

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Đinh Duy Mạnh

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN TƯƠNG QUAN
JPDA VÀ LỌC PHẦN TỬ TRONG BÀI TOÁN THEO DÕI
ĐA MỤC TIÊU RA ĐA**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT
(Theo định hướng ứng dụng)

HÀ NỘI - 2025

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Đinh Duy Mạnh

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN TƯƠNG QUAN
JPDA VÀ LỌC PHẦN TỬ TRONG BÀI TOÁN THEO DÕI
ĐA MỤC TIÊU RA ĐA**

CHUYÊN NGÀNH : KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ

MÃ SỐ: 8.52.02.03

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT
(Theo định hướng ứng dụng)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: TS. TRẦN THỊ THỰC LINH

HÀ NỘI - 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đề án thạc sĩ kỹ thuật “NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN TƯƠNG QUAN JPDA VÀ LỌC PHẦN TỬ TRONG BÀI TOÁN THEO DÕI ĐA MỤC TIÊU RA ĐA” do tôi nghiên cứu, tổng hợp và thực hiện.

Toàn bộ nội dung trong đề án tốt nghiệp, những điều được trình bày là của chính cá nhân tôi hoặc là được tham khảo, tổng hợp từ nhiều nguồn tài liệu khác nhau. Tất cả các tài liệu tham khảo, tổng hợp được trích xuất với nguồn gốc rõ ràng. Các số liệu, kết quả nêu trong đề án tốt nghiệp là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Hà Nội, ngày 02 tháng 08 năm 2025

Học viên thực hiện đề án

Đinh Duy Mạnh

MỤC LỤC

MỤC LỤC.....	ii
DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT.....	iii
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	iv
DANH MỤC CÁC HÌNH.....	v
MỞ ĐẦU.....	1
Chương 1: CƠ SỞ LÝ LUẬN.....	2
1.1. Tổng quan hệ thống ra đa.....	2
1.1.1. Lịch sử hình thành	2
1.1.2. Phân loại Ra đa	3
1.1.3. Sơ đồ chức năng đài ra đa đơn giản.....	6
1.2. Các thành phần của hệ thống bám quỹ đạo đa mục tiêu trong Ra đa	7
1.2.1. Xử lý sơ cấp thông tin ra đa.....	8
1.2.2. Xử lý thứ cấp thông tin ra đa	8
Chương 2: TỔNG QUAN VỀ CÁC BỘ LỌC PHI TUYẾN VÀ THUẬT TOÁN	
TƯƠNG QUAN	11
2.1. Bộ lọc phi tuyến	11
2.1.1. Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF)	11
2.1.2. Bộ lọc UKF	14
2.1.3. Bộ lọc phân tử (Particle Filter)	17
2.2. Thuật toán tương quan	24
2.2.1. Thuật toán tương quan GNN	25
2.2.2. Thuật toán tương quan JPDA	28
Chương 3: THỰC NGHIỆM XÂY DỰNG HỆ THỐNG THEO DÕI ĐA MỤC TIÊU	
TRONG RA ĐA ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN JPDA VÀ LỌC PHẦN TỬ.....	34
3.1. Xây dựng hệ thống	34
3.2. Mô phỏng và thử nghiệm	37
3.2.1. Tạo dữ liệu giả lập	37
3.2.2. Kết quả theo dõi đa mục tiêu trong Ra đa	40
3.2.3. Đánh giá chất lượng các thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử.....	47
KẾT LUẬN	55
DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	56

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ADC	Analog-to-Digital converter	Bộ chuyển đổi tương tự số
CFAR	Constant False Alarm Rate	Tỉ lệ báo động lầm không đổi
DFS	Depth First Search	Tìm kiếm theo chiều sâu
EKF	Extended Kalman Filter	Bộ lọc Kalman mở rộng
GNN	Global Nearest Neighbor	
JPDA	Joint Probabilistic Data Association	
KF	Kalman Filter	Bộ lọc Kalman
PF	Particle Filter	Bộ lọc phân tử
RMSE	Root Mean Square Error	
SIS	Sequential Importance Sampling	Thuật toán lấy mẫu quan trọng tuần tự
SNR	Signal Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
UKF	Kalman Unscented Filter	Bộ lọc UKF
UT	Unscented Transformation	Phép biến đổi Unscented

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1: So sánh giữ ra đa xung và ra đa liên tục.....	5
Bảng 2: So sánh giữa ra đa đa kênh	5
Bảng 3: Giá trị tương quan điểm dấu – quỹ đạo	25
Bảng 4: Tham số chuyển động của 25 mục tiêu	45
Bảng 5: Kết quả so sánh ba bộ lọc sử dụng chỉ số RMSE	50

DANH MỤC CÁC HÌNH

Hình 1: Hệ thống ra đa do Robert Watson-Watt phát minh	2
Hình 2: Phân loại các ra đa	3
Hình 3: Hình ảnh một số đài ra đa phân loại theo công dụng.....	4
Hình 4: Sơ đồ chức năng đài ra đa đơn giản.....	6
Hình 5: Quá trình xử lý thông tin ra đa	7
Hình 6: Thuật toán lấy mẫu lại hệ thống với 3 mẫu	23
Hình 7: Tương quan giá trị đo – quỹ đạo.....	24
Hình 8: Cửa sóng và ma trận kiểm định	30
Hình 9: Sơ đồ hệ thống theo dõi mục tiêu ra đa sử dụng JPDA và lọc phần tử	34
Hình 10: Sơ đồ thuật toán xử lý quỹ đạo – tâm chùm	35
Hình 11: Giao diện khối hiển thị.....	36
Hình 12: Tạo dữ liệu giả lập chuyển động đều	37
Hình 13: Tạo dữ liệu giả lập chuyển động có gia tốc	38
Hình 14: Tạo dữ liệu giả lập chuyển động lượn vòng	39
Hình 15: Mục tiêu số 1	41
Hình 16: Mục tiêu số 2.....	41
Hình 17: Mục tiêu số 3.....	42
Hình 18: Mục tiêu số 4.....	42
Hình 19: Mục tiêu số 5.....	43
Hình 20: Mục tiêu số 6.....	43
Hình 21 : Mục tiêu số 7.....	44
Hình 22: Kết quả ứng dụng theo dõi 07 mục tiêu trong ra đa	44
Hình 23: Mô phỏng 25 mục tiêu chuyển động trong môi trường nhiễu	45
Hình 24: Kết quả theo dõi 25 mục tiêu chuyển động trong môi trường nhiễu	46
Hình 25: Quỹ đạo chuyển động phức tạp của mục tiêu	48
Hình 26: Kết quả bộ lọc EKF.....	49
Hình 27: Kết quả bộ lọc UKF	49

Hình 28: Kết quả bộ lọc PF.....	50
Hình 29: Mô phỏng hai mục tiêu chuyển động cắt nhau	51
Hình 30: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan GNN ...	51
Hình 31: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan GNN tại thời điểm giao nhau.....	52
Hình 32: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan JPDA ..	52
Hình 33: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan JPDA tại thời điểm giao nhau.....	53

MỞ ĐẦU

Hệ thống bám quỹ đạo đã được nghiên cứu và phát triển từ lâu trên thế giới, không chỉ phục vụ mục đích quân sự mà còn được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực dân sự. Các ứng dụng tiêu biểu bao gồm giám sát chuyển động người qua camera, điều khiển robot, định vị phương tiện tự hành và theo dõi đối tượng trong không gian ba chiều. Tại Việt Nam, nghiên cứu về hệ thống bám quỹ đạo vẫn còn khá hạn chế, chủ yếu tập trung vào các bài toán bám đơn mục tiêu, chẳng hạn như theo dõi vật thể thông qua camera. Trong trường hợp này, chỉ cần một thuật toán lọc là đủ để xử lý dữ liệu và dự đoán quỹ đạo.

Tuy nhiên, đối với các hệ thống bám đa mục tiêu, việc chỉ sử dụng thuật toán lọc là chưa đủ. Bài toán trở nên phức tạp hơn do sự xuất hiện của nhiều mục tiêu di chuyển đồng thời, có thể giao cắt hoặc che khuất lẫn nhau. Để giải quyết vấn đề này, cần kết hợp giữa thuật toán lọc và thuật toán tương quan nhằm xác định chính xác quỹ đạo của từng đối tượng, tránh nhầm lẫn trong quá trình theo dõi. Mục tiêu của đề án là đi sâu tìm hiểu thuật toán lọc và thuật toán tương quan, đánh giá ưu nhược điểm của từng thuật toán và thực nghiệm xây dựng một thuật toán lọc phần tử (Particle), kết hợp với thuật toán tương quan JPDA trong bài toán theo dõi đa mục tiêu Ra đa. Do đó em chọn đề án “Nghiên cứu ứng dụng thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử trong bài toán theo dõi đa mục tiêu Ra đa”.

Đề án tập trung nghiên cứu, so sánh các thuật toán tương quan JPDA (Joint Probabilistic Data Association), GNN (Global Nearest Neighbor), so sánh các bộ lọc phi tuyến như bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), bộ lọc phi tuyến UKF và bộ lọc phần tử (Particle Filter). Ứng dụng thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử trong bài toán theo dõi đa mục tiêu Ra đa.

Em xin chân thành cảm ơn cô TS Trần Thị Thục Linh, Khoa Kỹ thuật Điện tử 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông đã tận tình hướng dẫn giúp em hoàn thành đề án này.

Chương 1: CƠ SỞ LÝ LUẬN

1.1. Tổng quan hệ thống ra đa

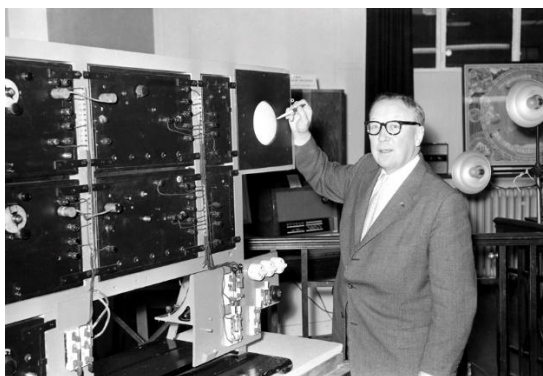
1.1.1. Lịch sử hình thành

Ra đa là hệ thống dò tìm và định vị bằng sóng vô tuyến, với tên gọi bắt nguồn từ cụm tiếng Anh Radio Detection and Ranging. Thuật ngữ này được Hải quân Mỹ chính thức sử dụng trong Chiến tranh Thế giới thứ hai và ngày nay đã trở nên phổ biến trên toàn cầu.

Nguyên lý hoạt động của Ra đa dựa trên các thí nghiệm về bức xạ điện từ do nhà vật lý người Đức Heinrich Hertz thực hiện vào những năm 1880. Những thí nghiệm này đã chứng minh lý thuyết của James Clerk Maxwell, cho thấy sóng vô tuyến có thể phản xạ khi gặp vật thể kim loại và bị khúc xạ trong môi trường điện môi, tương tự như ánh sáng.

Đến những năm 1930, 08 nước gồm Mỹ, Anh, Đức, Pháp, Liên Xô, Italy, Hà Lan và Nhật Bản đã đồng loạt nghiên cứu và phát triển ra đa phục vụ mục đích quân sự, đặc biệt trong việc phát hiện máy bay bằng sóng vô tuyến phản xạ. Một số quốc gia đã thành công trong việc triển khai hệ thống ra đa hoạt động hiệu quả ngay khi Chiến tranh Thế giới thứ hai bùng nổ.

Năm 1937, nhà khoa học Robert Watson-Watt đã chế tạo thành công hệ thống ra đa có khả năng phát hiện máy bay ném bom từ khoảng cách hơn 150 km, đánh dấu bước ngoặt trong lịch sử phát triển ra đa hiện đại. Ông được công nhận là cha đẻ của hệ thống ra đa hoàn chỉnh. Hình 1 minh họa hệ thống ra đa đầu tiên do Robert Watson-Watt phát minh

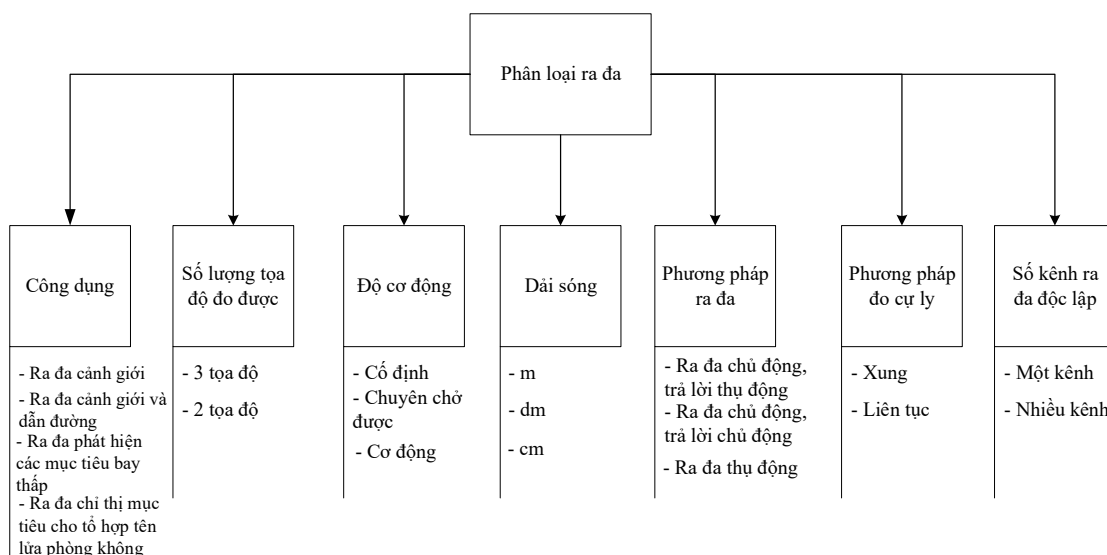


Hình 1: Hệ thống ra đa do Robert Watson-Watt phát minh

Ngày nay, ra đa không chỉ ứng dụng trong quân sự mà còn được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực dân sự như hàng không (kiểm soát không lưu), giao thông (giám sát tốc độ), khí tượng (dự báo thời tiết) và địa chất (khảo sát địa hình).

1.1.2. Phân loại Ra đa

Hình 2 là sơ đồ phân loại ra đa, bao gồm phân loại theo công dụng, phân loại theo số lượng tọa độ đo được, phân loại theo độ cơ động, phân loại theo dải sóng, phân loại theo phương pháp ra đa, phân loại theo phương pháp đo cự ly, phân loại theo số kênh ra đa độc lập [2].



Hình 2: Phân loại các ra đa

-Phân loại theo công dụng: có thể chia các đài ra đa thành các loại sau:

- Ra đa cảnh giới: Phát hiện các mục tiêu trên không, loại ra đa này thường đo hai tọa độ: cự ly và phương vị của mục tiêu với độ chính xác vừa phải. Công suất phát của đài ra đa lớn (để đảm bảo cự ly phát hiện xa).
- Ra đa cảnh giới và dẫn đường: Phát hiện các mục tiêu trên không và dẫn đường cho máy bay tiêm kích, loại ra đa này cần đo được cả ba tọa độ: Cự ly, phương vị và độ cao với độ chính xác đủ đảm bảo dẫn đường.
- Ra đa phát hiện các mục tiêu bay thấp để trinh sát các mục tiêu bay thấp, ra đa loại này có búp sóng rà thấp sát mặt đất, làm việc ở dải sóng cm hoặc dm, công suất phát nhỏ, gọn nhẹ, có tính cơ động.

- Ra đa chỉ thị mục tiêu cho tổ hợp tên lửa phòng không, thông tin ra đa về ba tọa độ: Cự ly, phương vị và độ cao cần đủ chính xác đảm bảo cho các đài điều khiển tên lửa bám sát ngay mục tiêu mà không cần sự sáo.
- Ra đa chuyên dụng: như ra đa độ chính xác cao, ra đa phủ vùng nón mù đỉnh đầu.



Đài ra đa cảnh giới 36D6



Ra đa cảnh giới và dẫn đường SNR-75



Ra đa phát hiện các mục tiêu bay thấp VRS-2DM



Ra đa chỉ thị mục tiêu P-35

Hình 3: Hình ảnh một số đài ra đa phân loại theo công dụng

Hình 3 trình bày hình ảnh một số đài ra đa phân loại theo công dụng.

-Phân loại theo dải sóng:

- HF (Tần số cao): Lợi dụng phản xạ sóng ở tầng đối lưu và tầng điện ly để phát hiện mục tiêu ngoài tầm nhìn trực tiếp.
- VHF/UHF: Dùng để phát hiện mục tiêu ngoài đường chân trời.
- Các dải sóng phổ biến trong ra đa cảnh giới: Sóng mét ($10 \div 1m$); Sóng decimet ($10 \div 1dm$); Sóng centimet ($10 \div 1cm$).

-Phân loại theo phương pháp hoạt động:

- Ra đa chủ động (có trả lời thụ động hoặc chủ động).
- Ra đa thụ động.

-Phân loại theo phương pháp đo cự ly:

- Ra đa bức xạ xung.
- Ra đa bức xạ liên tục.

