



# 공학석사 학위논문

# FMCW 레이더 시스템을 이용한 향상된 속도 벡터 추정 방법

Enhanced Velocity Vector Estimation Methods Using FMCW Radar System

2023년 2월

서울대학교 대학원

전기정보공학부

이 승 구

# FMCW 레이더 시스템을 이용한 향상된 속도 벡터 추정 방법

# 지도교수 김성철

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함 2022년 12월

> 서울대학교 대학원 전기정보공학부 이 승 구

- 이승구의 공학석사 학위논문을 인준함 2022년 12월
- 위 원 장 <u>김남수 (인)</u> 부위원장 <u>김성철 (인)</u> 위 원 <u>오정석 (인)</u>

# 초 록

차량의 주행 환경에서 운전자의 안전확보와 편의성을 증진하기 위해 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더의 활용이 증가하고 있다. 그러나, 레이더는 레이더가 표적을 바라보 는 방향에 투영된 속도 성분인 radial 속도 성분만 추정할 수 있으 며 결과적으로 표적이 횡방향으로 이동할 때 속도 추정 성능이 심 각하게 저하될 수 있다. 또한, FMCW 레이더의 속도추정 시 Doppler aliasing으로 인해 발생하는 Doppler ambiguity 문제도 해 결해야 표적의 정확한 속도를 추정할 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 본 연구에서는 분산된 다중 레이더 시스템과, 단일 레이더 시스템을 활용한 2가지 방안 을 제안한다. 분산된 여러 안테나 시스템에서는 각각의 레이더에서 Least Square 기법을 통하여 추정된 radial 속도들의 여러 조합을 정의하고 각 Least Square의 결과 중 오차가 최소가 되는 속도를 선택한다.

단일 레이더 시스템에서는 칼만필터(Kalman filter)를 활용하여 표적의 Doppler ambiguity 문제가 해결된 속도벡터를 구하는 방법 을 제시하였다. 제안한 방법을 검증하기 위해 선형 칼만필터 (Linear Kalman filter, LKF)와 확장형 칼만필터(Extended Kalman filter, EKF)과의 성능을 비교하였으며, Doppler ambiguity 를 해결하기 위해 칼만이득의 행렬식을 비교하여 표적의 실제 속 도 벡터를 추정한 방법이 가장 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

주요어 : Automotive radar, FMCW radar, Doppler ambiguity, velocity vector estimation

학 번 : 2021-22758

목 차

초 록	i
목 차	ii
표 목차	iii
그림 목차	iv
제 1 장 서 론	1
<b>제 2 장 배경 이론</b> 제 1 절 FMCW 레이더의 기본원리 제 2 절 Least Square 기법을 활용한 속도벡터 추정 제 3 절 Kalman filter를 활용한 속도벡터 추정	<b>3</b> 11 15
<b>제 3 장 제안 기법</b> ···································	<b>22</b> 22 25
제 4 장 시뮬레이션 및 결과 제 1 절 다중 레이더 시스템에서의 시뮬레이션 결과 제 2 절 단일 레이더 시스템에서의 시뮬레이션 결과	<b>29</b> 29 34
제 5 장 결론	39
참고문헌	41
Abstract	43

# 표 목 차

[표 3.1] 각 레이더의 후보 속도 경우의 수	···· 23
[표 3.2] Doppler ambiguity를 고려한 추정 속도 벡터의 모든 조합	· · · 24
[표 4.1] FMCW 레이더 파라미터	···· 29
[표 4.2] 모든 경우의 수 조합에서의 LS 오차	31

# 그림목차

[그림 1.1] 속도 벡터를 추정하기 위한 레이더 시스템 예시 … 2 [그림 2.1.1] FMCW 레이더의 구조 개념도 ……………… 4 [그림 2.1.2] Beat frequency와 Doppler frequency의 개념도 … 6 [그림 2.1.3] FMCW 레이더의 Doppler 모호성 ······· 7 [그림 2.1.4] 레이더의 속도 추정 시 radial 성분 속도 ………… 10 [그림 2.2.1] 여러개의 분산 배치된 레이더 시스템에서의 속도 추정 방법 [그림 2.2.2] 여러개의 분산 배치된 레이더 시스템에서 Doppler aliasing [그림 2.3.1] LKF의 추정과정 …………………………………………… 18 [그림 3.1.1] 다중레이더 시스템 제안 기법의 순서도 ………… 22 [그림 3.2.1] 단일레이더 시스템 제안 기법의 순서도 ………… 26 [그림 3.2.2] 가설 별 칼만이득  $K_k^T K_k$ 의 행렬식 변화 ………… 28 [그림 4.1.1] 다중 레이더 시스템의 시뮬레이션 환경 ..... -30 [그림 4.1.2] 레이더 개수 별 성능 비교 ………………… -33 [그림 4.2.1] 단일 레이더 시스템의 시뮬레이션 환경 ………… 34 [그림 4.2.3] EKF 추정 예시 ……………………………………………………………… - 37 [그림 4.2.4] LKF, EKF, Proposed method 성능 비교 ..... 38

## 제1장서 론

현대 사회에서 도심의 차량 주행 환경은 나날이 증가하는 차량의 수로 인해 복잡해지는 추세이며, 자율주행 등의 운전자의 편의성을 증가시키는 기술 또한 점점 더 복잡해지는 교통 환경에 맞춰 발전되어야 한다. 운전자의 편의를 제공하는 차량의 여러 시스템은 카메라, 라이다, 레이다 등 여러 종류의 센서를 활용하며, 그 중 FMCW 레이더는 비나 안개 등 기후에 영향이 적으며 표적의 위치. 속도 등을 동시에 탐지가 가능하여 널리 쓰이고 있다[1]. FMCW 레이더는 ACC(Adaptive Cruise Control), LCA(Lane Change Assist), FWC(Forward collision warning) 등과 같은 주행 보조 시스템에 활용되나, 이러한 시스템들은 주행 환경이 단순하고 차량 진행 방향이 일정한 고속도로 등의 환경으로 제한된다는 단점이 존재한다. 이는 하나 의 FMCW 레이더가 속도를 추정할 때 레이더가 바라보는 방향의 속도 성분만 추정할 수 있으며, 횡방향으로 움직이는 속도 성분에 대해서는 추정이 제한되기 때문이다. 주행환경이 복잡한 도심에서 이러한 자율 주 행이나 주행 보조 시스템을 적용하기 위해서는 표적의 횡방향 성분을 포 함한 속도, 즉 표적의 속도 벡터를 정확히 추정하는 것이 필수적이다. 이 러한 문제를 해결하기 위해 FMCW 레이더를 활용하여 속도 벡터를 추 정하는 여러 연구들이 진행되었으며[2]-[3], 기본적으로 표적의 속도 벡 터를 추정하기 위해서는 그림 1.1과 같이 다수의 분산 배치된 레이더의 신호, 혹은 시간에 따른 여러개의 신호가 필요하다.

또한, 표적의 정확한 속도 추정을 위해 FMCW 레이더의 Doppler aliasing으로 인해 발생하는 Doppler ambiguity를 해결해야 한다. FMCW 레이더에서는 여러개의 Chirp 신호의 주파수 위상 차이를 통해 표적의 속도를 측정하는데, 레이더에서 탐지할 수 있는 최대 속도보다 표적의 속도가 더 빠른 경우에 Doppler aliasing이 발생하기 때문에 레이 더에서 측정된 표적의 속도를 특정할 수 없는 문제인 Doppler ambiguity 를 해결하기 위한 여러 연구 또한 진행되었다[4]-[8]. 이러한 연구들에서 는 Doppler ambiguity를 해결하기 위해 여러 기법들이 소개되었는데 대 표적으로 Chinese remainder theorem(CRT), Hypothetical phase compensation(HPC)와 같은 기법들을 통해 Doppler ambiguity를 해결하 고 표적의 속도를 추정한다.

