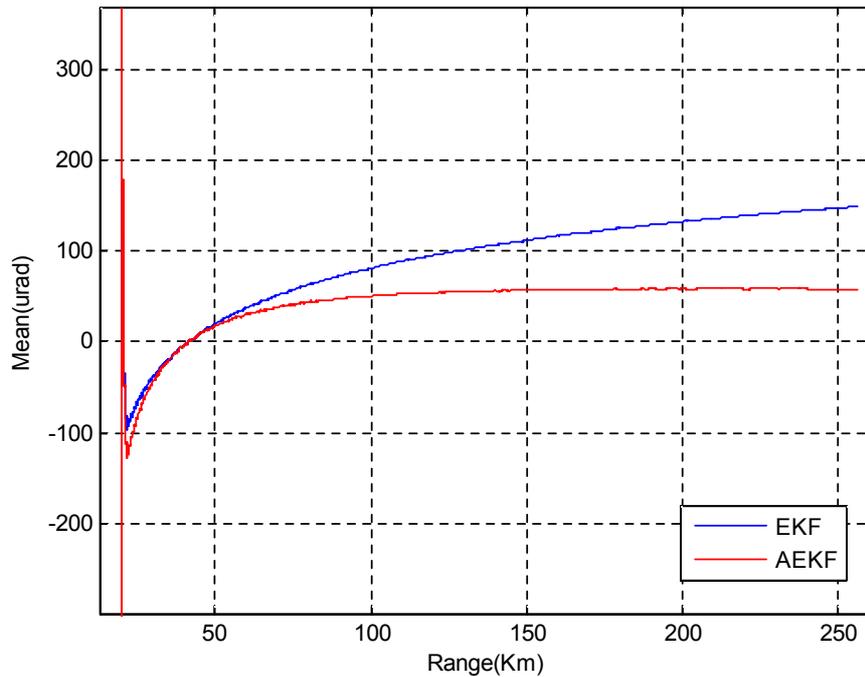


Fig. 40. 고도각 오류에서에서 칼만 필터 결과의 평균 부분 확대

Fig. 32, 33은 고도각과 방위각에서 경로가 포함된 칼만 필터 결과이고, Fig. 34, 35는 Fig. 30, 31에서 경로를 제외한 오류만을 나타낸 것이다. Fig. 36 ~ 39는 Fig. 32, 33의 결과를 2500번 반복하여 생성된 RMS와 평균을 거리에 대하여 표시한 것이고, Fig. 40은 Fig. 39의 결과를 부분적으로 확대한 것이다. 제시한 필터는 방위각에서 확장 칼만 필터에 비하여 RMS가 더 낮은 것을 확인 할 수 있고, 발사 초기에는 제시된 필터의 평균값이 더 높으나, 거리가 멀어질수록 확장 칼만 필터 결과에 비하여 낮아지게 된다. 고도각에서는 발사 초기에 급격한 변화 때문에 제시한 필터의 RMS가 더 높았으나, 발사 후기에는 제시한 필터가 확장 칼만 필터에 비하여 RMS가 더 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 확장 칼만 필터는 발사 후기에 평균값이 커진 것으로 보아 drift가 더 심하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Table 3~6은 Fig. 34, 35의 결과에 대한 RMS와 평균을 전 구간 및 시간에 따라 5 구간으로 나누어서 표시한 것이다. Table에서도 제시한 필터는 방위

각에서 확장 칼만 필터에 비하여 RMS가 더 낮은 것을 확인 할 수 있고, 고도각에서는 발사 초기에 급격한 변화 때문에 제시한 필터의 RMS가 더 높으나 확장 칼만 필터는 발사 후기에 평균값이 커진 것으로 보아 drift가 더 심하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Table 3. 방위각 오류에서 칼만 필터 결과의 RMS

단위 : μrad

구간	0~200	0~40	40~80	80~120	120~160	160~200
Noise	351.01	556.86	470.17	256.00	129.77	56.89
EKF	59.91	75.53	80.19	60.10	40.56	23.54
AEKF	55.59	69.18	79.69	57.35	29.66	12.10

Table 4. 고도각 오류에서 칼만 필터 결과의 RMS

단위 : μrad

구간	0~200	0~40	40~80	80~120	120~160	160~200
Noise	353.07	560.91	470.70	261.64	126.60	55.98
EKF	400.48	876.13	90.44	44.29	85.53	129.84
AEKF	509.35	1130.5	105.50	42.86	53.20	58.01

Table 5. 방위각 오류에서 칼만 필터 결과의 평균

단위 : μrad

구간	0~200	0~40	40~80	80~120	120~160	160~200
EKF	27.49	-2.57	31.07	48.56	37.57	22.85
AEKF	23.52	-1.43	39.89	54.03	23.91	10.20

Table 6. 고도각 오류에서 칼만 필터 결과의 평균

단위 : μrad

구간	0~200	0~40	40~80	80~120	120~160	160~200
EKF	24.52	-28.19	-67.84	5.87	83.53	129.22
AEKF	-4.41	-46.02	-87.37	2.18	51.54	57.63

제 6 장 결론

추적 레이더에서 각 추적은 매우 중요한 요소이다. 각 오류가 커질수록 목표물과 레이더 사이의 거리에 비례하여 추적 위치와 목표물 사이의 오차는 더 커지기 때문에 각 오류는 정확한 각 추적을 방해한다.