Bảng 1 so sánh giữa ra đa xung và ra đa liên tục như sau:

Bảng 1: So sánh giữa ra đa xung và ra đa liên tục

Đặc điểm	Ra đa xung	Ra đa liên tục
Phương pháp phát	Xung ngắn	Tín hiệu liên tục
Ưu điểm chính	Đơn giản việc đo cự ly, dễ dàng sử dụng chung một anten cho cả thu và phát	Đo vận tốc chính xác. Không cần công suất phát lớn
Nhược điểm	Cần máy phát công suất xung lớn. Phức tạp việc đo tốc độ mục tiêu	Khử nhiễu giữa tuyến thu và tuyến phát phức tạp Thiết bị đầu cuối phức tạp khi cần quan sát nhiều mục tiêu, nhiều tham số

-Phân loại theo số lượng kênh độc lập:

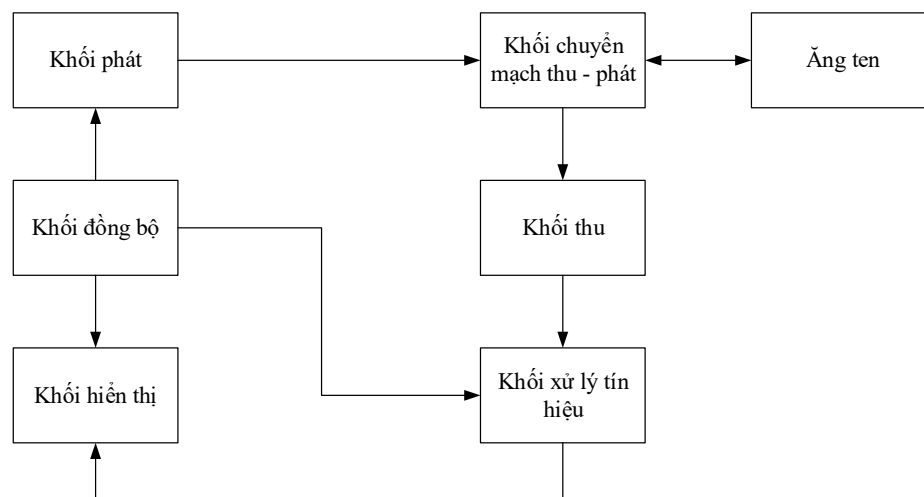
- Ra đa đơn kênh: Chỉ sử dụng một kênh phát-thu duy nhất. Đơn giản về thiết kế và vận hành.
- Ra đa đa kênh: Sử dụng nhiều kênh làm việc độc lập. Trong ra đa nhiều kênh chia thành: đa kênh tần số, đa kênh không gian và đa kênh tần số-không gian. Bảng 2 so sánh giữa các ra đa đa kênh.

Bảng 2: So sánh giữa ra đa đa kênh

Loại	Đặc điểm kỹ thuật	Ưu điểm	Nhược điểm
Đa kênh tần số	- Nhiều kênh phát-thu ở các tần số khác nhau trong phạm vi của cùng một giản đồ hướng anten - Xử lý tín hiệu bằng phương pháp trộn tín hiệu	- Tăng khả năng chống nhiễu - Phát hiện mục tiêu đa dạng	- Phức tạp trong xử lý tín hiệu
Đa kênh không gian	- Nhiều búp sóng anten độc lập	- Quan sát đa hướng	- Kích thước hệ thống lớn

Loại	Đặc điểm kỹ thuật	Ưu điểm	Nhược điểm
	- Cùng tần số làm việc - Có thể dùng chung hoặc riêng máy phát	- Linh hoạt trong bố trí hệ thống	- Yêu cầu cao về điều khiển ăng ten
Đa kênh tần số-không gian	- Kết hợp đa búp sóng và đa tần số - Mỗi búp sóng làm việc ở tần số riêng	- Khả năng chống nhiễu cao nhất - Độ chính xác cải thiện đáng kể	- Hệ thống phức tạp

1.1.3. Sơ đồ chức năng đài ra đa đơn giản



Hình 4: Sơ đồ chức năng đài ra đa đơn giản

Hình 4 mô tả sơ đồ chức năng đài ra đa đơn giản [2]. Thành phần đài ra đa bao gồm:

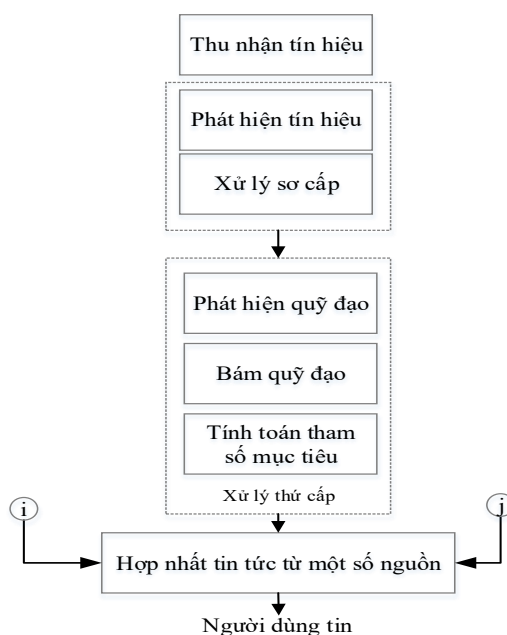
- Hệ thống Ăng ten: Để bức xạ định hướng tín hiệu phát và thu tín hiệu phản xạ. Để tạo ra hình dạng vùng quan sát cần thiết và đảm bảo khả năng xác định các tọa độ góc của mục tiêu cần tiến hành quét búp sóng ăng ten.
- Khối phát: Tạo tín hiệu có cấu trúc và khuếch đại tín hiệu.
- Khối đồng bộ: Đảm bảo hoạt động đồng bộ tuyến thu và tuyến phát.
- Khối chuyển mạch anten: Chuyển đổi giữa chế độ thu/phát, bảo vệ khối thu khỏi công suất cao.
- Khối thu: Khuếch đại chất lượng phát hiện mục tiêu khi có tác động của các loại nhiễu khác nhau, bao gồm: khuếch đại, lọc phối hợp, tích lũy tín hiệu, chống nhiễu tiêu cực, chống nhiễu tích cực.

- Khối xử lý tín hiệu: Tách mục tiêu trên nền nhiễu, tính toán cự ly.
- Khối hiển thị: Hiển thị thông tin về mục tiêu như cự ly, phương vị, vận tốc, hướng chuyển động.

1.2. Các thành phần của hệ thống bám quỹ đạo đa mục tiêu trong Ra đa

Ngày nay, với sự phát triển của khoa học kỹ thuật cũng như các phương tiện trong tác chiến hiện đại, số lượng và tốc độ của mục tiêu ngày càng lớn. Nếu vẫn sử dụng phương pháp thủ công dựa vào trắc thủ (trắc thủ quan sát trên màn hình hiển sóng để phát hiện mục tiêu) thì không thể đáp ứng được yêu cầu về tốc độ xử lý và khả năng phản ứng kịp thời. Do đó, việc tự động hóa quá trình xử lý thông tin ra đa là cần thiết, quá trình này có thể được thực hiện thông qua hệ thống bán tự động hoặc hệ thống tự động.

Trong hệ thống bán tự động, trắc thủ đóng vai trò then chốt, quyết định đến khả năng vận hành của toàn bộ hệ thống. Ngược lại, hệ thống tự động sử dụng các thiết bị tính toán để xử lý dữ liệu, giảm thiểu sự phụ thuộc vào con người. Lúc này, nhiệm vụ của trắc thủ chủ yếu là giám sát hoạt động và xử lý các tình huống kỹ thuật phát sinh.



Hình 5: Quá trình xử lý thông tin ra đa

Hình 5 mô tả quá trình xử lý thông tin ra đa bao gồm từ việc thu nhận tín hiệu phản xạ từ mục tiêu, phát hiện tín hiệu mục tiêu trên nền nhiễu, xác định tham số mục tiêu như

tọa độ (cự ly, phương vị), vận tốc mục tiêu, phát hiện quỹ đạo, bám sát quỹ đạo [1].

1.2.1. Xử lý sơ cấp thông tin ra đa

- Thu nhận tín hiệu: Ra đa phát sóng điện từ và thu nhận tín hiệu phản xạ từ mục tiêu. Thực hiện khuếch đại tín hiệu và lọc tần số không mong muốn.

- Phát hiện tín hiệu: Chuyển tín hiệu tương tự sang tín hiệu số (ADC), sử dụng các bộ lọc để tăng tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal Noise Ratio) và CFAR (Constant False Alarm Rate) tự động điều chỉnh ngưỡng phát hiện để giảm báo động giả.

- Xử lý sơ cấp: Xác định tham số mục tiêu như tọa độ (cự ly, phương vị), vận tốc mục tiêu.

1.2.2. Xử lý thứ cấp thông tin ra đa

Phát hiện quỹ đạo: Bao gồm 04 nhiệm vụ chính: định cửa điểm dấu, ước lượng giá trị ban đầu tham số quỹ đạo, ngoại suy tọa độ và kiểm tra tiêu chuẩn phát hiện.

- Định cửa điểm dấu: Xác định một vùng không gian xung quanh vị trí dự đoán của mục tiêu, làm giảm không gian tính toán và loại bỏ nhiễu. Các dạng cửa sổ thường được sử dụng như sau:

➤ *Cửa sổ hình chữ nhật*

$$\begin{cases} |x_{N+1}^i - x_{ns}| \leq \Delta x_{cs} \\ |y_{N+1}^i - y_{ns}| \leq \Delta y_{cs} \end{cases} \quad (1.1)$$

Trong đó: x_{N+1}^i, y_{N+1}^i tọa độ điểm dấu của mục tiêu i ở chu kỳ quan sát $N+1$. $\Delta x_{cs}, \Delta y_{cs}$ là kích thước cửa sổ, được chọn theo xác suất điểm dấu thực rơi vào cửa sổ. Ví dụ, để xác suất điểm dấu thực rơi vào cửa sổ bằng 0.9999 thì kích thước cần chọn là:

$$\begin{cases} \Delta x_{cs} = 3\delta_x \\ \Delta y_{cs} = 3\delta_y \end{cases} \quad (1.2)$$

Trong đó δ là độ lệch chuẩn của sai số dự đoán.

➤ *Cửa sổ elip*

Dựa trên phân bố xác suất của sai số dự đoán (thường được giả định phân bố Gaussian)

$$d^2 = (z - \hat{z})^T S^{-1} (z - \hat{z}) \leq G \quad (1.3)$$

d^2 được gọi là khoảng cách thống kê Mahalanobis, là khoảng cách đo sự tương quan giữa điểm dấu với quỹ đạo.

z : Vector đo lường (có thể tọa độ x,y hoặc vận tốc).

$\hat{z}$: Vector dự đoán (có thể lấy từ bộ lọc Kalman).

S : Ma trận hiệp phương sai của độ lệch (sai số dự đoán).

G : là giá trị hằng số được lấy theo bảng phân phối xác suất Chi-Square (χ^2) có bậc theo số chiều của vector đo lường.

- Ước lượng giá trị ban đầu tham số quỹ đạo: Sử dụng các điểm dấu thu được trong N chu kỳ (có thể 2 chu kỳ) quan sát để ước lượng vị trí, vận tốc, gia tốc ban đầu của mục tiêu.

- Ngoại suy tọa độ: Dự đoán vị trí mục tiêu ở chu kỳ tiếp theo dựa trên mô hình động học (ví dụ: chuyển động đều, có gia tốc).

- Kiểm tra tiêu chuẩn phát hiện: Sử dụng tiêu chuẩn M/N. Trong đó: N là số chu kỳ quan sát, M là số điểm dấu có liên hệ với nhau (ví dụ: tiêu chuẩn 3/5).

Bám quỹ đạo: là quá trình thực hiện ghép điểm dấu mới nhận được với một trong những quỹ đạo. Quá trình thực hiện bao gồm: ước lượng tham số mục tiêu, ngoại suy tọa độ cho chu kỳ quan sát tiếp theo, định cửa sóng, lựa chọn điểm dấu trong cửa sóng.

- Ước lượng tham số mục tiêu: ước lượng tham số theo phương pháp bé nhất, ước lượng tham số theo hàm hợp là cực đại, ước lượng tham số theo xác suất hậu nghiệm cực đại.

- Ngoại suy tham số mục tiêu: là phép tìm tham số quỹ đạo tại điểm nằm ngoài khoảng quan sát theo các giá trị tham số quỹ đạo trong khoảng quan sát.

- Lựa chọn điểm dấu trong cửa sóng bám sát có 03 trường hợp xảy ra: một điểm dấu, nhiều điểm dấu và không có điểm dấu nào.

- Một điểm dấu: thực hiện ghép điểm dấu đó vào quỹ đạo.

- Không điểm dấu nào: sử dụng điểm dấu ngoại suy là điểm tiếp tục của quỹ đạo bám sát.

- Nhiều điểm dẫu: Sử dụng các thuật toán tương quan như: Nearest Neighbor (NN) Chọn điểm gần nhất với vị trí dự đoán. Probabilistic Data Association (PDA) tính xác suất từng điểm thuộc về quỹ đạo. Joint Probabilistic Data Association (JPDA) dùng cho nhiều mục tiêu, xét tất cả khả năng kết hợp.

Kết luận chương 1:

Chương 1 đã trình bày tổng quan về hệ thống ra đa bao gồm: lịch sử hình thành và phát triển của hệ thống ra đa, phân loại ra đa, sơ đồ chức năng và công dụng từng thành phần của đài ra đa đơn giản. Ngoài ra, chương 1 cũng đã trình bày các thành phần của hệ thống bám quỹ đạo đa mục tiêu trong ra đa bao gồm xử lý sơ cấp thông tin ra đa và xử lý thứ cấp thông tin ra đa, đặc biệt xử lý thứ cấp thông tin ra đa bao gồm hai nhiệm vụ chính: phát hiện quỹ đạo và bám quỹ đạo.

Chương 2: TỔNG QUAN VỀ CÁC BỘ LỌC PHI TUYẾN VÀ THUẬT TOÁN TƯƠNG QUAN

2.1. Bộ lọc phi tuyến

2.1.1. Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF)

Bộ lọc Kalman được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển và dẫn đường nhằm ước lượng trạng thái hệ thống. Tuy nhiên, bộ lọc Kalman truyền thống chỉ áp dụng hiệu quả cho các hệ thống tuyến tính. Để khắc phục hạn chế này, bộ lọc Kalman mở rộng (Extended Kalman Filter - EKF) đã được phát triển, cho phép ước lượng trạng thái của hệ thống phi tuyến bằng cách tuyến tính hóa mô hình động học và mô hình quan sát thông qua khai triển Taylor bậc nhất. EKF là sự mở rộng của bộ lọc Kalman tuyến tính cổ điển (Linear Kalman Filter), được thiết kế để hoạt động hiệu quả trong các hệ thống mà trong đó hàm trạng thái và hàm quan sát là phi tuyến tính.

- Mô hình hệ thống phi tuyến:

➤ Phương trình trạng thái:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_{k-1} \quad (2.1)$$

➤ Phương trình quan sát:

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (2.2)$$

Trong đó:

- x_k : vector trạng thái tại thời điểm k .

- u_k : vector điều khiển.

- z_k : vector quan sát.

- w_k, v_k : nhiễu trắng Gauss.

- Bộ lọc EKF bao gồm hai giai đoạn chính: dự đoán và cập nhật. Trong đó, các hàm phi tuyến trong mô hình động học và mô hình quan sát được tuyến tính hóa tại thời điểm ước lượng bằng Ma trận Jacobian để xấp xỉ hóa các hàm phi tuyến thành dạng tuyến tính. Các giai đoạn cụ thể như sau:

➤ Giai đoạn dự đoán: Trong giai đoạn này, EKF dự đoán trạng thái tiếp theo

và hiệp phương sai dựa trên mô hình động học phi tuyến. Các bước chính như sau:

Dự đoán trạng thái:

Sử dụng hàm chuyển trạng thái phi tuyến $f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1})$.

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) \quad (2.3)$$

Trong đó:

$\hat{x}_{k|k-1}$: Ước lượng trạng thái dự đoán tại thời điểm k .

$\hat{x}_{k-1|k-1}$: Ước lượng trạng thái đã được cập nhật tại thời điểm $k-1$.

u_k : vector điều khiển (nếu có).

Tuyến tính hóa bằng ma trận Jacobian:

Tính ma trận Jacobian F_k của hàm f tại điểm $\hat{x}_{k-1|k-1}$:

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{\hat{x}_{k-1|k-1}} \quad (2.4)$$

Dự đoán hiệp phương sai:

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (2.5)$$

Trong đó:

$P_{k|k-1}$: Hiệp phương sai dự đoán tại thời điểm k .

Q_k : Ma trận hiệp phương sai nhiễu quá trình (process noise).

➤ **Giai đoạn cập nhật:** Sau khi có dữ liệu đo lường mới, EKF tiến hành hiệu chỉnh ước lượng trạng thái bằng cách kết hợp thông tin từ cả mô hình động học và giá trị đo nhận được.