1



그림 1.1 속도 벡터를 추정하기 위한 레이더 시스템 예시

본 논문에서는 다중/단일 FMCW 레이더 시스템에서 표적의 정확한 속도 벡터 추정과 Doppler ambiguity 문제를 해결하는 방안을 제시한다. 먼저 분산 배치된 3개에서 최대 5개의 다중 레이더 시스템을 통해 각각 측정한 속도 성분의 Least Sqaure(LS) Method과 Doppler aliasing를 고 려한 여러 가설의 오차를 비교하여 표적의 실제 속도 벡터를 구하는 방 법을 제안한다. 또한, 단일 레이더 시스테에서는 선형 및 비선형 칼만필 터(Linear/Extended Kalman filter, LKF/EKF)를 활용하여 표적의 속도 벡터를 추정하는데, 성능이 우수하나 Doppler ambiguity 문제가 존재하 는 하는 비선형 칼만필터에서 Doppler ambiguity를 해결하는 방안을 제 시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 FMCW 레이더의 기 본 원리와 제안 기법에 활용되는 LS, 칼만필터의 개념에 대해 소개하고, 3장에서는 Doppler ambiguity를 해결하고 표적의 속도 벡터를 구하는 방법에 대해 설명한다. 다음으로 4장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제 안된 기법의 성능을 검증하며, 마지막으로 5장에서는 본 논문을 정리하 며 결론으로 마무리한다.

# 제 2 장 배경 이론

#### 제 1 절 FMCW 레이더의 기본원리

FMCW 레이더는 시간에 따라 주파수가 선형으로 증가하는 여러개의 chirp 신호를 활용하여 표적의 위치와 속도를 추정한다. 먼저 단일 점의 표적으로 가정하였을 때, 레이더 안테나로부터 방사되는 chirp 신호는 다 음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{tx}(t) = \exp\left\{j2\pi(f_c t + \frac{S}{2}t^2) + \phi_{tx}\right\}$$

$$(0 \le t \le T_c)$$
(1)

여기서  $f_c$ 는 반송파 주파수, B는 레이더에서 사용하는 주파수 대역, S는 시간에 따라 증가하는 주파수의 기울기,  $T_c$ 는 chirp 신호가 지속되 는 시간, φ는 신호의 위상 잔여 성분을 의미한다.

표적에서 반사된 수신 신호는 레이더에서 송신된 Chirp 신호와 동일 한 모양이며 지연된 시간인 7를 반영한 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{rx}(t) = S_{tx}(t-\tau) = \exp\left\{j2\pi(f_c(t-\tau) + \frac{S}{2}(t-\tau)^2) + \phi_{rx}\right\}$$
(2)  
(0 \le t \le T\_c)

아래 그림 2.1.1과 같이 송신 신호와 수신 신호는 mixer와 low pass filter를 통과하며 송신 신호와 수신 신호의 주파수 차이를 추정하게 되는데, 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x(t) = S_{rx}^* S_{tx} = \exp\left\{j2\pi \left(f_c t + S\tau t - \frac{S}{2}\tau^2\right)\right\}$$
(3)



그림 2.1.1 FMCW 레이더의 구조 개념도

이 때, 지연시간  $\tau$ 를 표적과 레이더의 거리 R와 빛의 속도 c로 나타 낸  $\tau = \frac{2R}{c}$ 를 대입하면, 위 식을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$x(t) \simeq \exp\left\{j2\pi(f_b t + \frac{2f_c R}{c})\right\}$$

$$(f_b = \frac{2BR}{T_c c})$$
(4)

이렇게 처리된 신호를 beat signal이라고 표현하며 beat frequency 인  $f_b$ 값을 올바르게 추정한다면 표적의 거리를 알 수 있다.

또한 표적의 속도정보를 알아내기 위해서는 위에서 표현한 chirp 신호 여러개를 활용하게 되는데 이를 fast chirp 시스템이라고 하며, 이러한 여러개의 chirp 신호를 묶어놓은 것이 한 개의 프레임(frame)이다. chirp 의 지속시간인  $T_c$ 가 10~100 $\mu$ s범위 내에 있는 fast chirp 시스템에서 는 각 chirp간에 도플러 위상차를 측정하게 되는데 이를 식으로 설명하 면 아래와 같다. 먼저 위 (2)의 식에서 chirp index l과 표적의 속도  $v \equiv$  반영하여 지 연시간  $\tau \equiv \tau = \frac{2(R+v(t+lT_c))}{c}$ 로 다시 대입하여 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$x(t) \simeq \exp\left\{j2\pi(f_b t + f_d l T_c + \frac{2f_c R}{c})\right\}$$

$$(f_b = \frac{2BR}{T_c c}), \ (f_d = \frac{2f_c v}{c})$$
(5)

이 때, chirp index *l*은 0에서 총 chirp의 개수인 *L*-1까지의 값을 가지는 수이며, *f<sub>d</sub>*는 chirp index *l*에 대하여 타깃의 속도 정보를 포함하여 일정하게 변화하는 주파수 성분을 가진 Doppler 주파수 성분을 의미한다. 위 식을 시간에 대해 *T<sub>s</sub>*간격으로 총 *N*개의 샘플링을 한 식은 최종 적으로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x[n,l] &\simeq \exp\left\{j2\pi (f_b n \, T_s + f_d l \, T_c + \frac{2f_c R}{c})\right\} + noise \\ (f_b &= \frac{2BR}{T_c c}), \ (f_d &= \frac{2f_c v}{c}) \end{aligned} \tag{6}$$

이 때,  $n \in 0$ 과 N-1사이의 값을 갖는 sampling index이며, FMCW 레이더에서 수신신호를 모두 처리 한 이후의 잡음 또한 포함되어 있다. 위와 같은 beat frequency  $f_b$ 와 Doppler frequency  $f_d$ 의 관계는 아래 그 림 2.1.2와 같이 표현할 수 있다.



그림 2.1.2 Beat frequency와 Doppler frequency의 개념도

FMCW 레이더에서 Doppler frequency *f*<sub>d</sub>를 사용하여 속도를 추정할 때, 나이퀴스트 샘플링 이론에 의해 Doppler 위상 변화가 chirp간 2π를 넘으면 안되며, 만약 위상변화가 그보다 큰 값을 갖는다면 Doppler aliasing이 발생하게 된다. 속도 추정은 표적이 레이더 방향으로 다가올 때와 멀어질때의 각각 음수 혹은 양수의 값을 갖게 되며 따라서 위상변 화는 -π와 π범위 내에 있어야 하며, 이 내용을 식으로 표현하면 다음 과 같다.

$$-\pi < 2\pi f_d T_c < \pi \tag{7}$$

위 (7) 식에서  $f_d$ 를 (6)식의 v에 관한 식으로 다시 풀어쓰게 되면

$$-\frac{\lambda}{4T_C} \le v < \frac{\lambda}{4T_C}$$

$$v_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4T_C}$$
(8)

로 나타낼 수 있으며, 최대 탐지속도인  $v_{\max}$ 가 위와 같이 주파수의 파

장  $\lambda = \frac{c}{f_c}$ 와 chirp 지속시간인  $T_c$ 로 정의될 수 있다. 위 식의 의미를 정리하자면, FMCW 레이더에서는 레이더 방향으로 접근하는 표적에 대 해서는 음의 속도로 추정하고 반대로 멀어지는 표적에 대해서는 양의 속 도로 추정을 하게 된다. 이 때, 표적이 레이더에서 탐지 가능한 최대 속 도인  $v_{\text{max}}$ 를 초과하게 되면 Doppler aliasing이 발생하게 되고 결과적으 로 레이더에서 탐지 가능한 속도 범위 내에서 틀린 값의 속도를 추정하 게 된다. 이를 Doppler 모호성이라고 하며, 그림으로 표현하면 다음과 같 다.