이러한 오류를 제거하기 위해서 일반적으로 칼만 필터를 사용하게 된다. 기존의 확장 칼만 필터는 잡음 공분산이 고정되어 있기 때문에 이론상으로 잡음의 분산이 변하게 된다면, 필터 성능이 떨어질 수 있다. 추적레이더에서는 거리에 따라 잡음의 크기가 변하기 때문에 본 논문에서는 거리에 따라 잡음 공분산이 변하는 칼만 필터를 제시하였다.

추적레이더에서 칼만 필터의 성능을 검증하기 위해서 KSLV-I의 경로로 목표가 움직인다고 가정하여 경로를 모델링 하였다. 또한 수신된 신호에 영향을 줄 수 있는 요소인 글린트, RCS 및 열잡음을 고려하였다. 이러한 요소들은 4혼 모노 펄스 레이더에서 수신되는 신호로 고려하였다. RCS는 고힘 레이더에서 측정된 L-경로를 지나는 KSLV-II에 대한 모노스태틱(monostatic) RCS의 평균값인 5.6dBm을 이용하였고, 글린트는 위성 발사체를 간략화된 구조인 직사각형으로 모델링하였을 때의 평균값인 47.5m를 사용하였다. 열잡음의 크기는 AN/FPS-16의 noise figure인 12dB를 고려하여 모델링 하였다.

거리에 따라 공분산이 변하는 칼만 필터는 공분산이 고정된 확장 칼만 필터에 비해 방위각에서 RMS가 더 낮은 것을 확인 할 수 있었지만, 고도각에서는 발사 초기에 급격한 변화 때문에 제시한 필터의 RMS가 더 높으나, 발사 후기에는 제시한 필터가 확장 칼만 필터에 비하여 RMS가 더 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 확장 칼만 필터는 발사 후기에 평균값이 커진 것으로 보아 drift가 더 심하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 제시된 필터가 확장 칼만 필터에 비하여 각 추적 성능을 향상시킨 것을 확인 할 수 있다.

참고문헌

- [1] 신한섭, 최지환, 김대오, 김태형, “추적레이다의 표준 추적을 위한 추적 알고리즘 기술동향”, 항공우주산업기술동향 4권 1호, pp.83~91, 2006
- [2] Richald H. Delano, “A Theory of Target Glint or Angular Scintillation in Radar Tracking,” Proceedings of the IRE, Vol 41, Issue 12, pp.1778-1784, 1953.
- [3] Bassem R. Mahafza, “Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB,” CHAPMAN & HALL/CRC, pp.1-116, 2000.
- [4] Borden and Mumford, “A Statistical Glint/Radar Cross Section Target Model”, Aerospace and Electronic System, IEEE Transaction on, Vol AES-19, Issue 5, pp. 781-785, Sep. 1983.
- [5] Jain A. K., “Generating Statistically Correlated Glint And RCS For Empirically Based RF Target Models”, Southeastcon '81. Conference Proceedings, pp. 873-875, April 1981.
- [6] G. A. Hewer, R. D. Martin and Judith Zeh, “Robust Preprocessing for Kalman Filtering of Glint noise”, Aerospace and Electronic System, IEEE Transaction on, Vol AES-23, Issue 1, pp. 120-128, Jan. 1987.
- [7] 이현승, 이은규, 임정택, 최지환, 김철영, “한국형 발사체의 스킨 추적 향상을 위한 RCS 분석”, KIESS, Vol 19, No. 4, pp.566-572, 2015
- [8] Bilik and Tabrikian, “Maneuvering Target Tracking in the Presence of Glint using the Nonlinear Gaussian Mixture Kalman Filter”, Aerospace and Electronic System, IEEE Transaction on, Vol 46, Issue 1, pp. 246-262, Jan. 2010.
- [9] Samuel M. Sherman and David K. Barton, “Monopulse principles and Techniques”, Artech House, Dec. 1984.
- [10] David K. Barton, “Development of the AN/FPS-16

- Instrumentation Radar”, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol 26, Issue 4, pp. B1-B16, April 2011
- [11] James E. Lindsay, “Angular Glint and the Moving, Rotating, Complex Radar Target,” Aerospace and Electronic System, IEEE Transaction on, Vol AES-4, Issue 2, pp.164-173, 1968.
- [12] Weng_Rong Wu, “Target tracking with glint noise,” Aerospace and Electronic System, IEEE Transaction on, Vol 29, Issue 1, pp.174-185, 1993.
- [13] Merrill I. Skolnik, “Radar Handbook,” McGrawHill, pp.9.26-9.35, 2008.
- [14] G.S. Sandhu and A.V. Saylor, “A Real-Time Statistical Radar Target Model,” Aerospace and Electronic System, IEEE Transaction on, Vol AES-21, No. 4, pp.490-507, 1985.
- [15] Swerling, “Probability of Detection for Fluctuating targets,” Information Theory, IRE Transaction on, Vol 6, Issue 2, pp.269-308, 1960.
- [16] <http://www.kari.re.kr/sub0103020106>
- [17] 김성필, “MATLAB 활용 칼만필터의 이해”, 아진, pp. 39-208, 2010.