Dự đoán đo lường:

Sử dụng hàm đo lường phi tuyến $h(\hat{x}_{k|k-1})$.

$$\hat{z}_k = h(\hat{x}_{k|k-1}) \quad (2.6)$$

Trong đó $\hat{z}_k$: Giá trị đo lường dự đoán.

Tuyến tính hóa bằng ma trận Jacobian:

Tính ma trận Jacobian H_k của hàm h tại điểm $\hat{x}_{k|k-1}$:

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_{k|k-1}} \quad (2.7)$$

Tính độ lệch và hiệp phương sai của độ lệch:

Độ lệch giữa đo lường z_k và dự đoán $\hat{z}_k$

$$y_k = z_k - \hat{z}_k \quad (2.8)$$

Hiệp phương sai của độ lệch:

$$S_k = (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k) \quad (2.9)$$

R_k : Ma trận hiệp phương sai nhiễu đo lường.

Tính độ lợi Kalman (Kalman Gain):

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (2.10)$$

Cập nhật trạng thái và hiệp phương sai:

$$\text{Cập nhật trạng thái: } \hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k y_k \quad (2.11)$$

$$\text{Cập nhật hiệp phương sai: } P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (2.12)$$

- Ưu điểm và nhược điểm của bộ lọc EKF:

➤ **Ưu điểm:**

- Xử lý được hệ thống phi tuyến thông qua việc tuyến tính hóa.
- Kế thừa từ bộ lọc Kalman bằng cách thêm tính toán Jacobian.

➤ **Nhược điểm:**

▪ Nếu hệ thống phi tuyến mạnh, việc xấp xỉ bằng Jacobian bậc nhất có thể gây sai số lớn, dẫn đến ước lượng kém chính xác.

▪ Với các hệ thống phức tạp, việc tính Jacobian tốn nhiều chi phí tính toán. Nếu mô hình có điểm gãy, đạo hàm Jacobian có thể không chính xác, dẫn đến phân kỳ bộ lọc.

- Nhạy cảm với sai số mô hình và nhiễu đo.
- EKF chỉ chính xác khi hệ thống gần tuyến tính quanh điểm ước lượng.

Nếu phi tuyến mạnh, có thể dùng bộ lọc UKF (Unscented Kalman Filter) thay thế.

2.1.2. Bộ lọc UKF

Bộ lọc UKF là bộ lọc được phát triển để khắc phục những hạn chế của bộ lọc Kalman và bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) trong các hệ thống phi tuyến. Thay vì tuyến tính hóa mô hình như EKF, UKF sử dụng phép biến đổi Unscented (UT) để xấp xỉ phân bố xác suất của các biến ngẫu nhiên, từ đó cải thiện độ chính xác và tính ổn định của bộ lọc. Không giống như phương pháp tuyến tính hóa bằng ma trận Jacobian (có thể gây ra sai số lớn trong các hệ phi tuyến mạnh), UT sử dụng các điểm sigma để đại diện cho phân bố xác suất, giúp giữ lại các thông tin phi tuyến bậc cao và giảm thiểu sai số.

- *Phép biến đổi Unscented (UT)*: Cho biến ngẫu nhiên x có trung bình $\hat{x}$, hiệp phương sai P_x và hàm phi tuyến $y = f(x)$, cần tìm trung bình $\hat{y}$ và hiệp phương sai P_y của y . Giải pháp của UT: Chọn một tập hợp các điểm sigma đại diện cho phân phối của x . Lan truyền từng điểm sigma qua hàm $f(x)$. Tính toán trung bình và hiệp phương sai mới từ các điểm đã biến đổi.

- *Các bước thực hiện của biến đổi UT*:

➤ Chọn điểm sigma: Với biến ngẫu nhiên x có chiều n , ta chọn $2n+1$ điểm sigma như sau:

$$\begin{cases} \chi_0 = \hat{x} \\ \chi_i = \hat{x} + (\sqrt{(n+\lambda)P_x})_i, i=1,2,\dots,n \\ \chi_{i+n} = \hat{x} - (\sqrt{(n+\lambda)P_x})_i, i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (2.13)$$

Trong đó:

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n \quad (2.14)$$

α : điều chỉnh khoảng cách điểm sigma (thường $10^{-3} \leq \alpha \leq 1$).

κ : tham số điều chỉnh, thường chọn $\kappa = 3 - n$.

Ví dụ: Nếu $x \in \mathbb{R}^2$ (2 chiều), ta có 5 điểm sigma: Điểm trung tâm χ_0 ; 2 điểm dương χ_1, χ_2 ; 2 điểm âm χ_3, χ_4 .

➤ *Gán trọng số cho điểm sigma*

Mỗi điểm sigma có 2 loại trọng số:

- Trọng số cho trung bình ($W_i^{(m)}$) dùng để tính $\hat{y}$.

$$\begin{cases} W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n + \lambda} \\ W_i^{(m)} = \frac{1}{2(n + \lambda)} \quad i = 1, 2, \dots, 2n \end{cases} \quad (2.15)$$

- Trọng số cho hiệp phương sai ($W_i^{(c)}$) dùng để tính P_y .

$$\begin{cases} W_0^{(c)} = W_0^{(m)} + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^{(c)} = W_i^{(m)} \end{cases} \quad (2.16)$$

Trong đó α, β là các tham số đầu vào của phép biến đổi.

β : phản ánh thông tin tiên nghiệm (với phân phối Gaussian, chọn $\beta=2$).

➤ Lan truyền điểm Sigma qua hàm phi tuyến

$$Y_i = f(X_i), i = 0, \dots, 2n \quad (2.17)$$

➤ Tính trung bình và hiệp phương sai mới

- Trung bình ước lượng:

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Y_i \quad (2.18)$$

- Hiệp phương sai ước lượng:

$$P_y = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (Y_i - \hat{y})(Y_i - \hat{y})^T + Q \quad (2.19)$$

Trong đó: Q là ma trận nhiễu quá trình.

- Một số điểm chú ý khi triển khai UT:

Chọn tham số α, β : nếu α nhỏ $\rightarrow$ điểm sigma tập trung gần trung bình (phù hợp hệ ít nhiễu), nếu α lớn $\rightarrow$ điểm sigma trải rộng (phù hợp hệ nhiễu nhiều).

Tính căn ma trận hiệp phương sai: Dùng phân rã Cholesky $P = LL^T$ để tính $\sqrt{P}$ (Phân rã Cholesky là công cụ mạnh để tính căn ma trận hiệp phương sai trong UKF, tăng tốc độ tính toán).

- Các giai đoạn của thuật toán UKF như sau: Với trạng thái khởi đầu: $\hat{x}_0$ và Hiệp phương sai ban đầu: P_0 .

➤ Giai đoạn dự đoán:

- Chọn điểm sigma:

$$\chi_{k-1} = [\hat{x}_{k-1}, \hat{x}_{k-1} \pm \sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}] \quad (2.20)$$

- Lan truyền qua mô hình động học:

$$\chi_k^* = f(\chi_{k-1}, u_k) \quad (2.21)$$

u_k : là vector điều khiển tại thời điểm k .

- Tính trạng thái dự đoán:

$$\hat{x}_k^- = \sum W_i \chi_k^* \quad (2.22)$$

- Tính hiệp phương sai dự đoán:

$$P_k^- = \sum W_i (\chi_k^* - \hat{x}_k^-)(\chi_k^* - \hat{x}_k^-)^T + Q_k \quad (2.23)$$

Q_k : Hiệp phương sai nhiễu quá trình.

➤ *Giai đoạn cập nhật:*

- Lan truyền sigma điểm qua mô hình đo lường:

$$\mathcal{Y}_k = h(\chi_k^*) \quad (2.24)$$

- Dự đoán đo lường:

$$\hat{y}_k^- = \sum W_i \mathcal{Y}_k \quad (2.25)$$

- Tính hiệp phương sai chéo:

$$P_{xy} = \sum W_i (\chi_k^* - \hat{x}_k^-)(\mathcal{Y}_k - \hat{y}_k^-)^T \quad (2.26)$$

- Tính hiệp phương sai đo lường:

$$P_{yy} = \sum W_i (\mathcal{Y}_k - \hat{y}_k^-)(\mathcal{Y}_k - \hat{y}_k^-)^T + R_k \quad (2.27)$$

R_k : Hiệp phương sai nhiễu đo lường.

- Độ lợi Kalman (Kalman Gain):

$$K_k = P_{xy} P_{yy}^{-1} \quad (2.28)$$

- Cập nhật trạng thái và hiệp phương sai:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{y}_k^-) \quad (2.29)$$

$$P_k = P_k^- - K_k P_{yy} K_k^T \quad (2.30)$$

z_k : Giá trị đo thực tế tại thời điểm k .

- Ưu điểm và nhược điểm của bộ lọc UKF:

➤ **Ưu điểm:**

- Không cần tính Jacobian nên tránh sai số do tuyến tính hóa.
- Chính xác hơn với hệ phi tuyến mạnh: UKF sử dụng các điểm sigma để truyền thông tin qua mô hình phi tuyến, giữ lại được các thành phần bậc cao của quá trình biến đổi.

➤ **Nhược điểm:**

- Tính toán phức tạp hơn EKF do số lượng điểm sigma tăng theo chiều trạng thái $(2n+1)$.
- Nếu hệ thống có tính phi tuyến rất phức tạp (ví dụ: chuyển động hỗn loạn). Khi đó phải dùng đến bộ lọc phân tử (Particle Filter) để xử lý.

2.1.3. Bộ lọc phân tử (Particle Filter)

Bộ lọc phân tử là bộ lọc tổng quát nhất, có thể áp dụng cho hệ thống phi tuyến và nhiễu phi Gaussian [8].

$$x_k = f_k(x_{k-1}, w_{k-1}) \quad (2.31)$$

$$z_k = h_k(x_k, v_k) \quad (2.32)$$

Trong đó f_k là hàm phi tuyến của trạng thái x_{k-1} , z_k là hàm phi tuyến của trạng thái x_k , w_{k-1} , v_k là nhiễu hệ thống và nhiễu đo lường phi Gaussian.

Bộ lọc phân tử sử dụng kỹ thuật Monte Carlo để xấp xỉ phân phối xác suất hậu nghiệm của trạng thái hệ thống thông qua tập hợp các “hạt” có trọng số.

Thuật toán lấy mẫu quan trọng tuần tự (SIS):

Thuật toán lấy mẫu quan trọng tuần tự là một phương pháp Monte Carlo. Ý tưởng chính của thuật toán là biểu diễn hàm mật độ hậu nghiệm bằng một tập các mẫu ngẫu nhiên kết hợp với trọng số để tính toán ước lượng dựa trên các mẫu và trọng số này. Khi số lượng mẫu đủ lớn nó sẽ biểu diễn gần đúng hàm mật độ xác suất hậu nghiệm, bộ lọc tối ưu khi số mẫu trở lên cực lớn (tiến đến vô cùng).

Để phát triển chi tiết của thuật toán, giả sử $\{x_{0:k}^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}$ là một đại lượng ngẫu nhiên đặc trưng cho hàm mật độ xác suất (pdf) hậu nghiệm $p(x_{0:k} | z_{1:k})$. Trong đó

$\{x_{0:k}^i, i=0, \dots, N_s\}$ là một tập hợp các điểm mẫu với các trọng số kết hợp $\{w_k^i, i=0, \dots, N_s\}$ và $x_{0:k} = \{x_j, j=0, \dots, k\}$ là tập hợp của tất cả các trạng thái từ thời điểm 0 đến thời điểm k . Các trọng số được chuẩn hóa sao cho $\sum_i w_k^i = 1$.

Khi đó, hàm mật độ hậu nghiệm tại k có thể được xấp xỉ là:

$$p(x_{0:k} | z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \delta(x_{0:k} - x_{0:k}^i) \quad (2.33)$$

Có thể chứng minh rằng $N_s \rightarrow \infty$, phép xấp xỉ (2.33) tiến đến mật độ hậu nghiệm thực $p(x_k | z_{1:k})$.

Các trọng số được chọn theo nguyên lý lấy mẫu quan trọng. Theo [8] thì trọng số w^i xấp xỉ như sau:

$$w^i \propto w_{k-1}^i \frac{p(z_k | x_k^i) p(x_k^i | x_{k-1}^i)}{q(x_k^i | x_{k-1}^i, z_k)} \quad (2.34)$$

Trong đó:

w_{k-1}^i : trọng số tại thời điểm $k-1$.

$p(z_k | x_k^i)$: hàm quan sát, biểu diễn xác suất thu được đo lường z_k nếu biết trạng thái thực là x_k^i .

$p(x_k^i | x_{k-1}^i)$: hàm chuyển trạng thái, biểu diễn xác suất trạng thái chuyển từ x_{k-1}^i sang x_k^i theo mô hình hệ thống.

$q(x_k^i | x_{k-1}^i, z_k)$: hàm mật độ quan trọng dùng để sinh mẫu tại thời điểm k .

Vấn đề suy thoái trọng số:

Một vấn đề phổ biến trong bộ lọc phần tử là hiện tượng suy thoái trọng số, sau một vài vòng lặp, hầu hết các hạt có trọng số rất nhỏ, chỉ một số ít có trọng số đáng kể, dẫn đến hiện tượng suy thoái. Điều này dẫn đến lãng phí tài nguyên tính toán vì các hạt với trọng số không đáng kể gần như không đóng góp vào xấp xỉ phân bố hậu nghiệm $p(x_k | z_{1:k})$.

Một chỉ số quan trọng để đánh giá mức độ suy thoái là kích thước mẫu hiệu quả N_{eff} .

$$N_{eff} = \frac{N_s}{1 + Var(w_k^{*i})} \quad (2.35)$$

ở đây: $w_k^{*i} = p(x_k^i | z_{1:k}) / q(x_k^i | x_{k-1}^i, z_k)$ được gọi là trọng số thực. Giá trị này không thể đánh giá chính xác mà có thể ước lượng $\hat{N}_{eff}$ của N_{eff} như sau:

$$\hat{N}_{eff} = \frac{1}{\sum_i^{N_s} (w_i^k)^2} \quad (2.36)$$

Trong đó w_i^k là trọng số chuẩn hóa nhận được từ (2.34). Lưu ý rằng, $N_{eff} \leq N_s$ và N_{eff} nhỏ cho thấy hiện tượng suy thoái nghiêm trọng.

Phương pháp giảm thiểu suy thoái: Vấn đề suy thoái là một hệ quả không mong muốn trong bộ lọc phần tử. Phương pháp đơn giản sử dụng một số lượng lớn N_s , tuy nhiên điều này thường không khả thi. Do đó, sử dụng hai phương pháp: lựa chọn đúng hàm mật độ quan trọng và lấy mẫu lại.

➤ Lựa chọn đúng hàm mật độ quan trọng

Lựa chọn hàm mật độ quan trọng $q(x_k | x_{k-1}^i, z_k)$ sao cho phương sai của trọng số thực $Var(w_k^{*i})$ được tối thiểu hóa, từ đó làm tối đa hóa số hạt hiệu dụng N_{eff} .

Hàm mật độ quan trọng tối ưu – tức là hàm làm giảm thiểu phương sai của các trọng số thực w_k^{*i} khi đã biết x_{k-1}^i và z_k là:

$$q(x_k | x_{k-1}^i, z_k)_{opt} = p(x_k | x_{k-1}^i, z_k) = \frac{p(z_k | x_k | x_{k-1}^i) p(x_k | x_{k-1}^i)}{p(z_k | x_{k-1}^i)} \quad (2.37)$$

Trọng số của các hạt được xấp xỉ như sau:

$$w^i \propto w_{k-1}^i p(z_k | x_{k-1}^i) = w_{k-1}^i \int p(z_k | x_k^i) p(x_k^i | x_{k-1}^i) dx_k^i \quad (2.38)$$

Việc lựa chọn hàm mật độ quan trọng này là tối ưu, vì với một x_{k-1}^i cho trước, mọi trọng số w_k^i đều nhận cùng một giá trị, bất kể mẫu nào được lấy từ $q(x_k | x_{k-1}^i, z_k)_{opt}$. Điều này có nghĩa là phương sai của các trọng số sinh ra từ các mẫu khác nhau là bằng không $Var(w_k^{*i}) = 0$.

Tuy nhiên, hàm mật độ quan trọng tối ưu có hai nhược điểm đáng kể:

- Yêu cầu khả năng lấy mẫu từ $p(x_k | x_{k-1}^i, z_k)$.
- Cần tính toán tích phân trên toàn không gian trạng thái mới.

Trong trường hợp tổng quát, cả hai yêu cầu trên đều khó có thể thực hiện được. Tuy nhiên, tồn tại một số trường hợp cụ thể trong đó hàm mật độ quan trọng tối ưu có thể được áp dụng:

- Trạng thái x_k là một phần tử của một tập hợp hữu hạn. Khi đó, (2.38) trở thành tổng hữu hạn, việc lấy mẫu từ $p(x_k | x_{k-1}^i, z_k)$ là khả thi. Ví dụ hệ thống tuyến tính Jump-Markov để theo dõi mục tiêu cơ động (có chuyển động phức tạp) được lọc bằng bộ lọc phần tử, còn trạng thái liên tục được xử lý bằng bộ lọc Kalman có điều kiện.