그림 2.1.3 FMCW 레이더의 Doppler 모호성

위 그림과 같이 Doppler 모호성은 레이더에서 표적의 속도  $\hat{v}$ 을 추정 했을 때, 표적의 실제 속도 $v_{true}$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있으며, N은 알고있지 않은 정보인 임의의 정수를 의미한다.

$$v_{true} = \hat{v} + 2N v_{\max} \tag{9}$$

실제 주행환경에서 활용하는 레이더 파라미터인 B = 600 MHz,  $T_c = 60 \mu s$ ,  $f_c = 77 GHz$ 를 가정하면 레이더에서 탐지할 수 있는 최대 탐지속도  $v_{\text{max}}$ 의 범위는 약  $-16.22 \sim 16.22 m/s$ 이며, km/h로 환산 할 시 약  $-58.4 \sim 58.4 km/h$ 이다. 보통 도심 환경에서 차량의 주행 속도 는 빠르면 약 100 km/h 내외의 속도를 가정할 수 있으며, 반대 방향으 로 주행하는 차량의 접근 속도까지 생각하면 실제 환경에서 Doppler 모 호성이 충분히 발생 할 수 있는 환경임을 알 수 있다.

또한 샘플링된 신호의 특성으로 인해, FFT(fast fourier transform) 이 후에 속도 추정에서는 레이더의 총 chirp 개수 *L*과 최대 탐지속도 *v*<sub>max</sub> 와 연관된 분해능(resolution)을 갖게 되며 이를 식으로 표현하면 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다[9].

$$v_{res} = \frac{2v_{\max}}{L} \tag{10}$$

다시 정리하면 Doppler 모호성이란, Doppler aliasing으로 인해 FMCW 레이더에서 표적의 속도를 추정했을 때, 표적의 실제 속도는 특 정할 수 없으며 (9)번 식과 같이 그림 2.1.3과 같이 여러개의 가능한 실 제 속도 후보가 존재하기 때문에 정확한 실제 속도를 추정하는 방법이 필요하다.

다음으로 소개할 레이더의 속도추정에 있어서의 특징중 하나는 radial 성분의 속도 추정이다. 표적이 임의의 속도와 방향으로 이동할 때 이를 벡터로 나타낼 2수 있다. 그러나 레이더에서는 표적의 속도벡터 성분 중 레이더가 바라보는 방향으로 정사영(projection)된 표적의 속도 성분, 즉 radial 성분만을 추정할 수 있게 되며 이를 그림으로 표현하면 그림 2.1.4 와 같다.

표적의 속도 벡터  $v_t$ 와 레이더가 측정한 radial 속도  $v_r$ 과의 관계를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$v_{r} = \overrightarrow{v_{t}} \bullet \hat{R}$$
  
=  $\overrightarrow{v_{t}} \bullet (\hat{x}\sin\theta + \hat{y}\cos\theta)$   
=  $v_{t,x}\sin\theta + v_{t,y}\cos\theta$  (11)

여기서  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{R}$ 은 각각 x축, y축과 레이더가 바라보는 방향 성분의 단위 벡터를, θ는 레이더를 기준으로 한 표적의 방위각,  $v_{t,x}$ ,  $v_{t,y}$ 는 각각 표적의 속도벡터  $\overrightarrow{v_t}$ 의 x, y축의 성분을 의미한다. 위 식은 그림 2.1.4에 서 표현된 표적과  $v_r$ 에 끝에서 수직으로 연결되는 하나의 법선, 즉 'Normal line'으로 표현될 수 있다.

결론적으로 레이더에서 어떤 표적의 radial 성분 속도  $v_r$ 이 관측되었 을 때, 표적의 실제 속도 벡터  $v_t$ 는 표적에서  $v_r$ 만큼 떨어진 위치의 법 선 'Normal line' 상에 위치한 임의의 점 모두가 될 수 있다. 이러한 임 의의 실제 속도 벡터  $v_t$ 의 정확한 방향과 크기를 구해야 표적의 속도를 추정할 수 있으며, 이를 위해 여러개의 레이더를 활용하거나 한 개의 레 이더에서 시간에 따른 여러 프레임의 정보가 필요하다.



그림 2.1.4 레이더의 속도 추정 시 radial 성분 속도

# 제 2 절 Least Square 기법을 활용한 속도벡터 추정

위 부분에서 언급하였듯이 한 개의 레이더에서 추정한 단일 정보로는 표적의 속도 벡터 v<sub>t</sub>를 정확히 추정할 수 없으며, 본 절에서는 표적의 속도 벡터 v<sub>t</sub>를 추정하기 위한 첫 번째 방법으로 여러개의 분산된 레이 더 시스템을 활용하는 방법에 대해 소개한다.

그림 2.2.1에서 표현되었듯이 임의의 서로 다른 위치에 배치되어 있는 3개의 레이더를 통해 표적의 속도를 추정하는 상황을 가정하였다. 각각 의 레이더와 표적의 radial 성분 속도인  $v_{r,1}$ ,  $v_{r,2}$ ,  $v_{r,3}$ 로 표적의 법선 성 분(Normal line) 3개가 만들어지게 되며, 이 세 개의 법선 성분이 교차하 는 지점이 표적의 속도 벡터  $v_t$ 이다. 이 내용은 다음과 같은 선형 방정 식으로 표현할 수 있다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} v_{r,1} \\ \vdots \\ v_{r,K} \end{bmatrix}}_{y} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \sin\theta_K & \cos\theta_K \end{bmatrix}}_{A} + \underbrace{\begin{bmatrix} v_{t,x} \\ v_{t,y} \end{bmatrix}}_{x}$$
(12)

이 때, 표적의 radial 성분 속도  $v_{r,k}$ 은 레이더의 속도 분해능인  $v_{res}$ 와 잡음등으로 인해 레이더에서 측정한 속도  $\hat{v_r}$ 와 오차  $\epsilon$ 를 더한 값으로  $v_r = \hat{v}_{r,k} + \epsilon_k$ 와 같이 나타낼 수 있으며, 이 때 k는 레이더의 index를 의미한다.

레이더가 3개 이상일 때, 위 선형방정식은 행렬 A가 full rank를 가지 게 되고 해가 존재하지 않는 과결정(Overdetermined) 연립방정식으로 정 의할 수 있다. 이러한 과결정 연립방정식의 근사해를 구하는 대표적인 방법으로 최소제곱법(Least Square Method)를 활용할 수 있으며,



그림 2.2.1 여러개의 분산 배치된 레이더 시스템에서의 속도 추정 방법

최소제곱법이란 오차  $\epsilon$ 의 제곱의 합이 최소가 되는 해, 즉  $\|\epsilon\|^2 = \|y - A\hat{x}\|^2$ 가 되는  $\hat{x}$ 를 찾는 방법이다.  $\hat{x}$ 를 찾기 위해 다음 과 같은 식을 활용하여 해를 구할 수 있다.