- Phân phối hậu nghiệm là Gaussian:

Điều này xảy ra khi động học của hệ thống là phi tuyến nhưng mô hình đo lường là tuyến tính, được mô tả như sau:

$$x_k = f_k(x_{k-1}) + v_{k-1} \quad (2.39)$$

$$z_k = H_k x_k + n_k \quad (2.40)$$

Trong đó:

$v_{k-1} \sim N(v_{k-1}; 0; Q_{k-1})$ – nhiễu quá trình có phân phối Gaussian độc lập với phương sai Q_{k-1} .

$n_k \sim N(n_k; 0; R_k)$ – nhiễu đo lường cũng là Gaussian độc lập với phương sai R_k .

$f_k: \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}^{n_x}$ là một hàm phi tuyến.

$H_k \in \mathbb{R}^{n_z \times n_x}$ là ma trận quan sát.

Định nghĩa:

$$\sum_k^{-1} = Q_{k-1}^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k \quad (2.41)$$

$$m_k = \sum_k (Q_{k-1}^{-1} f_k(x_{k-1}) + H_k^T R_k^{-1} z_k) \quad (2.42)$$

Từ đó, ta có thể biểu diễn phân phối hậu nghiệm của x_k như sau:

$$p(x_k | x_{k-1}, z_k) = N(x_k; m_k, \sum_k) \quad (2.43)$$

Và

$$p(z_k | x_{k-1}) = N(z_k; H_k f_k(x_{k-1}), Q_{k-1} + H_k R_k H_k^T) \quad (2.44)$$

Trong nhiều mô hình phức tạp khác, việc đánh giá giải tích như trên không khả thi. Khi đó, có thể xây dựng xấp xỉ dưới mức tối ưu bằng các kỹ thuật như tuyến tính hóa cục bộ hoặc sử dụng phép biến đổi Unscented để xấp xỉ phân phối $p(x_k | x_{k-1}, z_k)$ bằng một phân phối Gaussian.

Vì thế, việc lựa chọn hàm mật độ quan trọng là phân phối tiên nghiệm thường được sử dụng:

$$q(x_k | x_{k-1}^i, z_k) = p(x_k | x_{k-1}^i) \quad (2.45)$$

Thay thế (2.34), ta được:

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i p(z_k | x_k^i) \quad (2.46)$$

Phương pháp này được sử dụng phổ biến vì trực quan và dễ triển khai.

► Lấy mẫu lại

Thực hiện tái lấy mẫu mỗi khi phát hiện suy thoái đáng kể, tức là khi N_{eff} giảm xuống dưới một ngưỡng N_T . Ý tưởng cơ bản của tái lấy mẫu là loại bỏ các hạt có trọng số nhỏ và tập trung vào các hạt có trọng số lớn.

Quá trình tái lấy mẫu bao gồm việc tạo ra một tập mới $\{x_k^{i*}\}_{i=1}^{N_s}$ bằng cách lấy mẫu lại N_s lần từ một biểu diễn rời rạc xấp xỉ của $p(x_k | z_{1:k})$ được cho bởi:

$$p(x_k | z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad (2.47)$$

sao cho $\Pr(x_k^{i*} = x_k^j) = w_k^j$. Do đó, Sau quá trình tái lấy mẫu, các trọng số được thiết lập lại bằng $w_k^i = 1 / N_s$.

Các phương pháp lấy mẫu lại:

Tái lấy mẫu hệ thống: Đơn giản, dễ cài đặt, hiệu quả trong giảm biến động Monte Carlo, Độ phức tạp tính toán thấp $O(N_s)$, phù hợp cho hệ thống thời gian thực.

Tái lấy mẫu phân tầng và tái lấy mẫu dư: hiệu quả trong việc giảm phương sai.

Hạn chế của quá trình tái lấy mẫu:

Hạn chế khả năng xử lý song song: Đòi hỏi phải kết hợp tất cả các hạt, làm giảm khả năng xử lý song song.

Ngheo hóa mẫu: Các hạt có trọng số cao được chọn nhiều lần, dẫn đến mất tính đa dạng. Vấn đề này đặc biệt nghiêm trọng khi nhiều quá trình nhỏ. Trong trường hợp nhiều rất nhỏ, tất cả các hạt có thể hội tụ về một điểm duy nhất chỉ sau vài vòng lặp

Thuật toán bộ lọc phần tử cơ bản: Với điều kiện hàm mật độ quan trọng $q(.)$ được chọn là phân phối tiên nghiệm $q(.) = p(x_k | x_{k-1}^i)$

- Khởi tạo N_s các hạt $[\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}]$
- FOR $i = 1 : N_s$

Tạo x_k^i từ phân phối tiên nghiệm $p(x_k | x_{k-1}, z_k) = N(x_k; m_k, \Sigma_k)$

$$x_k^i \sim p(x_k | x_{k-1}^i), i = 1, \dots, N_s \quad (2.48)$$

Tính trọng số w_k^i khi nhận được giá trị đo lường z_k .

$$w_k^i = w_{k-1}^i p(z_k | x_k^i) \quad (2.49)$$

- END FOR
- Tính tổng các trọng số $t = SUM[\{w_k^i\}_{i=1}^{N_s}]$ (2.50)
- FOR $i = 1 : N_s$

$$\text{Chuẩn hóa trọng số } w_k^i = t^{-1} w_k^i, i = 1, \dots, N_s \quad (2.51)$$

- END FOR
- Đánh giá mức độ suy giảm trọng số $\hat{N}_{eff}$.

$$\hat{N}_{eff} = \frac{1}{\sum_i (w_i^k)^2} \quad (2.52)$$

- IF $\hat{N}_{eff} < N_T$
- Thực hiện lấy mẫu lại: $[\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}] = RESAMPLE[\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^{N_s}]$

- END IF

$$\text{Trạng thái ước lượng } x_k = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i x_k^i \quad (2.53)$$

Thuật toán lấy mẫu lại hệ thống:

- Khởi tạo CDF: $c_1 = 0$

- FOR $i = 2 : N_s$

$$\text{Xây dựng CDF } c_i = c_{i-1} + w_i^k \quad (2.54)$$

- END FOR

- Tạo $u_1 \sim U[0, N_s^{-1}]$ và bắt đầu $i = 1$

- FOR $j = 1 : N_s$

$$u_j = u_1 + N_s^{-1}(j-1) \quad (2.55)$$

- WHILE $u_j > c_i$

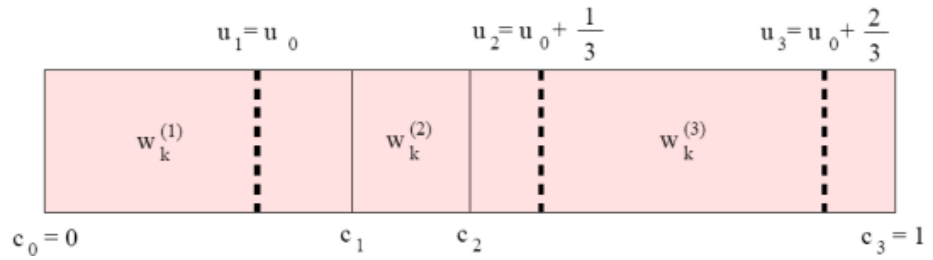
$$i = i + 1 \quad (2.56)$$

- END WHILE

$$\text{gán } x_k^{j*} = x_k^i \quad (2.57)$$

$$\text{gán } w_k^j = N_s^{-1}; i^j = i \quad (2.58)$$

- END FOR



Hình 6: Thuật toán lấy mẫu lại hệ thống với 3 mẫu

Hình 6 thể hiện thuật toán lấy mẫu lại hệ thống với 3 mẫu $\{x_k^{(i)}, \hat{w}_k^{(i)}; i = 1, 2, 3\}$, vị trí các đường gạch chấm là vị trí của các điểm được chọn ngẫu nhiên trong miền giá trị $[0, 1]$ của hàm CDF. Ta nhận thấy, phép toán lấy mẫu lại hệ thống chính là chọn các hạt có đường gạch chấm đi qua. Như ví dụ trong hình, ta chọn các hạt $\{x_k^{(1)}, x_k^{(3)}, x_k^{(3)}\}$ và trọng số các hạt là $\hat{w}_k^{(1)} = \hat{w}_k^{(2)} = \hat{w}_k^{(3)} = N_s^{-1}$.

- Ưu điểm và nhược điểm của bộ lọc phân tử:

➤ **Ưu điểm:**

- Hiệu quả với các hệ thống có mô hình động học hoặc quan sát phi tuyến phức tạp, không yêu cầu giả định phân phối Gauss như bộ lọc Kalman.

- Khi số lượng hạt đủ lớn, có thể xấp xỉ chính xác phân phối hậu nghiệm.

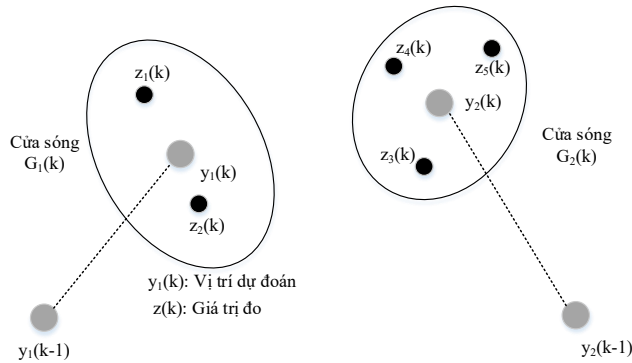
➤ **Nhược điểm:**

- Yêu cầu tính toán lớn khi số hạt tăng lên.
- Vấn đề suy thoái trọng số nên cần lấy mẫu lại dẫn đến mất tính đa dạng trong quỹ đạo.

2.2. Thuật toán tương quan

Đối với bài toán theo dõi mục tiêu đơn, thuật toán lọc có thể bám sát quỹ đạo chuyển động của mục tiêu một cách hiệu quả. Dựa trên mô hình chuyển động để dự đoán vị trí tiếp theo của mục tiêu, sau đó kết hợp với dữ liệu đo được để hiệu chỉnh kết quả dự đoán, từ đó đưa ra ước lượng chính xác.

Tuy nhiên, khi theo dõi nhiều mục tiêu cùng lúc, việc xác định các điểm dữ liệu thu được tương ứng với quỹ đạo nào trở nên phức tạp. Do không thể biết liệu các điểm dữ liệu này thuộc về một quỹ đạo đã có hay là một quỹ đạo mới. Đây chính là nhiệm vụ của thuật toán tương quan để xác định dữ liệu đo thuộc về quỹ đạo nào.



Hình 7: Tương quan giá trị đo – quỹ đạo

Hình 7 thể hiện tại thời điểm $k-1$ có hai quỹ đạo $y_1(k-1)$, $y_2(k-1)$. Tại thời điểm k hai quỹ đạo này được dự đoán điểm $y_1(k)$ và $y_2(k)$, tương ứng với cửa sóng $G_1(k)$, $G_2(k)$. Giả sử, tại thời điểm k nhận được 5 giá trị đo $z_1(k) \rightarrow z_5(k)$, trong đó $z_1(k)$, $z_2(k)$ nằm trong cửa sóng của quỹ đạo $y_1(k)$; $z_3(k)$, $z_4(k)$, $z_5(k)$ nằm trong cửa

sóng của quỹ đạo $y_2(k)$. Để giải quyết bài toán một cửa sóng có nhiều giá trị đo thì có thể áp dụng thuật toán tương quan GNN (Global Nearest Neighbor) và thuật toán JPDA (Joint Probabilistic Data Association).

2.2.1. Thuật toán tương quan GNN

Thuật toán GNN (Global Nearest Neighbor) là phương pháp để giải quyết bài toán tương quan dữ liệu trong theo dõi đa mục tiêu. Ý tưởng chính là gán các đo lường với các quỹ đạo sao cho tổng chi phí gán là nhỏ nhất [3].

Giả sử, tại thời điểm k có n quỹ đạo với trạng thái dự đoán $\hat{x}_i(k), i = 1, \dots, n$ (sử dụng trạng thái của bộ lọc) và có m điểm đo lường $z_j(k), j = 1, \dots, m$. Khoảng cách thống kê Mahalanobis giữa điểm đo và quỹ đạo được xác định như sau:

$$c_{ij} = d_{ij}^2 = (z_k^j - \hat{x}_k^i)^T S^{-1} (z_k^j - \hat{x}_k^i) \leq G \quad (2.59)$$

Ngưỡng G : là giá trị hằng số được lấy theo bảng phân phối xác suất Chi-Square (χ^2) có bậc theo số chiều của vector đo lường.

Sử dụng phương pháp Hungaria, để tìm phép gán tối ưu sao cho chi phí gán là nhỏ nhất.

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} a_{ij} \text{ thỏa mãn } \begin{cases} \sum_j^m a_{ij} \leq 1 & i = 1, \dots, n \\ \sum_i^n a_{ij} \leq 1 & j = 1, \dots, m \end{cases} \quad (2.60)$$

$a_{ij} = 1$ nếu điểm đo lường j được gán với quỹ đạo i , và $a_{ij} = 0$ nếu điểm đo lường j không được gán với quỹ đạo i . Bảng 3 thể hiện giá trị tương quan m điểm dấu – n quỹ đạo.

Bảng 3: Giá trị tương quan điểm dấu – quỹ đạo

Track\Plot	z_1	z_2	z_3		z_m
T_1	c_{11}	c_{12}	c_{13}		c_{1m}
T_2	c_{21}	c_{22}	c_{23}		c_{2m}
T_3	c_{31}	c_{32}	c_{33}		c_{3m}
....		...	...		

Track\Plot	z_1	z_2	z_3		z_m
T_n	c_{n1}	c_{n2}	c_{n3}		c_{nm}

Phương pháp Hungaria

Bài toán Hungaria là một bài toán tối ưu hóa trong đó mỗi công việc phải được gán cho một người làm việc, và mỗi người làm việc chỉ được gán cho một công việc. Mỗi công việc có một chi phí khác nhau để thực hiện bởi các người làm việc khác nhau, và bài toán Hungaria tìm cách gán các công việc cho các người làm việc sao cho tổng chi phí là nhỏ nhất.

Giả sử có n công nhân và n công việc, mỗi công nhân thực hiện một công việc sẽ có chi phí khác nhau. Vậy phải sắp xếp công việc cho các công nhân như thế nào để có chi phí nhỏ nhất. Như vậy đầu vào là ma trận chi phí C kích thước $n \times n$ với $C_{ij} \geq 0$, đầu ra phép gán tối ưu sao cho tổng chi phí $\sum_{i=1}^n C_{i\pi(i)}$ là nhỏ nhất ($C_{i\pi(i)}$ chi phí khi gán công nhân i thực hiện công việc $\pi(i)$) phương pháp Hungaria sẽ bao gồm 6 bước như sau:

Bước 1: Với mỗi hàng của ma trận chi phí C kích thước $(n \times n)$ tìm phần tử nhỏ nhất. Trừ tất cả phần tử trong hàng đó cho giá trị nhỏ nhất này, mục đích tạo ra ít nhất một phần tử 0 trên mỗi hàng.

Bước 2: Nếu trên một cột không có phần tử 0 nào, tìm phần tử nhỏ nhất của cột đó và trừ tất cả phần tử trong cột cho giá trị này. Mục đích đảm bảo mỗi cột có ít nhất một phần tử 0.

Bước 3: Sử dụng thuật toán DFS (Depth First Search – tìm kiếm theo chiều sâu) để đánh dấu 0^* tối ưu. Mục đích, tìm cách gán sao cho mỗi hàng và mỗi cột chỉ có một 0^* duy nhất.

Bước 4: Che tất cả tất cả các cột có 0^* . Nếu số đường che bằng n thì kết thúc.

Bước 5: Tạo thêm số 0 mới:

Tìm phần tử 0 chưa bị che, đánh dấu $0'$. Nếu có 0^* nằm cùng hàng, che hàng đó đi và bỏ che cột có 0^* . Tiếp tục cho đến khi tất cả phần tử 0 đều bị che.

Tìm phần tử nhỏ nhất không bị che, trừ các phần tử không bị che cho giá trị này. Cộng giá trị này vào các phần tử bị che hai lần (giao của hàng và cột bị che). Xóa các dấu 0^* và $0'$, quay lại bước 3.

Bước 6: Khi số 0^* bằng n , mỗi 0^* tương ứng với một cặp công nhân – công việc tối ưu. Tổng chi phí nhỏ nhất chính là tổng các phần tử trong ma trận gốc tương ứng với vị trí của các 0^* .

Ví dụ về phương pháp Hungaria:

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	1	2	3
W_2	2	4	6
W_3	3	6	9

Ban đầu

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	0	1	2
W_2	0	2	4
W_3	0	3	6

Bước 1

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	0	0	0
W_2	0	1	2
W_3	0	2	4

Bước 2

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	0	0^*	0
W_2	0^*	1	2
W_3	0	2	4

Bước 3

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	0	0^*	0
W_2	0^*	1	2
W_3	0	2	4

Bước 4

(2 cột được che, chuyển bước 5)

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	0	0^*	$0'$
W_2	0^*	1	2
W_3	0	2	4

Bước 5

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	1	0	0^*
W_2	0	0^*	1
W_3	0^*	1	3

Bước 3

C_{ij}	J_1	J_2	J_3
W_1	1	0	0^*
W_2	0	0^*	1
W_3	0^*	1	3

Bước 4

(3 cột được che. Kết thúc)

Vậy cách sắp xếp công nhân – công việc tối ưu là: $\{W_1, J_3\}, \{W_2, J_2\}, \{W_3, J_1\}$, với tổng chi phí thấp nhất là: $C = 3 + 4 + 3 = 10$.

Ưu điểm và nhược điểm của thuật toán tương quan GNN

➤ Ưu điểm:

- Thời gian thực hiện nhanh: GNN sử dụng phương pháp tìm điểm gần nhất toàn cục, giúp giảm độ phức tạp tính toán.

- Độ chính xác cao trong môi trường ít nhiễu: Khi không có nhiễu nhiễu hoặc mục tiêu giả, thuật toán cho kết quả gán điểm đo và quỹ đạo chính xác, duy trì tốt quá trình bám.

➤ Nhược điểm:

- Dễ bị sai lệch trong môi trường có nhiễu: Khi xuất hiện nhiễu, thuật toán có thể gán nhầm các giá trị đo của nhiễu vào quỹ đạo. Điều này gây ra sai lệch trong việc theo dõi mục tiêu.

- Không xét đến nhiễu giả thuyết: GNN chỉ chọn một cặp điểm đo-quỹ đạo gần nhất, bỏ qua khả năng tồn tại các phép gán hợp lý khác, dẫn đến giảm độ tin cậy trong môi trường nhiễu phức tạp.

2.2.2. Thuật toán tương quan JPDA

Thuật toán Joint Probabilistic Data Association (JPDA) được phát triển nhằm giải quyết bài toán liên kết các đo lường với nhiễu mục tiêu trong môi trường có nhiễu. Không giống như các phương pháp liên kết dữ liệu khác như GNN, JPDA hoạt động dựa trên nguyên lý xác suất, trong đó tất cả các phép gán hợp lệ giữa các đo lường và mục tiêu đều được xét đến để tính toán xác suất liên kết tương ứng. JPDA phù hợp khi hiện tượng giao thoa giữa các mục tiêu thường xuyên xảy ra [11].

Giả sử một vector phép đo đơn lẻ (ví dụ phương vị/tần số từ cảm biến A) và một cụm các mục tiêu được đánh số $t = 1, \dots, T$ tại thời điểm k . Tập hợp gồm m phép đo liên kết với cụm này (tức là nằm trong cửa sóng của các mục tiêu $1, \dots, T$) được ký hiệu là:

$$Z(k) = \{y_j\}_{j=1}^m \quad (2.61)$$

và tập hợp các phép đo đến thời điểm k là:

$$Z^k = \{Z(k), Z^{k-1}\} \quad (2.62)$$

Biến k sẽ được bỏ qua, ngoại trừ trong $Z(k)$ và Z^k . Mỗi phép đo có thể thuộc về một trong T mục tiêu hoặc thuộc về phép đo nhiễu, được ký hiệu bằng mục tiêu $t = 0$.

Gọi phép đo dự đoán cho mục tiêu t là $\hat{y}^t$, sai lệch tương ứng với phép đo thứ j được định nghĩa là:

$$\tilde{y}_j^t \triangleq y_j - \hat{y}^t \quad (2.62)$$

Ước lượng trạng thái của mục tiêu t được cập nhật trong bộ lọc bằng cách sử dụng sai lệch tổng của trọng số

$$\tilde{y}^t = \sum_{j=1}^m \beta_j^t \tilde{y}_j^t \quad (2.63)$$

Trong đó:

β_j^t : là xác suất hậu nghiệm cho phép đo j xuất phát từ mục tiêu t .

β_0^t : là xác suất không có phép đo nào xuất phát từ mục tiêu t .

JPDA tính toán β_j^t đồng thời cho toàn bộ tập hợp T mục tiêu và nhiễu. Điều này cho phép xét đến cả nhiễu ngẫu nhiên và nhiễu từ các mục tiêu khác, từ đó cải thiện chính xác khi có sự chồng chéo giữa các mục tiêu.

Trọng tâm của thuật toán JPDA là tính toán các xác suất có điều kiện của các sự kiện liên kết sau:

$$\chi = \bigcap_{j=1}^m \chi_{jt_j} \quad (2.64)$$

Trong đó: χ_{jt_j} là sự kiện phép đo j xuất phát từ mục tiêu t_j với $(0 \leq t_j \leq T)$, $t_j = 0$ tương ứng với phép đo nhiễu.

Các sự kiện khả thi:

Một sự kiện χ được coi là khả thi nếu không có nhiều hơn một phép đo xuất phát từ cùng một mục tiêu, tức là:

$$j \neq l \text{ và } t_j > 0 \text{ thì } t_j \neq t_l \quad (2.65)$$

Để thuận tiện, ta định nghĩa biến nhị phân $\tau_j(\chi)$

$$\tau_j(\chi) \triangleq \begin{cases} 1 & t_j = t \\ 0 & t_j \neq t \end{cases} \quad (2.66)$$

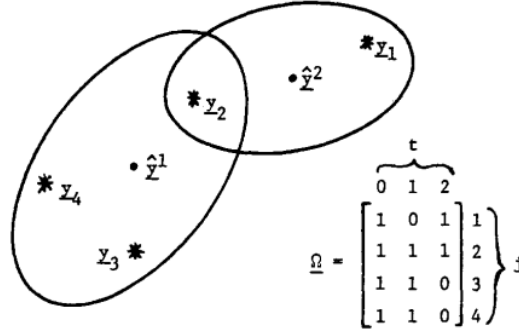
Biến này xác định liệu phép đo j có được liên kết với bất kỳ mục tiêu nào trong sự kiện χ hay không.

Ma trận kiểm định được định nghĩa như sau:

$$\underline{\Omega} = [w_{jt}], j = 1, \dots, m; t = 1, \dots, T \quad (2.67)$$

Trong đó: Các phần tử nhị phân w_{jt} xác định liệu phép đo j có nằm trong cửa sổ của mục tiêu. Chỉ số $t = 0$ đại diện cho trường hợp “không có mục tiêu” và cột

tương ứng của Ω chứa toàn giá trị 1 nghĩa là mọi phép đo đều có thể xuất phát từ nhiều hoặc báo động giả. Hình 8 mô tả một tập hợp các cửa sóng mục tiêu và ma trận kiểm định tương ứng.



Hình 8: Cửa sóng và ma trận kiểm định

Mỗi sự kiện liên kết χ có thể được biểu diễn bằng một ma trận:

$$\hat{\Omega}(\chi) = [\hat{w}_{jt}(\chi)] \quad (2.68)$$

Ma trận này bao gồm các phần tử đơn vị từ Ω tương ứng với các liên kết được giả định trong sự kiện χ . Các phần tử của ma trận được xác định:

$$\hat{w}_{jt}(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{if } \chi_{jt} \text{ occurs} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.69)$$

Chỉ số liên kết phép đo $\tau_j(\chi)$: Cho biết phép đo j có được gán cho mục tiêu thực ($t > 0$) trong sự kiện χ hay không:

$$\tau_j(\chi) = \sum_{t=1}^T \hat{w}_{jt}(\chi) \quad (2.70)$$

Chỉ số mục tiêu δ_t : Xác định mục tiêu t có nhận được phép đo nào trong sự kiện χ hay không.

$$\delta_t = \sum_{j=1}^m \hat{w}_{jt}(\chi) \quad (2.71)$$

Xác suất liên kết trong JPDA:

Theo quy tắc Bayes, xác suất của một sự kiện liên kết χ khi biết tất cả các phép đo đến thời điểm hiện tại được tính bằng:

$$P\{\chi | Z^k\} = \frac{1}{c} p[Z(k) | \chi, Z^{k-1}] P\{\chi | Z^{k-1}\} \quad (2.72)$$

Trong đó:

- c: Hằng số chuẩn hóa, được tính bằng cách lấy tổng về phải cho tất cả các χ .
- $p[Z(k) | \chi, Z^{k-1}]$: Xác suất của các phép đo hiện tại khi biết sự kiện χ và các phép đo trước đó.
- $P\{\chi | Z^{k-1}\}$ Xác suất tiên nghiệm của sự kiện χ .

Thành phần đầu tiên trong (2.72):

$$p[Z(k) | \chi, Z^{k-1}] = \prod_{j=1}^m p[y_j | \chi_{jt_j}, Z^{k-1}] \quad (2.73)$$

Mật độ xác suất có điều kiện của từng phép đo:

$$p[y_j | \chi_{jt_j}, Z^{k-1}] = \begin{cases} f_{t_j}[y_j] & \text{if } \tau_j(\chi) = 1 \\ V^{-1} & \text{if } \tau_j(\chi) = 0 \end{cases} \quad (2.74)$$

$f_{t_j}[y_j]$: Hàm mật độ xác suất của phép đo dự đoán từ mục tiêu t_j và V là thể tích vùng quan sát.

Thành phần thứ hai phương trình (2.72) $P\{\chi | Z^{k-1}\}$ là xác suất tiên nghiệm tại thời điểm k của một sự kiện liên kết.

Để tính được nó, lưu ý rằng tổng số phép đo sai trong sự kiện χ là:

$$\phi(\chi) = \sum_{j=1}^m [1 - \tau_j(\chi)] \quad (2.75)$$

Số lượng sự kiện χ có cùng tập mục tiêu được phát hiện, được xác định bằng số hoán vị của m phép đo lấy theo $m - \phi(\chi)$

$$P_{m-\phi(\chi)}^m = \frac{m!}{\phi(\chi)!} \quad (2.76)$$

Xác suất tiên nghiệm của sự kiện χ :

$$P\{\chi | Z^{k-1}\} = \frac{1}{m! / \phi!} \prod_{t: \delta_t=1} P_D^t \prod_{t: \delta_t=0} (1 - P_D^t) \frac{e^{-\lambda V} (\lambda V)^\phi}{\phi!} \quad (2.77)$$

Trong đó:

- P_D^t : xác suất phát hiện mục tiêu t .
- $1 - P_D^t$: Xác suất không phát hiện mục tiêu t .

- $\frac{e^{-\lambda V} (\lambda V)^\phi}{\phi!}$: Phân phối Poisson cho ϕ phép đo nhiều.
- λ : mật độ nhiều trung bình.
- V : Thể tích vùng quan sát.

Xác suất hậu nghiệm của sự kiện χ :

Kết hợp (2.73), (2.74) và (2.77) vào (2.72) cho xác suất hậu nghiệm đầy đủ:

$$P\{\chi | Z^k\} = \frac{V^{-\phi}}{c} \prod_{j:\tau_j=1} f_{t_j}[y_j] \frac{\phi!}{m!} \times \prod_{t:\delta_t=1} P_D^t \prod_{t:\delta_t=0} (1-P_D^t) \frac{e^{-\lambda V} (\lambda V)^\phi}{\phi!} \quad (2.78)$$

Theo [11] khi thay hàm mật độ $f_{t_j}[\cdot]$ bằng phân phối Gaussian (2.78) trở thành

$$P\{\chi | Z^k\} = \frac{1}{c} \prod_{j:\tau_j=1} \frac{\exp[-\frac{1}{2}(\tilde{y}_j^{t_j})' S_{t_j}^{-1} (\tilde{y}_j^{t_j})]}{(2\pi)^{l/2} |S_{t_j}|^{1/2}} \times \prod_{t:\delta_t=1} P_D^t \prod_{t:\delta_t=0} (1-P_D^t) \quad (2.79)$$

Trong đó:

- $\tilde{y}_j^{t_j}$: sai lệch đã được định nghĩa ở (2.61).
- S_{t_j} : ma trận hiệp phương sai của độ lệch (sai số dự đoán) của mục tiêu t_j .
- l : là số chiều vector đo.
- $\delta_t = 1$: Chỉ số mục tiêu, cho biết mục tiêu t có nhận được phép đo j .
- $\delta_t = 0$: Cho biết mục tiêu t không nhận được phép đo j .
- $\tau_j = 1$: Chỉ số liên kết phép đo, cho biết phép đo j thuộc về mục tiêu t .

Cập nhật trạng thái ước lượng của mục tiêu t :

Từ (2.63) ước lượng trạng thái của mục tiêu t được cập nhật trong bộ lọc bằng cách sử dụng sai lệch tổng của trọng số:

$$\tilde{y}^t = \sum_{j=1}^m \beta_j^t \tilde{y}_j^t \quad (2.80)$$

Trong đó:

- Xác suất phép đo j thuộc mục tiêu t :

$$\beta_j^t = \sum_{\chi} P\{\chi | Z^k\} \hat{w}_{jt}(\chi), j=1, \dots, m; t=1, \dots, T \quad (2.81)$$

- Xác suất không có phép đo nào thuộc mục tiêu t :

$$\beta_0^t = 1 - \sum_{j=1}^m \beta_j^t; t=1, \dots, T \quad (2.82)$$

Ưu điểm và nhược điểm của thuật toán tương quan JPDA

➤ Ưu điểm:

- Có khả năng loại bỏ nhiễu nhờ cơ chế xác suất, tránh gán nhầm các điểm đo nhiễu vào mục tiêu.
- Phù hợp bài toán các mục tiêu di chuyển gần nhau, JPDA duy trì được khả năng phân biệt nhờ tính toán trọng số xác suất cho từng liên kết.

➤ Nhược điểm:

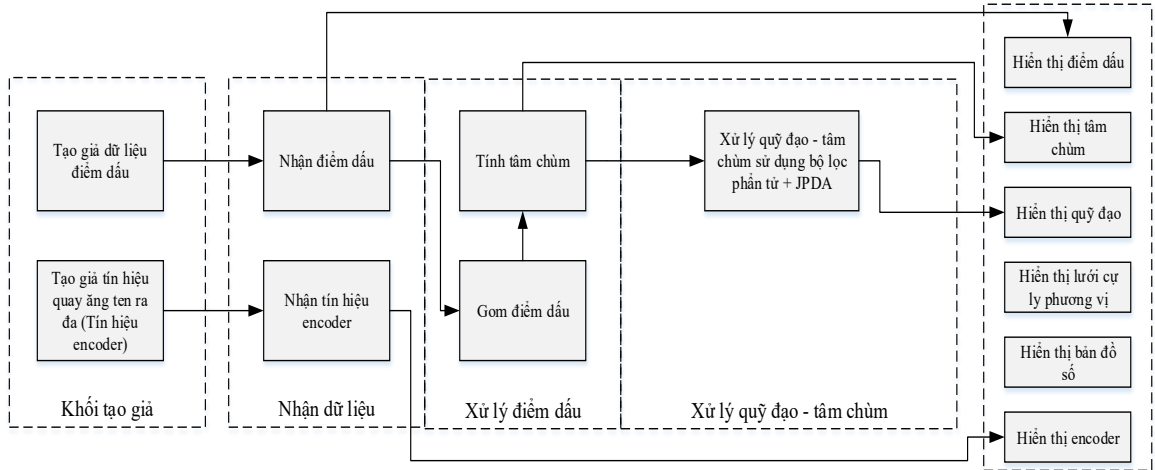
- Độ phức tạp trong tính toán cao do JPDA yêu cầu tính toán xác suất cho tất cả các liên kết có thể giữa đo lường và mục tiêu, dẫn đến chi phí tính toán tăng nhanh khi số mục tiêu hoặc số điểm đo lường lớn. Điều này làm giảm hiệu năng thời gian thực.

Kết luận chương 2:

Chương 2 đã trình bày cơ sở lý thuyết các bộ lọc phi tuyến, bao gồm: Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), bộ lọc UKF và bộ lọc phần tử (Particle Filter), đồng thời đưa ra những ưu điểm và nhược điểm của từng bộ lọc. Bên cạnh đó, chương này cũng giới thiệu thuật toán tương quan GNN và JPDA, đánh giá so sánh hiệu quả của các thuật toán tương quan. Dựa trên kết quả đánh giá, bộ lọc phần tử (Particle Filter) và thuật toán tương quan JPDA được lựa chọn để xây dựng hệ thống theo dõi đa mục tiêu trong ra đa sẽ được trình bày trong chương 3.

Chương 3: THỰC NGHIỆM XÂY DỰNG HỆ THỐNG THEO DÕI ĐA MỤC TIÊU TRONG RA ĐA ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN JPDA VÀ LỌC PHẦN TỬ

3.1. Xây dựng hệ thống



Hình 9: Sơ đồ hệ thống theo dõi mục tiêu ra đa sử dụng JPDA và lọc phần tử

Hình 9 thể hiện sơ đồ hệ thống theo dõi mục tiêu trong ra đa sử dụng JPDA và bộ lọc phần tử. Các thành phần bao gồm:

- Khối tạo giả: thực hiện tạo dữ liệu điểm dấu và tín hiệu quay ăng ten, trong thực tế các dữ liệu này nhận được từ xử lý sơ cấp đài ra đa.

- + Tạo dữ liệu điểm dấu: Mô phỏng mục tiêu trong tạo độ 2D (bao gồm: cự ly, phương vị), các tham số mục tiêu do người dùng cấu hình như: Cự ly, phương vị ban đầu, tham số chuyển động (vận tốc, hướng di chuyển, loại hình chuyển động).