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T y \tag{13}$$

하지만 위에서 서술한 Doppler ambiguity로 인해 Doppler aliasing이 발생하게 되면 최소제곱법을 이용하여 구한 해가 실제 속도 벡터  $\vec{v_t}$ 와 매우 다른 값을 갖게 된다. 그림 2.2.2은 3개의 레이더 중 하나의 레이더 (레이더 2)가 Doppler aliasing이 발생한 상황을 표현하였다. Doppler aliasing 발생으로 인해 레이더 2에서는 실제 레이더 2에서 측정되어야 하는 radial 성분의 속도  $v_{r,2}$ 와 크기와 부호(방향)이 다른 값으로 측정되 었으며, 이로 인해 최소제곱법으로 구한 실제 속도 벡터 $v_{est}$  또한 실제 속도 벡터  $\vec{v_t}$ 와 매우 다른 값을 추정하게 되기 때문에 표적의 속도 벡 터  $\vec{v_t}$ 를 정확히 추정하기 위해 Doppler ambiguity를 해결할 방안이 필 요하다.



그림 2.2.2 여러개의 분산 배치된 레이더 시스템에서 Doppler aliasing 발생 상황의 예

# 제 3 절 Kalman filter 기법을 활용한 속도벡터 추정

본 절에서는 한 개의 레이더에서 여러개의 프레임을 활용하여 표적의 속도 벡터  $\overrightarrow{v_t}$ 를 추정하는 방안에 대해 소개한다. 먼저 여러개의 프레임 데이터를 활용하기 위해 칼만필터(Kalman filter) 기법을 활용하였으며 칼만필터의 기본적인 개념은 다음과 같다.

칼만필터는 재귀적으로 동작하는 필터의 한 종류이며, 기본적으로 백 색 잡음(White Gaussian noise)이 포함되어 있는 이산시간의 선형 시스 템을 가정하여 과거의 측정값을 바탕으로 현재의 상태 변수(state variable)를 추정한다. 칼만필터의 특정시간 *k*에서의 시스템 모델은 다음 과 같다.

$$\begin{aligned} x_k &= A x_{k-1} + w_k \\ z_k &= H x_k + u_k \end{aligned} \tag{13}$$

여기서  $x_k$ 는 상태 벡터(state vector),  $z_k$ 는 측정 벡터(measurement vector), A와 H는 각각 시스템 행렬(system matrix) 및 관측 행렬 (observation matrix)이고,  $w_k$ 와  $u_k$ 는 각각 시스템 잡음(system noise) 및 측정 잡음(measurement noise)를 의미하며 각각 공분산 행렬 (covariance matrix) Q와 R을 갖는다.

칼만필터는 위 시스템 모델을 기반으로 예측 과정(prediction stage)와 추정 과정(update stage)을 통해 현재 상태 벡터  $x_k$ 를 추정하며 추정 과 정은 다음과 같이 5개로 구분하여 나타낼 수 있다.

첫 번째 단계에서는 시간 k-1에서의 상태 벡터  $x_{k-1}$ 과 시스템 행렬 A를 통해 현재 시간 k의 상태 벡터  $x_k$ 를 다음과 같이 예측한다.

$$\hat{x}_{k}^{-} = A\hat{x}_{k-1}^{+} \tag{14}$$

이 때, x̂은 상태벡터 x의 추정값이며, (•)<sup>-</sup> 및 (•)<sup>+</sup>는 각각 측정값 을 반영하기 전과 후인 사전 추정값(prior estimation) 및 사후 추정값 (prior estimation)을 의미한다.

다음으로는 칼만필터에서 추정 과정에서 측정값 반영 시 활용되는 사 전 공분산 행렬(covariance matrix)  $P_k^-$  및 칼만 이득(Kalman gain)  $K_k$ 를 다음과 같은 식을 활용하여 계산한다.

$$P_{k}^{-} = E[(x_{k} - \hat{x}_{k}^{-})(x_{k} - \hat{x}_{k}^{-})^{T}] = AP_{k-1}^{+}A^{T} + Q$$

$$K_{k} = P_{k}^{-}H^{T}(HP_{k}^{-}H^{T} + R)^{-1}$$
(15)

이후에는 계산된 칼만이득  $K_k$ 값과 측정값  $z_k$ 를 통해 사후 추정값  $\hat{x}_k^+$ 및 사후 공분산 행렬  $P_k^+$ 를 다음 식과 같이 계산한다.

$$\hat{x}_{k}^{+} = \hat{x}_{k}^{-} + K_{k}(z_{k} - H\hat{x}_{k}^{-}) P_{k}^{+} = E[(x_{k} - \hat{x}_{k}^{+})(x_{k} - \hat{x}_{k}^{+})^{T}] = P_{k}^{-} - K_{k}HP_{k}^{-}$$
(16)

레이더에서 칼만필터를 활용하여 표적의 위치와 속도를 추정하는 기 법과 시스템 모델 다양하게 연구되어 왔다[10]. 본 연구에서는 FMCW 레이더에서 활용할 수 있는 기법으로 레이더의 x, y 좌표 위치를 의사 측정(Pseudo-measurement) 방식으로 측정 변수 z<sub>k</sub>로 활용하고 속도를 구하는 선형 모델(linear model)인 선형 칼만 필터(linear Kalman filter, LKF)와 레이더의 측정값인 거리(R), 방위각(θ), radial 성분의 속도(v<sub>r</sub>) 를 측정 변수 z<sub>k</sub>로 활용하는 비선형(확장) 칼만 필터(Extended Kalman filter, EKF) 2가지를 활용하였으며 각각의 경우에서 시스템 모델은 아래 와 같다.

먼저 LKF의 시스템 모델인 상태 벡터와 측정 벡터는 시간 k에서 각 각 다음의 식 (17), (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix}
x_{p}[k] \\
y_{p}[k] \\
v_{x}[k] \\
v_{y}[k]
\end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix}
1 & 0 & T_{f} & 0 \\
0 & 1 & 0 & T_{f} \\
0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}_{X_{k}} \underbrace{\begin{bmatrix}
x_{p}[k-1] \\
y_{p}[k-1] \\
v_{x}[k-1] \\
v_{y}[k-1]
\end{bmatrix}}_{\overline{x_{k-1}}} + \underbrace{\begin{bmatrix}
w_{x_{p}}[k] \\
w_{y_{p}}[k] \\
w_{v_{x}}[k] \\
w_{v_{y}}[k]
\end{bmatrix}}_{\overline{w}} \tag{17}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{x}_{p}[k] \\ \tilde{y}_{p}[k] \end{bmatrix}}_{z_{k}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{H} \underbrace{\begin{bmatrix} x_{p}[k] \\ y_{p}[k] \\ v_{x}[k] \\ v_{y}[k] \end{bmatrix}}_{x_{k}} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_{x_{p}} \\ u_{y_{p}} \end{bmatrix}}_{u}$$
(18)

이 때 식 (17)에서  $x_p$ ,  $y_p$ 는 x, y축 상에서의 위치,  $v_x$ ,  $v_y$ 는 표적의 x, y축 성분,  $T_f$ 는 프레임 시간(frame duration)을 의미하며, 식 (18)에 서  $\tilde{x_p}$ ,  $\tilde{y_p}$ 는 의사 측정값으로서 각각  $\tilde{x_p}[k] = R[k]\sin\theta[k]$ ,  $\tilde{y_p}[k] = R[k]\cos\theta[k]$ 를 의미한다. LKF의 위치 및 속도 추정 과정을 순 서도로 나타내면 그림 2.3.1과 같다.

위 시스템에서 알 수 있듯이, LKF는 간단한 구조로 설계가 쉽지만, 선형성 보장을 위해 측정 벡터  $z_k$ 에서 표적의 위치정보만 활용을 하고 속도정보는 활용하지 않기 때문에 SNR(signal to noise ratio) 환경에 취 약하고 정확성이 비교적 낮다는 단점이 존재한다.