- + Tạo dữ liệu quay ăng ten ra đa: Tạo dữ liệu quay ăng ten với vận tốc 12 vòng/phút và một vòng tròn quan sát 360°.

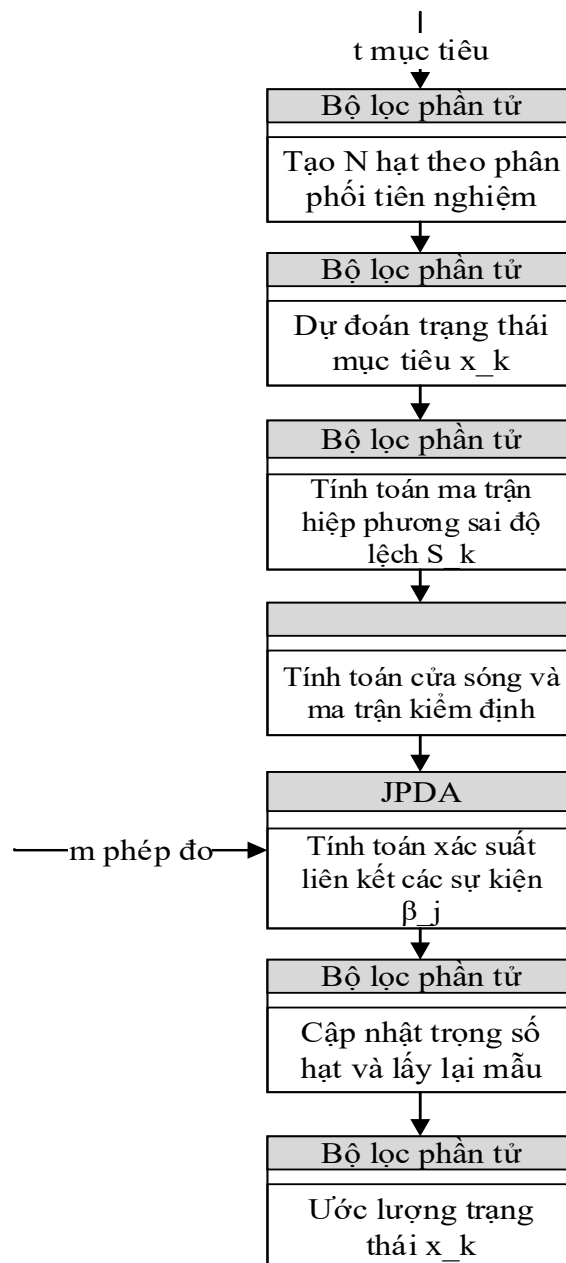
- Khối nhận dữ liệu: Thực hiện nhận dữ liệu từ khối tạo giả (hoặc từ hệ thống thực) bao gồm: điểm dấu mục tiêu, dữ liệu encoder từ hệ thống ăng-ten (xác định hướng hiện tại của ăng-ten).

- Khối xử lý điểm dấu:

- + Gom điểm dấu: Nhóm các điểm dấu gần nhau về không gian và thời gian thành một cụm. Mục tiêu là giảm nhiễu và cô lập thông tin liên quan đến từng mục tiêu.

+ Tính tâm chùm: Từ cụm điểm đầu tính toán tâm chùm để đưa vào khối xử lý quỹ đạo – tâm chùm (sử dụng phương pháp trung bình về phương vị và cự ly).

- Khối xử lý quỹ đạo – tâm chùm: Sử dụng bộ lọc phần tử và kết hợp thuật toán JPDA để khởi tạo quỹ đạo và bám quỹ đạo mục tiêu. Thuật toán xử lý quỹ đạo – tâm chùm được mô tả trong Hình 10.



Hình 10: Sơ đồ thuật toán xử lý quỹ đạo – tâm chùm

- Khối hiển thị:

+ **Hiện thị lưới cự ly – phương vị:** Lưới cự ly bao gồm các vòng tròn đồng tâm cách nhau 10km, cự ly quan sát 300 km. Lưới phương vị bao gồm phương vị từ 0^0 - 360^0 cách đều nhau 10^0 .

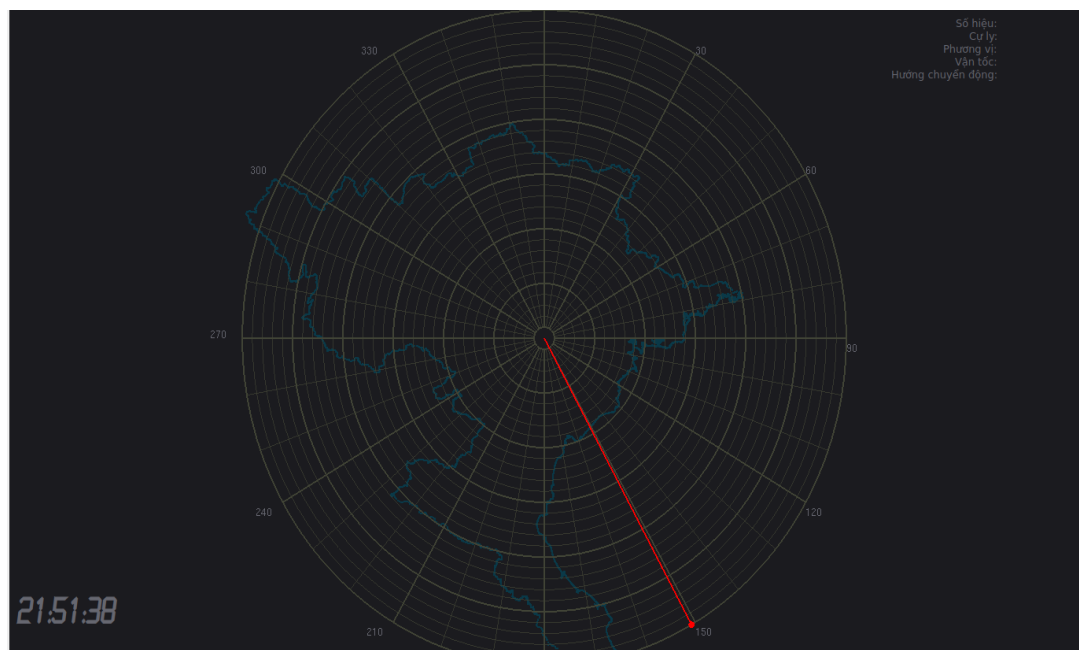
+ **Hiện thị bản đồ số:** Hiện thị đường bao bản đồ số Việt Nam theo vị trí đặt đài ra đa (kinh độ và vĩ độ).

+ Hiện thị encoder: Hiện thị tia quét theo thời gian thực, tương ứng với hướng ăng-ten tại một thời điểm.

+ **Hiện thị điểm dấu:** Hiện thị điểm dấu mục tiêu trên màn hình quan sát.

+ **Hiện thị tâm chùm:** Hiện thị tâm chùm được tính toán trên màn hình quan sát.

+ **Hiện thị quỹ đạo mục tiêu:** bao gồm thông tin về cự ly, phương vị, vận tốc, hướng di chuyển tại thời điểm hiện tại và hiện thị lịch sử quỹ đạo mục tiêu. Giúp người dùng dễ dàng quan sát quỹ đạo chuyển động của mục tiêu. Hình 11 mô tả giao diện khối hiện thị được xây dựng.



Hình 11: Giao diện khối hiển thị

Môi trường thực hiện:

- Phần cứng máy tính: Máy tính sử dụng bộ vi xử lý Intel(R) Core(TM) i3-4010U CPU @ 1.70GHz, kèm theo bộ nhớ RAM 4GB.

- Phần mềm cài đặt: Hệ điều hành Ubuntu 22.04; Môi trường phát triển: Qt Creator 6.0.2; Ngôn ngữ lập trình: C++.

3.2. Mô phỏng và thử nghiệm

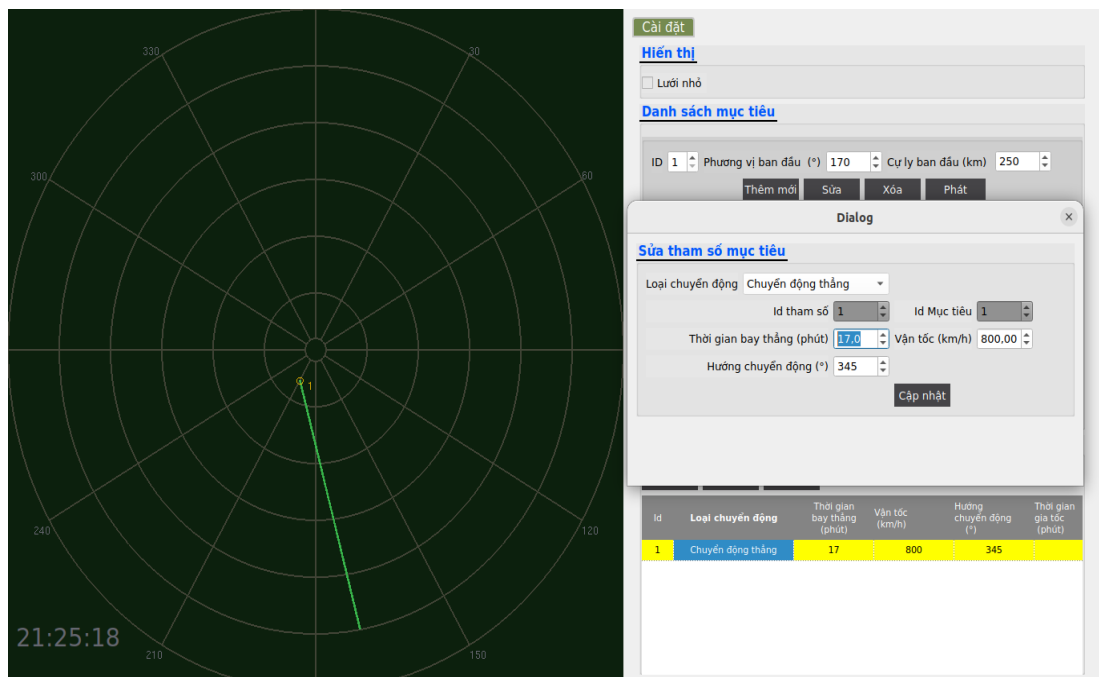
3.2.1. Tạo dữ liệu giả lập

- Mô hình chuyển động đều:

- Tham số đầu vào: giá trị ban đầu (x_0, y_0) , vận tốc chuyển động v , thời gian chuyển động Δt .
- Tham số đầu ra: vị trí tại thời điểm t (x_t, y_t) .
- Mô hình chuyển động:

$$x_t = x_0 + v_x * \Delta t \quad (3.1)$$

$$y_t = y_0 + v_y * \Delta t \quad (3.2)$$



Hình 12: Tạo dữ liệu giả lập chuyển động đều

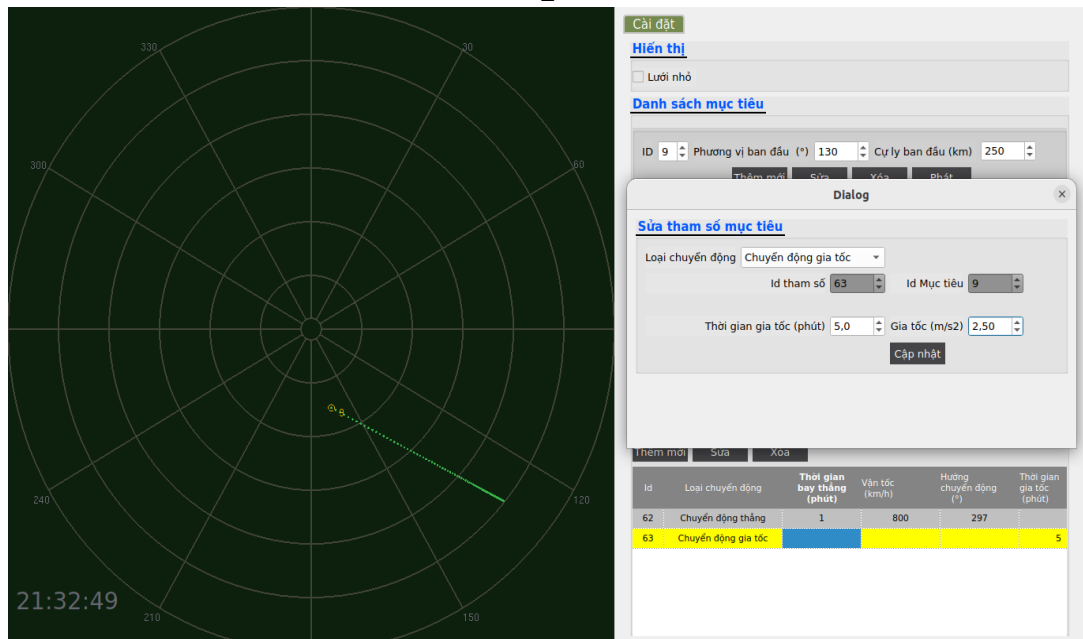
Hình 12 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu chuyển động đều với tham số trong hệ tọa độ cầu (phương vị ban đầu: 170° , cự ly ban đầu: 250 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 345° , thời gian chuyển động: 17 phút).

- Mô hình chuyển động có gia tốc:

- Tham số đầu vào: giá trị ban đầu (x_0, y_0) , vận tốc chuyển động v , gia tốc chuyển động a_t thời gian chuyển động Δt .
- Tham số đầu ra: vị trí tại thời điểm t (x_t, y_t) .
- Mô hình chuyển động:

$$x_t = x_0 + v_x * \Delta T + \frac{1}{2} a_t \Delta t^2 \quad (3.3)$$

$$y_t = y_0 + v_y * \Delta T + \frac{1}{2} a_t \Delta t^2 \quad (3.4)$$



Hình 13: Tạo dữ liệu giả lập chuyển động có gia tốc

Hình 13 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu với tham số trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 130° , cự ly ban đầu: 250 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 297° , thời gian chuyển động: 1 phút. Giai đoạn 2, chuyển động có gia tốc với gia tốc 2.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 5 phút.

- Mô hình chuyển động lượn vòng:

- Tham số đầu vào: giá trị ban đầu (x_0, y_0) , vận tốc chuyển động v_0 , gia tốc hướng tâm a_c thời gian chuyển động Δt .
- Tham số đầu ra: vị trí tại thời điểm t (x_t, y_t) .
- Mô hình chuyển động:

$$\omega = \frac{a_c}{\|\vec{v}_0\|} \text{ (Tốc độ quay góc)}$$

$$\theta = \omega \cdot \Delta t \text{ (Góc quay)}$$

$$s = \sin(\theta), \quad c = \cos(\theta)$$

$$sw = \frac{\sin(\theta)}{\theta}, \quad cw = \frac{1 - \cos(\theta)}{\theta}$$

$$\Delta = \Delta t \cdot \begin{bmatrix} sw & -cw \\ cw & sw \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_0$$

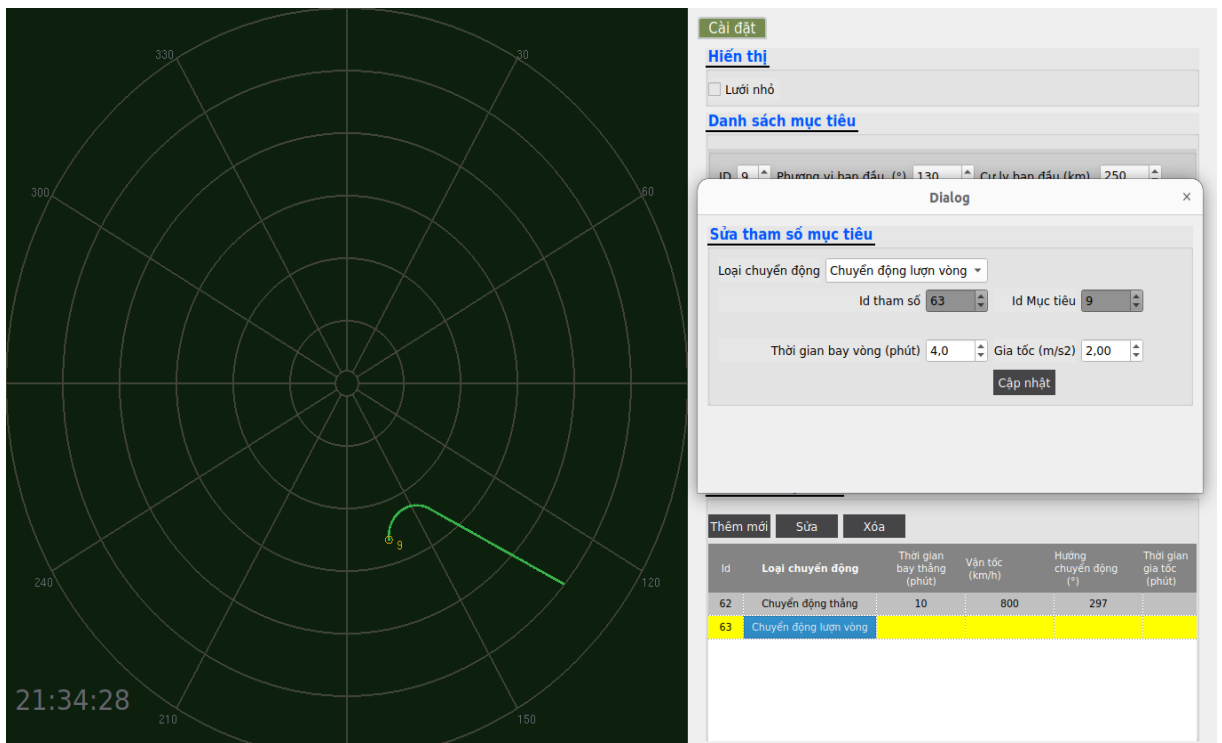
$$x_t = x_0 + \Delta x$$

$$y_t = y_0 + \Delta y$$

$$\vec{v}_t = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \vec{v}_0$$

$$v'_x = v_{0x} \cdot \cos(\theta) - v_{0y} \cdot \sin(\theta)$$

$$v'_y = v_{0x} \cdot \sin(\theta) + v_{0y} \cdot \cos(\theta)$$



Hình 14: Tạo dữ liệu giả lập chuyển động lượn vòng

Hình 14 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu với tham số trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 130° , cự ly ban đầu: 250 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 297° , thời gian chuyển động: 10 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc 2.0 m/s^2 , thời gian chuyển động: 4 phút.