그림 2.3.1 LKF의 추정과정

다음으로, EKF는 비선형 시스템 모델을 미분을 통한 선형화로 상태 벡터를 추정한다. 시스템 모델에서 상태 벡터의 식은 위의 선형 칼만 필 터의 식 (17)과 동일하며 측정 벡터의 식은 다음과 같다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R[k] \\ \theta[k] \\ v_{r}[k] \end{bmatrix}}_{z_{k}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt{x^{2}[k] + y^{2}[k]} \\ \tan^{-1}(\frac{x[k]}{y[k]}) \\ \frac{v_{x}[k]x[k] + v_{y}[k]y[k]}{\sqrt{x^{2}[k] + y^{2}[k]}} \\ \frac{\sqrt{x^{2}[k] + y^{2}[k]}}{\sqrt{x^{2}[k] + y^{2}[k]}} \\ \underbrace{ \underbrace{ u_{\theta} \\ u_{v} \end{bmatrix}}_{u} \end{aligned}$$
(19)

이 때, *R*, *θ*, *v<sub>r</sub>*은 각각 레이더에서 측정한 거리, 방위각, radial 성분 의 속도이며, *h*(*x<sub>k</sub>*)는 상태 벡터와 측정 벡터의 관계인 비선형 방정식이 고, *u*는 측정 잡음을 의미한다.

EKF의 추정과정의 순서도는 그림 2.3.2과 같다. 추정과정에서 LKF와 차이점으로, 칼만이득  $K_k$ 과 오차 공분산  $P_k^+$ 를 구하는 식 (15), (16)에서 행렬 H를 식 (20)과 같은 야코비안 행렬(Jacobian matrix)를 활용하며, 식 (16)의 사후 상태 벡터를 구하는 식은 식 (21)과 같이 표현할 수 있 다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} \cdots \frac{\partial h_1}{\partial x_4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_3}{\partial x_1} \cdots \frac{\partial h_3}{\partial x_4} \end{bmatrix}$$
(20)  
$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k \Big\{ z_k - h(\hat{x}_k^-) \Big\}$$
(21)



그림 2.3.2 EKF의 추정과정

이와 같이 EKF를 활용할 때, 레이더의 모든 측정 정보를 활용하기 때문에 LKF보다 성능이 좋은 장점이 있지만, 표적의 속도가 빨라서 측 정 정보 중에서 radial 속도 성분  $v_r$ 에 Doppler aliasing이 생기면 역시 칼만필터의 추정값도 큰 오차가 생기게 되기게 된다.

칼만필터에 대해 정리하자면, LKF는 선형 시스템 모델을 활용하며 레이더에서 의사 측정 방식을 활용하여 위치 측정 정보만을 활용하여 간 단하게 표적의 속도 벡터를 구할 수 있지만 높은 성능을 기대할 수 없 다. 반면에 EKF는 레이더의 활용 가능한 정보인 *R*, *θ*, *v*<sub>r</sub>을 모두 활용 하므로 높은 성능을 기대할 수 있지만 레이더의 Doppler ambiguity를 해결해야 하는 문제점이 존재한다.

# 제 3 장 제안 기법

## 제 1 절 다중 레이더 시스템에서의 제안 기법

앞의 부분에서 설명하였듯, 여러개의 분산 배치된 레이더 시스템에서 각각의 측정한 레이더의 radial 속도 성분과 LS 기법을 통해 표적의 속 도 벡터 성분을 구할 수 있었다. 하지만 Doppler 위상이 ±π를 초과하게 되면 발생하는 Doppler aliasing으로 인해 Doppler ambiguity 문제를 해 결하지 않으면 LS 기법으로 추정한 표적의 속도 벡터가 실제 표적의 속 도 벡터와 다른 문제가 발생하게 되며, 이를 해결하기 위한 방법을 제시 하려고 한다.

먼저 제안하는 방법의 전체적인 순서도는 다음 그림과 같다.



그림 3.1.1 다중레이더 시스템 제안 기법의 순서도

Doppler aliasing이 발생하지 않아서 올바르게 표적의 속도 벡터를 추정한 그림 2.1.5와 Doppler aliasing이 발생해서 표적의 속도 벡터 추정 을 실패한 그림 2.1.6을 비교했을 때 LS 기법의 Least Square 오차의 제 곱 합인 ॥ ε ॥ <sup>2</sup>의 크기 차이가 존재하며 그림 2.1.5에서 훨씬 작은 값을 가지게 된다. 이러한 개념을 활용하여 각 레이더에서 Doppler aliasing이 일어난 각각의 경우를 가정하고 경우의 수를 조합하여 LS 오차의 제곱 합인 ॥ ε ॥ <sup>2</sup>가 가장 작은 경우를 올바르게 실제 속도 벡터를 추정한 값 으로 선택한다.

각 레이더에서 Doppler aliasing이 일어난 경우의 수는 다음 식과 같 이 표현할 수 있다.

$$v_{cand} = \hat{v}_{r,k} \pm 2nv_{\max}$$

$$(0 \le n < N)$$

$$(22)$$

이 때,  $v_{cand}$ 는 각 레이더에서 가질 수 있는 radial 성분의 후보 속도를 의미하며,  $v_{r,k}$ 는 k번째 레이더가 측정한 radial 성분의 속도이고, n은 0 부터 임의의 양의 정수 N까지의 수이다.

만약 3개의 레이더 시스템에서 N=1을 가정하면 각 레이더에서 가질 수 있는 경우의 수는 표 3.1과 같으며, 이에 따른 모든 레이더의 조합 가 능한 표적의 추정 속도 벡터는 표 3.2와 같다.

구 분	$v_{cand,1}$	$v_{cand,2}$	$v_{cand,3}$
레이더 1	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{v}_{r,1}\!+\!2v_{\max}$	$\hat{v}_{r,1}\!-\!2v_{\max}$
레이더 2	$\hat{v}_{r,2}$	$\hat{v}_{r,2}\!+\!2v_{\max}$	$\hat{v}_{r,2}\!-\!2v_{\max}$
레이더 3	$\hat{v}_{r,3}$	$\hat{v}_{r,2}\!+\!2v_{\max}$	$\hat{v}_{r,2}\!-\!2v_{\max}$

표 3.1 각 레이더의 후보 속도 경우의 수

구 분	$v_{cand,1}$	$v_{cand,2}$	$v_{cand,3}$
1	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{v}_{r,2}$	$\hat{v}_{r,3}$
2	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{v}_{r,2}$	$\hat{v}_{r,3}\!+\!2v_{\max}$
3	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{v}_{r,2}$	$\hat{v}_{r,3}\!-\!2v_{\max}$
4	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{\boldsymbol{v}}_{r,2}\!+\!2\boldsymbol{v}_{\max}$	$\hat{v}_{r,3}$
5	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{\boldsymbol{v}}_{r,2}\!+\!2\boldsymbol{v}_{\max}$	$\hat{v}_{r,3}\!+\!2v_{\max}$
6	$\hat{v}_{r,1}$	$\hat{\boldsymbol{v}}_{r,2}\!+\!2\boldsymbol{v}_{\max}$	$\hat{v}_{r,3}\!-\!2v_{\max}$
	•••	•••	•••
10	$\hat{\boldsymbol{v}}_{r,1}\!+\!2\boldsymbol{v}_{\max}$	$\hat{v}_{r,2}$	$\hat{v}_{r,3}$
	•••	•••	•••
27	$\hat{\boldsymbol{v}}_{r,1}\!-\!2\boldsymbol{v}_{\max}$	$\hat{v}_{r,2}\!-\!2v_{\max}$	$\hat{v}_{r,3}\!-\!2v_{\max}$

표 3.2 Doppler ambiguity를 고려한 추정 속도 벡터의 모든 조합

이 때, 추정 속도 벡터의 모든 조합의 개수는  $(2N+1)^P$ 이며, P는 시 스템에서 활용하는 레이더의 총 개수이다.

제안하는 본 방법의 제한사항으로, 만약 SNR 환경이 열악하다면 잡 음의 비중으로 인해 추정한 radial 성분의 속도  $\hat{v}_r$ 이 실제 레이더에서 추정되어야 하는 radial 성분의 속도  $v_r$ 과 큰 오차가 생기게 되며, 이로 인해 LS 기법의 결과 또한 큰 오차를 갖게 되어 결과적으로 틀린 경우 의 조합의 수를 선택할 확률이 높아진다. 또한, 추정 속도 벡터의 조합 개수도 경우의 수 N과, 레이더의 총 개수 P에 따라서 증가하기 때문에 레이더를 더 많이 활용할수록 속도 벡터 추정을 위한 계산량 또한 증가 하게 된다.

24

#### 제 2 절 단일 레이더 시스템에서의 제안 기법

단일 레이더 시스템에서는 표적의 속도 벡터를 추정하기 위해 여러개 의 프레임 정보를 활용하며, 이러한 여러개의 정보는 선형 및 비선형 칼 만필터를 통해 속도 정보를 추정할 수 있다. 이 때, 선형 칼만필터는 식 (17), (18)과 같이 측정 벡터  $\vec{z_k}$ 에 의사 측정정보를 활용하여 선형 시스 템을 설계할 수 있지만, 속도 정보를 활용하지 않기 때문에 좋은 성능을 기대할 수 없다. 반면 측정 벡터  $\vec{z_k}$ 에서 모든 정보를 활용하기 위해서는 비선형 시스템 모델이 필요하며 식 (19)와 같이 측정 벡터 시스템에서 비선형 모델을 사용하는 EKF를 적용할 수 있다. 하지만 EKF의 측정 벡 터  $\vec{z_k}$ 에서 표적의 radial 성분 속도  $v_r$ 이 Doppler aliasing으로 인해 잘못 된 값이 측정되었다면 표적의 속도 벡터 또한 틀린 값을 추정하는 결과 로 이어질 수 있다.

이를 해결하기 위해 제안하는 방법은 Doppler ambiguity를 고려하여, 레이더에서 탐지 가능한 최대 속도  $v_{\max}$ 를 더하거나 뺀 경우를 가설의 경우로 모두 계산한 후 결과값을 비교하는 것으로서 개략적인 순서도는 그림 3.2.1과 같다. 먼저, 3개의 가설에 대응되는 측정 벡터  $\vec{z}_k$ 의 표적의 radial 성분 속도  $v_r$ 에 가설별로 각각  $v_r$ ,  $v_r + 2v_{\max}$ ,  $v_r - 2v_{\max}$ 를 적용 하며 EKF 추정 과정을 필요한 만큼 설정한 임의의 모든 프레임의 개수 K만큼 수행한다. 이 때, 칼만필터 동작에 필요한 프레임의 개수 K는 많 을수록 추정값이 정확한 값으로 수렴하는데 도움되지만, 너무 많으면 속 도 추정 시간에 지연이 생기며 빠른 응답을 필요로 하는 교통 상황 등 시스템의 특성에 치명적인 단점이 될 수 있다.

각 가설 별로 *K*개의 프레임 개수 만큼 EKF 추정을 수행 한 후, 칼만 이득의 행렬식(determinant) *K*<sub>k</sub>비교를 통해 Doppler ambiguity를 해결한 다. 이때, 칼만이득 *K*<sub>k</sub>은 정방행렬이 아니므로 행렬식을 구하기 위해 *K*<sup>T</sup><sub>k</sub>*K*<sub>k</sub> 연산을 통해 행렬식을 비교한다.

25



그림 3.2.1 단일레이더 시스템 제안 기법의 순서도

칼만이득  $K_k$ 은 시스템에서 식 (16)과 같이 측정벡터  $z_k$ 와 사전 상태 벡터  $x_k$ 의 가중치를 결정한다. 칼만이득이 크면 이전상태의 예측값인 상 태벡터  $x_k$ 보다 새로운 측정값인 측정벡터  $z_k$ 에 더 많은 가중치를 두고, 칼만이득이 0에 가까울수록 측정치보다 예측값을 더 신뢰하게 된다. 즉 칼만이득이 클수록 시스템에서 새로운 측정값이 오차 공분산  $P_k$ 에 의해 신뢰할 수 있다고 판단하는 것이며, Doppler aliasing이 일어나면 진행되 는 추정값과 측정값이 매우 큰 오차를 갖게 되며 측정값에 신뢰를 두지 않는 현상이 일어나 칼만이득이 작아지게 된다. 반면에 Doppler aliasing 이 일어나지 않은 가설일 경우 상대적으로 큰 칼만이득을 가지고 측정값 에 일정 이상의 가중치를 유지하며 추정을 진행하게 된다.

가설 별 칼만이득  $K_k$ 의 행렬식을 프레임 별로 그래프로 나타내면 그 림 3.2.2와 같다. 그림의 예시에서는  $v_{\max} = \pm 16.2225 \, m/s$ 일 때 표적의 radial 성분의 속도  $v_r$ 이 각각 레이더가 측정한 속도의 탐지범위 내에 있 을 때 $(v_r = \hat{v}_r)$ ,  $+2v_{\max}$ 만큼 초과하였을 때 $(v_r = \hat{v}_r + 2v_{\max})$ ,  $-2v_{\max}$ 인 상 황 $(v_r = \hat{v}_r - 2v_{\max})$ 에서의 칼만이득  $K_k^T K_k$ 의 행렬식 변화를 나타내었으 며, 각각의 경우에 모두 실제 표적의 radial 성분 속도  $v_r$ 과 일치하지 않 는 가설의 칼만이득의 행렬식 값이 프레임이 진행될 수록 낮아지는 것을 확인할 수 있다.



그림 3.2.2 가설 별 칼만이득  $K_k^T K_k$ 의 행렬식 변화

# 제 4 장 시뮬레이션 및 결과

제 1 절 다중 레이더 시스템에서의 시뮬레이션 결과 다중 레이더 시스템에서 표적의 속도 벡터 추정을 위한 제안 방법의 성능 검증을 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 활용된 FMCW 레이더의 파라미터는 표 4.1과 같으며, 파라미터는 현실에서 차 량의 자율주행 등에 사용되는 상용 레이더와 비슷한 값을 활용하였다. 표와 같은 파라미터를 사용하였을 때 레이더에서 Doppler ambiguity 가 발생하지 않는 속도의 최대 탐지 가능 범위( $v_{max}$ )는 16.2225m/s이다.