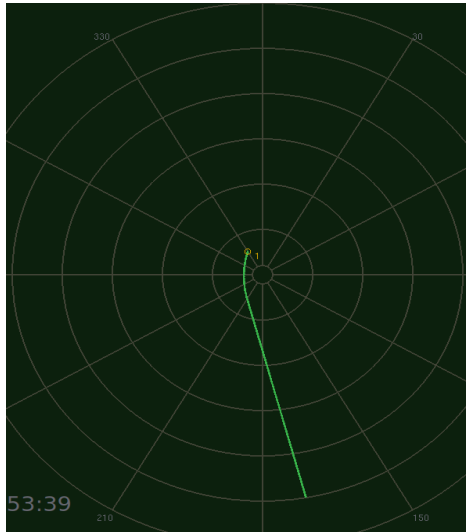
3.2.2. Kết quả theo dõi đa mục tiêu trong Ra đa

➤ Theo dõi mục tiêu có quỹ đạo chuyển động phức tạp và giao cắt

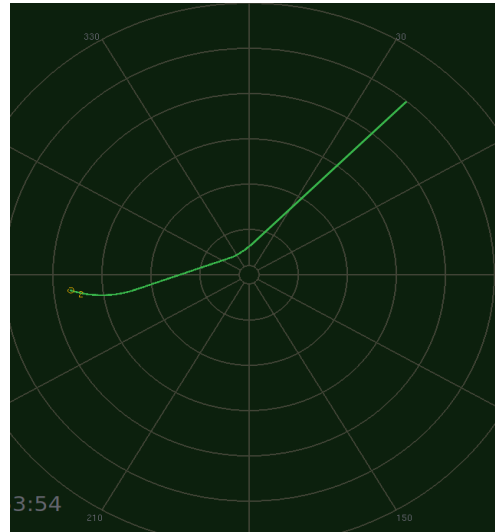
Xây dựng ứng dụng theo dõi đa mục tiêu trong ra đa sử dụng thuật toán tương quan JPDA và bộ lọc phần tử. Thực hiện tạo dữ liệu mô phỏng 07 mục tiêu chuyển động và thực hiện phát ở khối tạo giả, đồng thời khởi chạy ứng dụng theo dõi mục tiêu. Dữ liệu giả lập mục tiêu chuyển động với tham số như sau:

- Hình 15 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 1 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 170° , cự ly ban đầu: 250 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 345° , thời gian chuyển động: 17 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc -0.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 4 phút.

- Hình 16 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 2 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 40° , cự ly ban đầu: 250 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 225° , thời gian chuyển động: 16.5 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc -0.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 3, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 250° , thời gian chuyển động: 8 phút. Giai đoạn 4, chuyển động lượn vòng với gia tốc -0.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 5 phút.



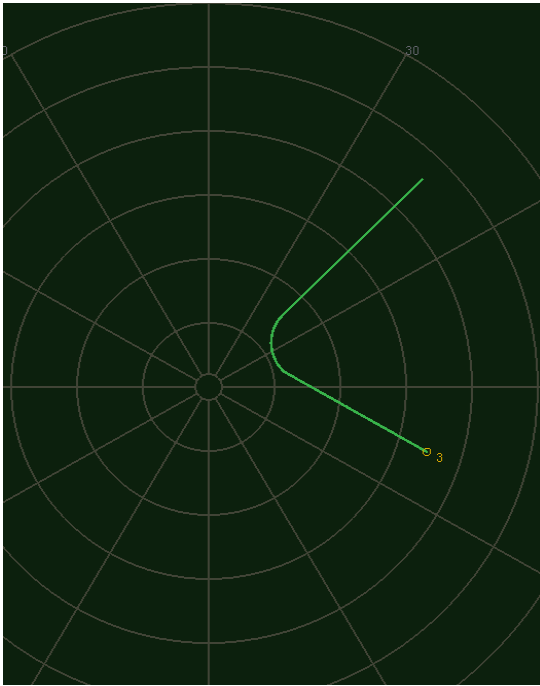
Hình 15: Mục tiêu số 1



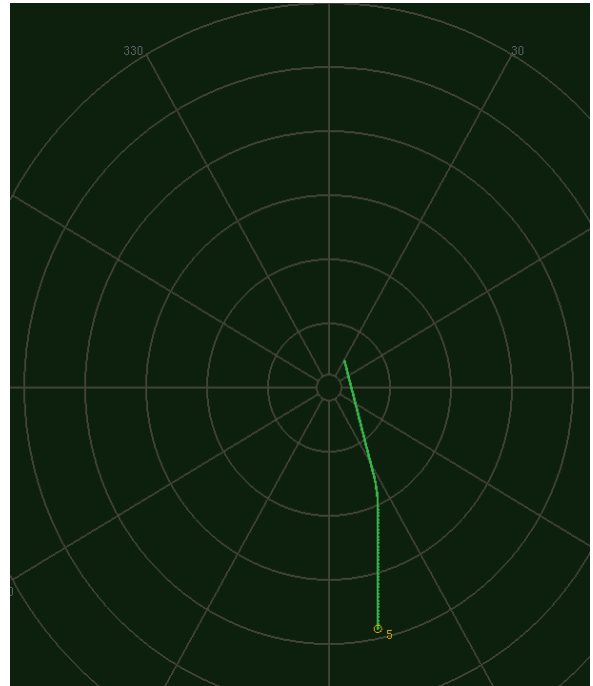
Hình 16: Mục tiêu số 2

- Hình 17 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 3 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 45° , cự ly ban đầu: 230 km, vận tốc: 750 km/h, hướng chuyển động: 225° , thời gian chuyển động: 12 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc 1.4 m/s^2 , thời gian chuyển động: 4 phút. Giai đoạn 3, chuyển động đều với vận tốc: 750 km/h, hướng chuyển động: 120° , thời gian chuyển động: 10 phút.

- Hình 18 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 4 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 30° , cự ly ban đầu: 25 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 165° , thời gian chuyển động: 7 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc -0.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 3, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 180° , thời gian chuyển động: 7 phút.



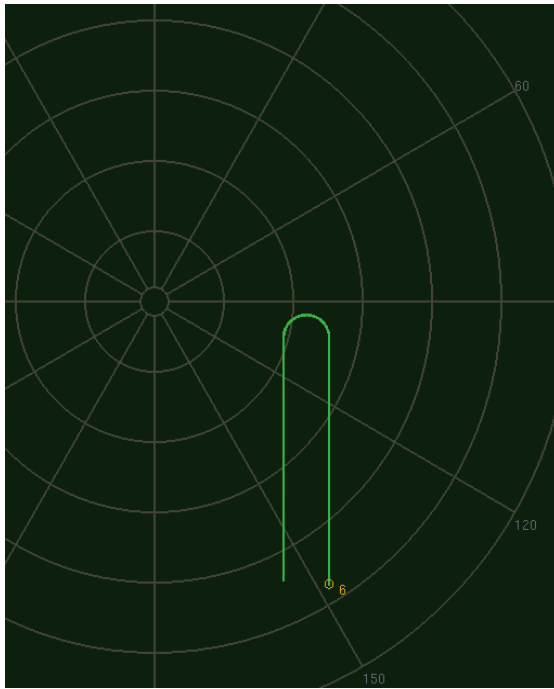
Hình 17: Mục tiêu số 3



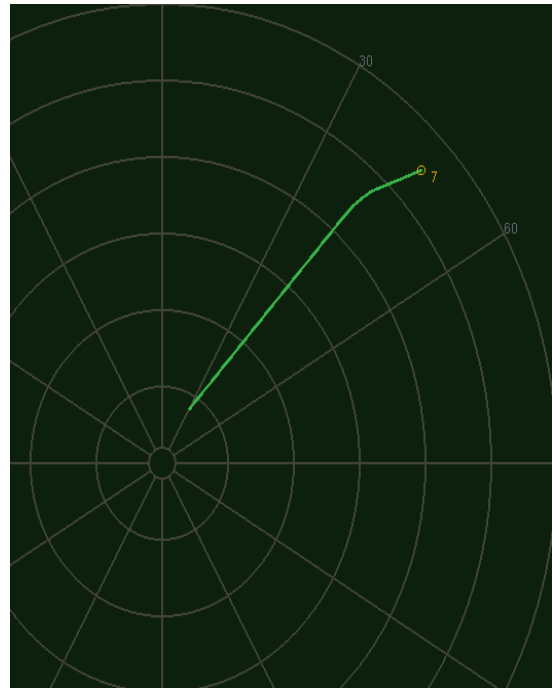
Hình 18: Mục tiêu số 4

- Hình 19 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 5 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 155° , cự ly ban đầu: 220 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 0° , thời gian chuyển động: 13 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc -3 m/s^2 , thời gian chuyển động: 4 phút. Giai đoạn 3, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 180° , thời gian chuyển động: 13 phút.

- Hình 20 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 6 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 30° , cự ly ban đầu: 40 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 43° , thời gian chuyển động: 13 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc -0.6 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 3, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 70° , thời gian chuyển động: 3 phút.



Hình 19: Mục tiêu số 5

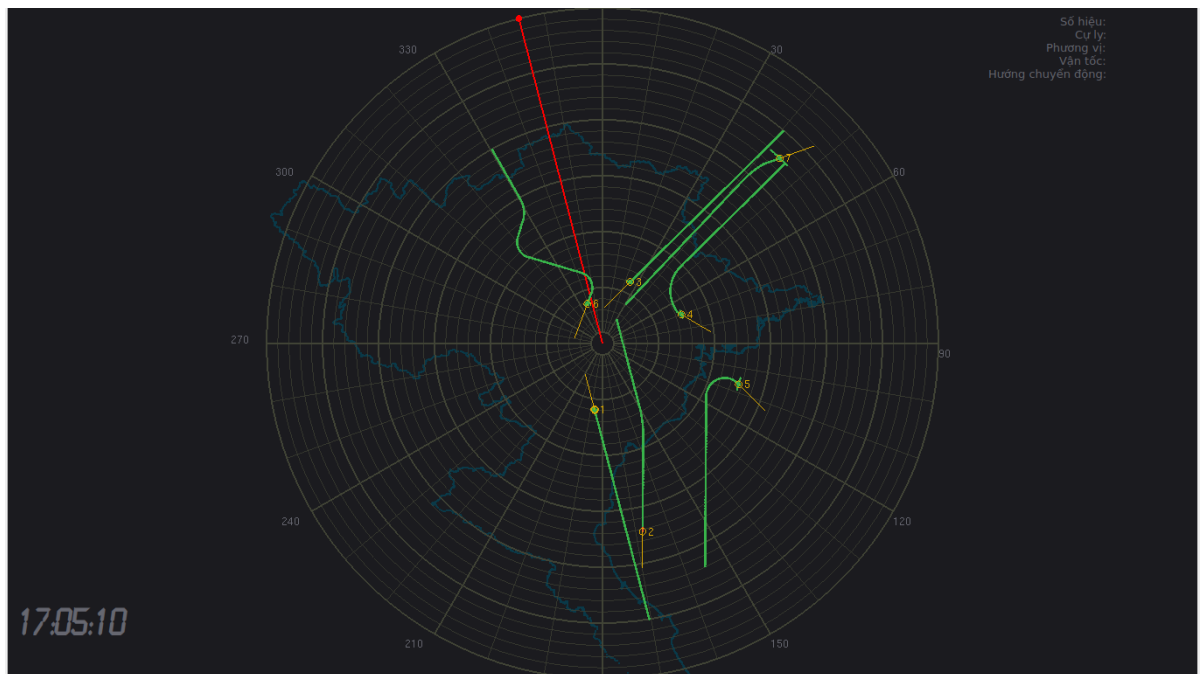


Hình 20: Mục tiêu số 6

- Hình 21 thể hiện quỹ đạo của mục tiêu số 7 với tham số chuyển động trong hệ tọa độ cầu như sau: Giai đoạn 1, chuyển động đều với phương vị ban đầu: 330° , cự ly ban đầu: 200 km, vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 150° , thời gian chuyển động: 4.5 phút. Giai đoạn 2, chuyển động lượn vòng với gia tốc -2.0 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 3, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 196° , thời gian chuyển động: 1 phút. Giai đoạn 4, chuyển động lượn vòng với gia tốc 3.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 5, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 106° , thời gian chuyển động: 4 phút. Giai đoạn 6, chuyển động lượn vòng với gia tốc -3.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 7, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 200° , thời gian chuyển động: 3 phút. Giai đoạn 8, chuyển động lượn vòng với gia tốc 3.5 m/s^2 , thời gian chuyển động: 2 phút. Giai đoạn 9, chuyển động đều với vận tốc: 800 km/h, hướng chuyển động: 120° , thời gian chuyển động: 3 phút.



Hình 21 : Mục tiêu số 7

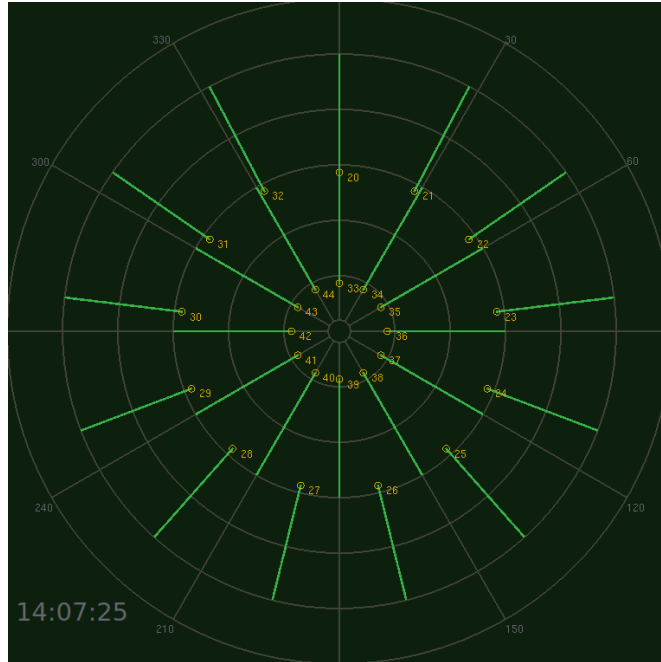


Hình 22: Kết quả ứng dụng theo dõi 07 mục tiêu trong ra đa

Hình 22 thể hiện kết quả theo dõi 07 mục tiêu của ứng dụng theo dõi đa mục tiêu trong ra đa sử dụng thuật toán tương quan JPDA và bộ lọc phần tử. Kết quả cho thấy ứng dụng hoạt động hiệu quả, duy trì khả năng bám sát quỹ đạo khi mục tiêu chuyển động gần nhau và có sự giao cắt quỹ đạo.

➤ *Theo dõi nhiều mục tiêu trong môi trường có nhiễu*

Hình 23 thể hiện dữ liệu mô phỏng 25 mục tiêu chuyển động thẳng đều và thực hiện phát ở khối tạo giả, đồng thời tại mỗi thời điểm chuyển động, dữ liệu mục tiêu được thêm nhiễu theo phân bố Poisson bán kính 15km^2 có 5 mục tiêu nhiễu. Các tham số chuyển động của mục tiêu được thể hiện tại Bảng 4.