Radar parameter	Value
Carrier frequency, $f_c$	77 <i>GHz</i>
Frequency slope, $S$	$10M\!H\!z/\mu s$
Sampling period, $T_s$	$0.1\mu s$
Chirp duration, $T_c$	$60\mu s$
Number of samples per chirp, $N$	256
Number of chirps per frame, $L$	128

표 4.1 FMCW 레이더 파라미터

시뮬레이션 환경은 그림 4.1.1과 같으며, FMCW 레이더를 상황별로 각각 3개부터 최대 5개까지 활용하는 것을 가정하였다. 레이더의 위치는 그림에서 표현된 것처럼 각각 (10,10), (10,30), (30,10), (30,30), (20,20)의 좌표에 고정되어 있다. 첫 번째 실험에 활용 된 3개의 레이더 는 파란색으로 표시되어 있으며, 4번째 레이더는 초록색의 (30,30) 위치 에, 5번째 레이더는 빨간색의 (20,20) 위치에 각각 기존의 레이더 시스템에



그림 4.1.1 다중 레이더 시스템의 시뮬레이션 환경

추가되며 진행되었다. 각각의 레이더는 MUSIC(Multiple Signal Classifier)이나 ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique)등의 각도 추정 방식을 활용하여 방위각( $\theta$ )을 알 고 있다고 가정하며[11], 모든 레이더는 하나의 중앙 시스템에 연결되어 각 레이더의 정보를 실시간 공유하며 처리한다. 또한 표적은  $40 \times 40$ 의 정 사각형 범위 내에서 임의의 방향으로 움직이며, 단일 점원(point source) 으로 가정하고, 표적의 속도 벡터는  $\vec{v}_t = v_x \hat{x} + v_y \hat{y}$ 와 같이  $x \stackrel{+}{\Rightarrow} x \stackrel{+}{\Rightarrow} \hat{z}$  성분으로 구분하여 나타낸다. 표적의 속도는 최대 30 m/s의 범위 내의 값을 가지며 움직이는 방향은 임의의 방향으로 설정하였다. 후보 속도  $v_{cand}$ 는 총 3개로, 각각  $\hat{v}_r$ 과  $\hat{v}_r \pm 2v_{max}$ 가 각 레이더별로 적용되며 레이 더가 3, 4, 5개일 때 각각 모든 조합의 경우의 수는 27, 81, 243개다.

Index	$error(\epsilon)$	Index	$error(\epsilon)$	Index	$error(\epsilon)$
1	2.77	10	12.20	19	17.76
2	10.42	11	25.40	20	4.56
3	15.97	12	0.99	21	30.95
4	28.35	13	13.37	22	43.33
5	15.15	14	0.17	23	30.13
6	41.54	15	26.56	24	56.53
7	28.80	16	37.78	25	7.82
8	35.99	17	50.98	26	21.02
9	9.60	18	24.59	27	5.38

표 4.2 모든 경우의 수 조합에서의 LS 오차

표 4.2는 3개의 레이더를 가정한 예시의 27가지 모든 경우에서 LS 오 차를 표현하였다. 해당 예시에서 실제 표적의 속도 벡터  $\vec{v_t} = (25.37 m/s, 9.23 m/s)$ 이며, 표 3.2에서와 같이 모든 레이더의 후보 속도 v<sub>cand</sub>가 v̂<sub>r</sub> + 2v<sub>max</sub>인 경우인 14번의 경우가 가장 LS 에러가 작으며 해당 경우의 추정 속도는 (25.31*m/s*,9.26*m/s*)으로 표적의 속도 벡터를 올 바르게 추정함을 확인할 수 있었다. 하지만 SNR 환경이나 표적의 위치 에 따라 실제 표적의 속도 벡터를 추정하는 조합의 오차가 가장 낮은값 을 갖지 않는 경우도 생기는데, 이런 상황은 표적의 속도 벡터 추정을 실패한 것으로 간주하였다.

그림 4.1.2의 (a) 그림은 표적의 실제 속도 벡터와 추정한 속도 벡터 의 차이를 표현하는 RMSE(Root Mean Square Error)를 나타내는 그래 프이며, 레이더의 개수가 증가하고 SNR 환경이 좋아질수록 성능 또한 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 모든 개수의 레이더 시스템에서 SNR이 약 -27*dB*보다 안좋아질수록 급격히 성능이 저하되는 것을 확 인할 수 있다.

그림 4.1.2의 (b) 그림은 위에서 언급한 표적의 속도 벡터 추정을 성 공할 확률을 레이더의 개수와 SNR에 따라 나타낸 그래프이며, RMSE와 비슷하게 레이더의 개수가 증가하고 SNR환경이 좋을수록 성능이 좋은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 SNR이 매우 열악한 환경에서는 많은 레 이더의 개수가 오히려 레이더의 추정 성공 확률에 더 안좋은 영향을 나 타내는 것으로 확인되는데, 이는 많은 레이더의 더 부정확한 정보로 인 해 오히려 올바른 표적의 속도 벡터 추정 가능성에 안좋은 영향을 미치 기 때문이다.

32



## 제 2 절 단일 레이더 시스템에서의 시뮬레이션 결과

단일 레이더 시스템에서 표적의 속도 벡터 추정은 한 개의 레이더에 서 일정한 방향으로 움직이는 물체를 가정하고 취득한 여러개의 프레임 정보를 칼만필터로 처리하였다. FMCW 레이더의 파라미터는 위의 표 4.1과 동일하며 칼만필터의 추정을 위해 사용된 프레임의 개수 K는 30 개이며 단일 프레임의 시간  $T_f$ 는 10ms로 한번 속도 추정을 하는데 필 요한 시간은 최소 시간은 0.3s이다.

시뮬레이션 환경은 그림 4.2.1과 같으며, 레이더와 표적은 같은 *x*좌표 에서 *y*축으로 40*m* 이격된 거리로 가정하였고 표적은 해당 위치를 시작 으로 최대 30*m*/*s*의 속도 범위 내에서 임의의 방향으로 이동하는 것을 가정하였다. 시뮬레이션은 LKF, EKF 및 제안한 방법을 비교하여 실험 하였으며 LKF의 예시는 그림 4.2.2와 같다.



그림 4.2.1 단일 레이더 시스템의 시뮬레이션 환경



그림 4.2.2 LKF 추정 예시 (a) SNR=25*dB*, (b) SNR=-3*dB* 

위 4.2.2의 LKF 추정 예시에서 표적의 실제 속도 벡터  $v_t$ 는 (21.21m/s,21.21m/s)이며, 파란색 원으로 된 경로가 프레임 별로 표적 이 이동한 실제 위치를 나타내고 빨간색 \*표시는 레이더에서 추정한 위 치, 노란색 별표는 LKF를 통해 추정한 위치를 나타낸다. 그림에서 표현 되었듯이 LKF는 시스템의 구조가 간단하여 쉽게 설계가 가능한 장점이 있지만, SNR 환경이 조금만 악화되면 위치 추정의 오차로 인해 표적의 속도 벡터 추정 또한 부정확해지는 단점이 존재한다.

또한 EKF의 속도 벡터 추정 예시는 그림 4.2.3으로 표현하였다. 표적 의 속도 벡터는 위 그림 4.2.2의 LKF의 추정 예시와 동일하며, EKF에서 는 측정 벡터  $\vec{z}_k$  에서 radial 성분의 속도가 Doppler ambiguity 문제를 해결하면 LKF에 비해 SNR 환경에 강인하고 우수한 성능을 보이지만 Doppler ambiguity 문제를 해결하지 못할 경우에는 추정한 속도 벡터가 실제 속도 벡터와 매우 큰 오차가 생김을 관찰 할 수 있다.

그림 4.2.3은 EKF에서 이러한 Doppler ambiguity를 해결하기 위해 제 안한 방법의 성능을 비교하기 위한 LKF, EKF 및 제안한 방법 별 RMSE 그래프를 나타낸다. LKF는 SNR 환경에 따라 선형적인 영향을 받는 경향을 보이며, EKF는 Doppler ambiguity를 해결하지 못하는 문제 때문에 SNR과 관계 없이 일정한 경향이 없는 성능을 보인다. 하지만 위 LKF, EKF에 비해 제안한 방법은 SNR이 -25*dB* 이상인 환경에서 위 두 기법보다 우수한 성능을 보이는 것을 관찰할 수 있었다.

36





그림 4.2.4 LKF, EKF, Proposed method 성능 비교

# 제 5 장 결 론

FMCW 레이더에서 물체의 정확한 속도를 추정하기 위해서는 표적이 움직이고 있는 방향을 포함하는 속도 벡터 뿐만 아니라 FMCW 레이더 에서 발생하는 Doppler ambiguity 문제를 해결해야 한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 FMCW 레이더에서 측정되는 전파가 방사 되는 방향의 radial 속도 성분을 통해 표적의 속도 벡터 추정과 Doppler ambiguity 해결에 대한 방법을 다중 및 단일 레이더 시스템에서 제안하 였다.

다중 레이더 시스템에서는 여러개의 위치에서 측정된 radial 속도 성 분  $v_r$ 에 각각  $\pm 2v_{max}$ 를 더한 값을 가능한 속도 후보로 두었으며, 가능 한 모든 조합의 경우에 대하여 LS 오차를 비교하여 Doppler ambiguity 를 해결하였다. 제안한 방법을 검증하기 위해 총 3개에서 5개의 레이더 가 분산된 위치에 고정된 시스템을 가정하고 임의의 방향과 속도로 움직 이는 표적에 대해 속도 벡터를 추정하였으며, RMSE 및 Success probability통해 성능을 평가하였다. 전반적으로 레이더의 개수가 많을수 록, 그리고 SNR 환경이 좋을수록 성능은 증가하였으나 SNR환경이 매우 열악할 경우 많은 레이더는 오히려 추정 성공 확률에 악영향이 될 수 있 는 점 또한 확인할 수 있었다.

단일 레이더 시스템에서는 움직이는 표적에 대해 일정 시간동안 정 보를 수집하여 칼만필터 기법을 통해 표적의 속도 벡터를 추정하였다. 이때 LKF는 시스템 모델에서 측정 모델에서 의사 측정 방식을 활용하 여 표적의 위치 정보만을 활용하여 선형 시스템 모델을 간단히 설계할 수 있었지만 높은 성능은 기대할 수 없었다. 반면에 측정모델에서 레이 더에서 측정하는 모든 변수를 반영하는 EKF는 낮은 SNR 환경에서 LKF보다 우수한 성능을 기대할 수 있지만 Doppler ambiguity 문제를 해결하지 않으면 시스템의 오류로 인해 성능에 제한이 있었다. 이를 해 결하기 위해 제안한 방법으로는 칼만필터에서 각 측정 모델에 Doppler

39

aliasing을 고려한 모든 속도를 가설로 세우고 EKF의 계산 결과에서칼 만이득의 행렬식 값의 크기를 비교하여 크기가 가장 큰 가설을 옳은 추 정으로 가정하고 속도 벡터를 추정하였다. 성능 검증을 위해 RMSE 관 찰 결과, SNR이 약 - 27dB까지 가장 우수한 성능을 관찰 할 수 있었으 나 그보다 SNR이 악화될 경우 불안정한 측정 모델로 인해 성능이 매우 악화되는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 방법은 복잡한 도심의 운행 환경에서 차량의 안 전을 확보하고 자율주행을 위한 차량 시스템 발전에 기여 할 수 있을 것 이다. 향후 가능한 연구 방향으로, 위에서 제안한 다중/단일 레이더 시스 템에서의 속도 추정 방법을 융합하여 다중 레이더 시스템에서의 속도 추 정 성능을 높이거나 추정 성공확률을 높이는 효과를 기대할 수 있을 것 이다.

# 참 고 문 헌(16pt)

[1] S. M. Patole, M. Torlak, D. Wang, and M. Ali, "Automotive radars: A review of signal processing techniques," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 34, no. 2, pp. 22 - 35, 2017. [2] D. Kellner, M. Barjenbruch, J. Klappstein, J. Dickmann, and K. Dietmayer, "Instantaneous ego-motion estimation using multiple doppler radars," in 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014, pp. 1592 - 1597. [3] D. Kellner, M. Barjenbruch, K. Dietmayer, J. Klappstein, and J. Dickmann, "Instantaneous lateral velocity estimation of a vehicle using doppler radar," in Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2013, pp. 877 - 884. [4] F. Roos, J. Bechter, N. Appenrodt, J. Dickmann, and C. Waldschmidt, "Enhancement of doppler unambiguity for chirp-sequence modulated tdm-mimo radars," in 2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). IEEE, 2018, pp. 1 - 4. [5] M. Kronauge, C. Schroeder, and H. Rohling, "Radar target

detection and doppler ambiguity resolution," in 11-th International Radar Symposium. IEEE, 2010, pp. 1 - 4.

[6] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu et al., "A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise." in kdd, vol. 96, no. 34, 1996, pp. 226 - 231.

[7] H. A. Gonzalez, C. Liu, B. Vogginger, and C. G. Mayr, "Doppler ambiguity resolution for binary-phase-modulated mimo fmcw radars," in 2019 International Radar Conference (RADAR). IEEE, 2019, pp. 1 - 6.
[8] H. A. Gonzalez, C. Liu, B. Vogginger, P. Kumaraveeran, and C. G Mayr, "Doppler disambiguation in mimo fmcw radars with binary phase

modulation," IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 15, no. 8, pp. 884 - 901, 2021.

[9] A. Wojtkiewicz, J. Misiurewicz, M. Nalecz, K. Jedrzejewski, andK. Kulpa, "Two-dimensional signal processing in fmcw radars," Proc.XX KKTOiUE, pp. 475 - 480, 1997.

[10] N. Floudas, A. Polychronopoulos and A. Amditis, "A survey of filtering techniques for vehicle tracking by radar equipped automotive platforms," 2005 7th International Conference on Information Fusion, 2005, pp. 8

[11] E. Gentilho, P. R. Scalassara, and T. Abr<sup>a</sup>o, Direction-of-arrival estimation methods: A performance-complexity tradeoff perspective," Journal of Signal Processing Systems, vol. 92, no. 2, pp. 239 - 256, 2020.

# Abstract Enhanced Velocity Vector Estimation Methods Using FMCW Radar System

Lee Seung-Gu

Electrical and Computer Engineering The Graduate School Seoul National University

The use of FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar is increasing in order to secure driver's safety and improve convenience in the driving environment of the vehicle. However, the radar can only estimate the radial velocity component, which is the velocity component projected in the direction the radar is looking at the target, and as a result, the velocity estimation performance can be seriously degraded when the target moves lateral direction. In addition, when estimating the velocity of the FMCW radar, the Doppler ambiguity problem caused by Doppler aliasing must be solved to estimate the accurate velocity of the target.

To solve this problem, this paper proposes two methods using a multiple distributed radar system and a single radar system. In the multiple distributed radar system, several combinations of radial velocities estimated through the Least Square methods are defined in each radar, and the velocity with the minimum error among the results of each Least Square method is selected.

In a single radar system, a method of estimating a velocity vector in which the Doppler ambiguity problem of the target is resolved by using a Kalman filter is presented. To verify the proposed method, the performances of the Linear Kalman Filter (LKF) and the Extended Kalman Filter (EKF) were compared, and the eigenvalues of the covariance matrix of the Kalman Filter were calculated to solve the Doppler ambiguity. By comparison, it was confirmed that the method of estimating the actual velocity vector of the target showed the best performance.

keywords : Automotive radar, FMCW radar, Doppler ambiguity, velocity vector estimation Student Number : 2021-22758