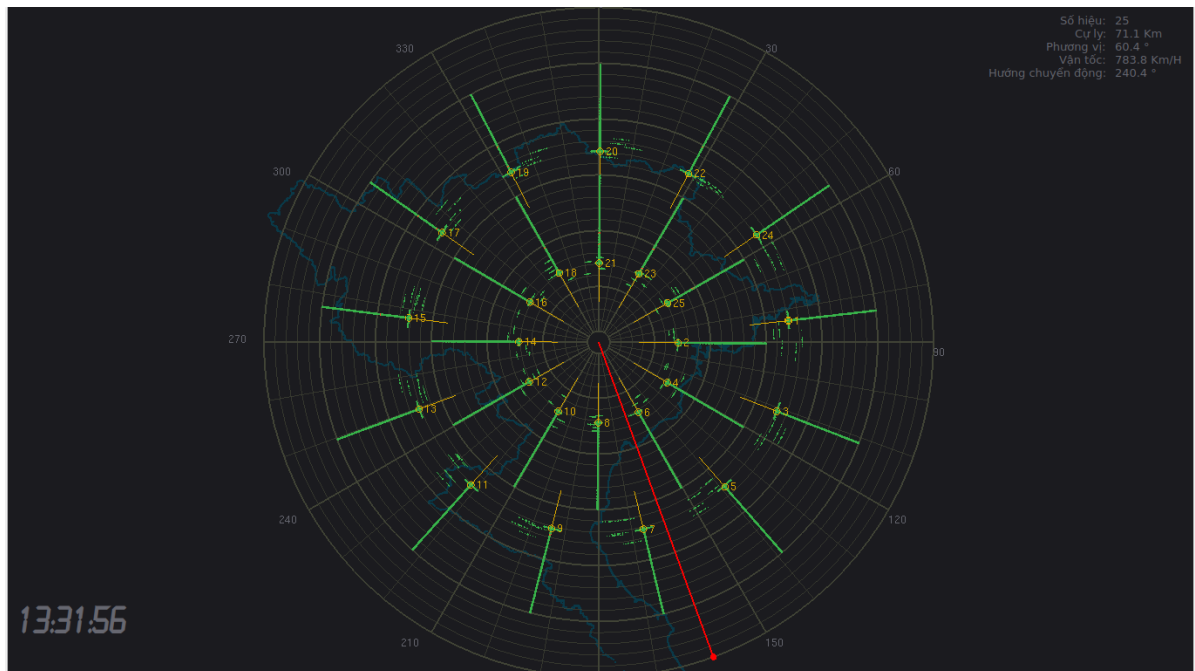


Hình 23: Mô phỏng 25 mục tiêu chuyển động trong môi trường nhiễu

Bảng 4: Tham số chuyển động của 25 mục tiêu

Mục tiêu	Cự ly ban đầu (km)	Phương vị ban đầu (°)	Vận tốc chuyển động (km/h)	Hướng chuyển động	Thời gian chuyển động (phút)
1	250	0	800	180	8
2	250	27.7	800	207.7	8
3	250	55.4	800	235.4	8
4	250	83.1	800	263.1	8
5	250	110.8	800	290.8	8
6	250	138.5	800	318.5	8
7	250	166.2	800	346.2	8
8	250	193.9	800	13.9	8
9	250	221.6	800	41.6	8
10	250	249.3	800	69.3	8
11	250	277	800	97	8

Mục tiêu	Cự ly ban đầu (km)	Phương vị ban đầu (°)	Vận tốc chuyển động (km/h)	Hướng chuyển động	Thời gian chuyển động (phút)
12	250	304.7	800	124.7	8
13	250	332.4	800	152.4	8
14	150	0	800	180	8
15	150	30	800	210	8
16	150	60	800	240	8
17	150	90	800	270	8
18	150	120	800	300	8
19	150	150	800	330	8
20	150	180	800	0	8
21	150	210	800	30	8
22	150	240	800	60	8
23	150	270	800	90	8
24	150	300	800	120	8
25	150	330	800	150	8



Hình 24: Kết quả theo dõi 25 mục tiêu chuyển động trong môi trường nhiễu

Hình 24 thể hiện kết quả theo dõi 25 mục tiêu trong môi trường có nhiễu của ứng dụng theo dõi đa mục tiêu trong ra đa sử dụng thuật toán tương quan JPDA và bộ lọc phân tử. Kết quả cho thấy ứng dụng hoạt động hiệu quả, duy trì khả năng theo

dôi quỹ đạo.

Tuy nhiên, trong thực tế, khi môi trường bị nhiễu và số lượng mục tiêu tăng, độ phức tạp tính toán của thuật toán tương quan JPDA sẽ tăng nhanh theo hàm mũ, khi số lượng mục tiêu tăng cần sinh các tập hợp sự kiện khả thi χ . Đồng thời, để đảm bảo độ chính xác, số lượng hạt trong bộ lọc phần tử cũng tăng, làm tăng đáng kể yêu cầu về tài nguyên tính toán. Để giảm độ phức tạp trong xử lý, cần áp dụng các kỹ thuật phân vùng (nhóm các quỹ đạo và điểm đo có liên quan), đồng thời sử dụng định cửa sóng nhằm thu hẹp không gian quan sát. Việc này giúp giảm số lượng quỹ đạo và điểm đo cần xử lý, từ đó tối ưu hiệu suất hệ thống. Trong trường hợp có tài nguyên tính toán mạnh, có thể khai thác khả năng xử lý song song của hệ thống, như sử dụng GPU để tăng tốc độ và hiệu quả tính toán.

3.2.3. Đánh giá chất lượng các thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử

- Đánh giá chất lượng bộ lọc phần tử:

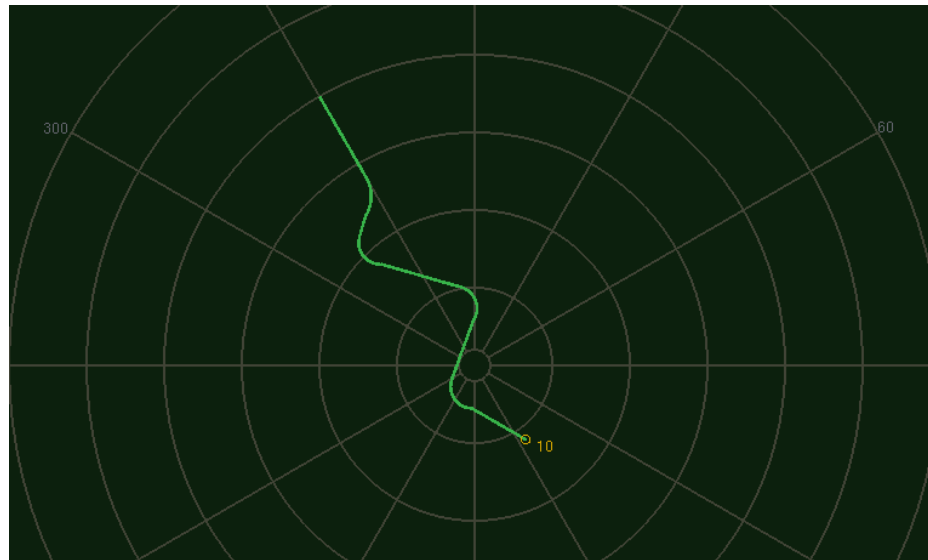
Chất lượng của bộ lọc được đánh giá thông qua chỉ số RMSE (Root Mean Square Error), là một đại lượng phổ biến dùng để đo sai số giữa giá trị ước lượng và giá trị thực. RMSE được tính theo công thức:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (3.5)$$

Trong đó:

- x_i là giá trị thực tại thời điểm i .
- $\hat{x}_i$ là giá trị ước lượng tại thời điểm i .
- N là tổng số mẫu.

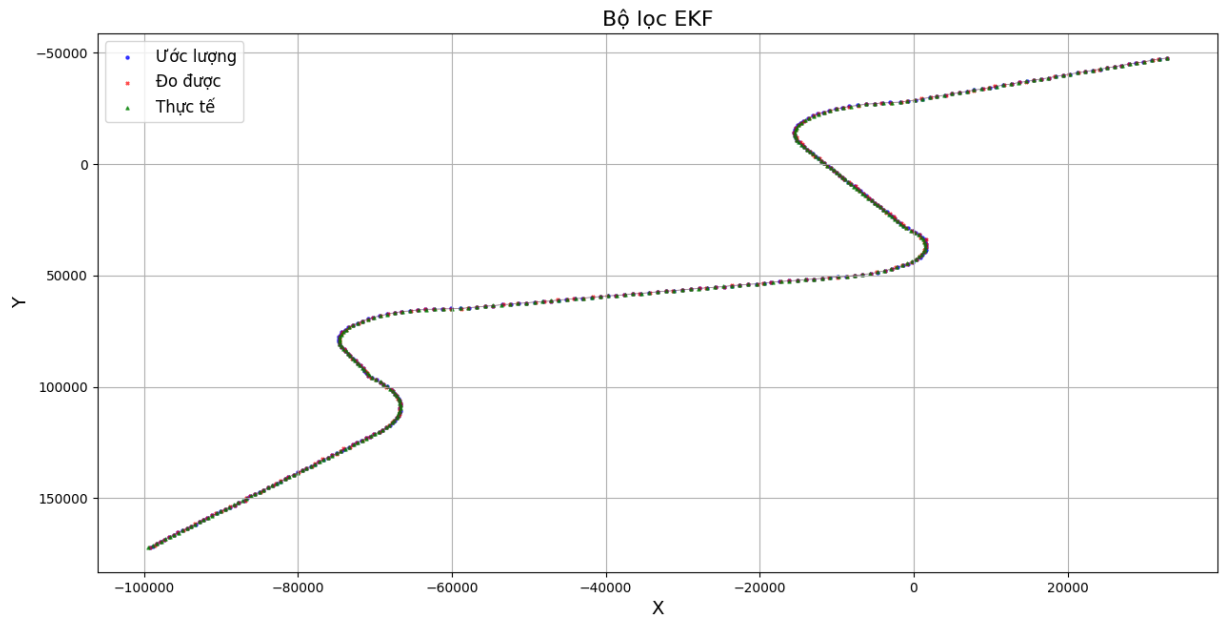
Chỉ số RMSE càng nhỏ chứng tỏ sai số giữa giá trị ước lượng và giá trị thực càng thấp, từ đó cho thấy bộ lọc hoạt động hiệu quả. Ngược lại, RMSE lớn cho thấy bộ lọc không theo sát được trạng thái thực tế, cần điều chỉnh lại mô hình, tham số.



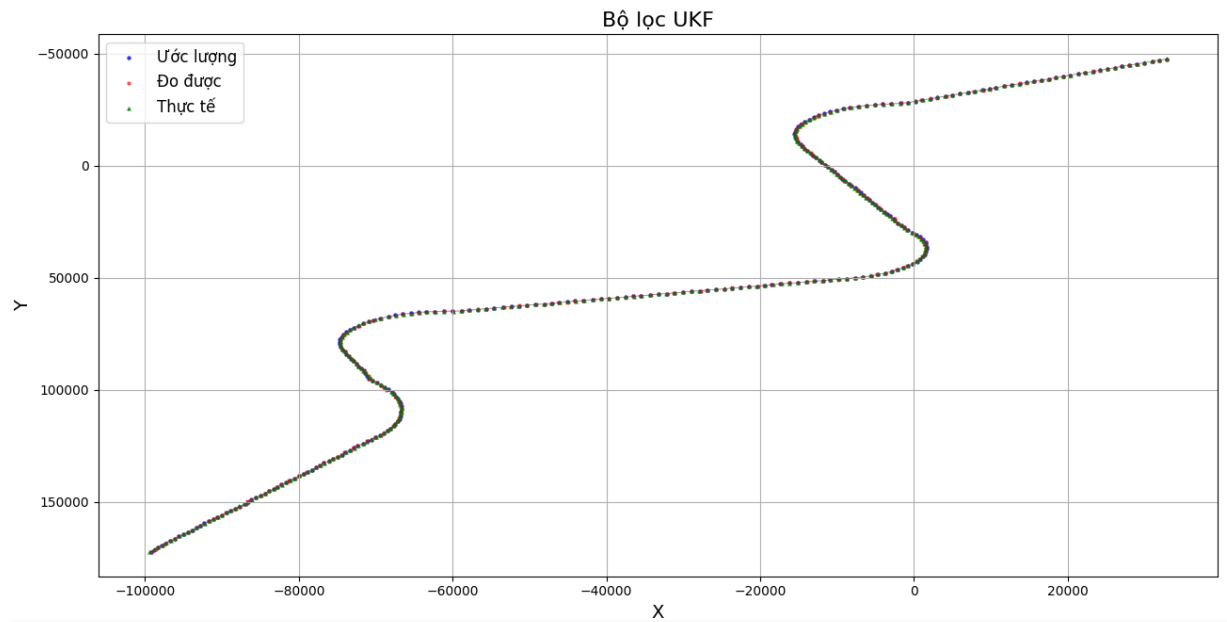
Hình 25: Quỹ đạo chuyển động phức tạp của mục tiêu

Hình 25 thể hiện quỹ đạo chuyển động phức tạp của mục tiêu trong không gian hai chiều, với các tham số được cấu hình như mục tiêu số 7. Các giá trị đo (x, y) tại từng thời điểm được làm nhiễu theo phân phối chuẩn $N(0, \delta^2)$ với phương sai $\delta^2 = 100m$. Những giá trị đo này được sử dụng làm đầu vào cho ba bộ lọc: bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), bộ lọc UKF, và bộ lọc phần tử. Sau khi xây dựng và chạy chương trình cho cả ba bộ lọc, kết quả thu được được thể hiện như sau:

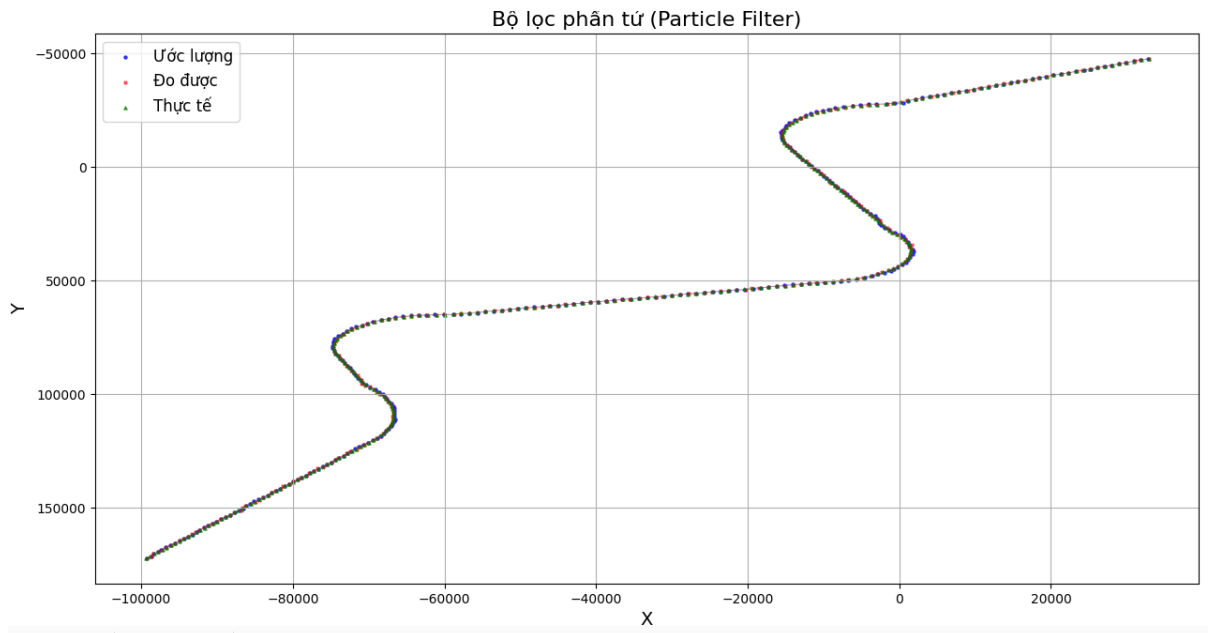
- Hình 26 cho kết quả so sánh giữa các giá trị thực tế, đo được, ước lượng của bộ lọc EKF.
- Hình 27 cho kết quả so sánh giữa các giá trị thực tế, đo được, ước lượng của bộ lọc UKF.
- Hình 28 cho kết quả so sánh giữa các giá trị thực tế, đo được, ước lượng của bộ lọc phần tử.



Hình 26: Kết quả bộ lọc EKF



Hình 27: Kết quả bộ lọc UKF



Hình 28: Kết quả bộ lọc PF

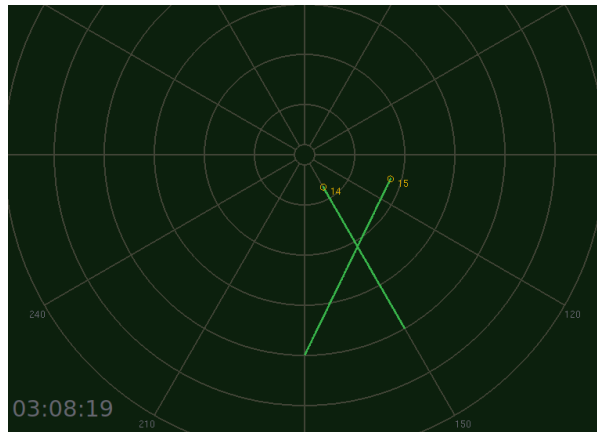
Bảng 5: Kết quả so sánh ba bộ lọc sử dụng chỉ số RMSE

	Bộ lọc EKF	Bộ lọc UKF	Bộ lọc phân tử
RMSE	186.366 mét	186.366 mét	135.357 mét

Từ kết quả so sánh ba bộ lọc ở bảng 5 thì bộ lọc phân tử cho RMSE thấp hơn hai bộ lọc UKF và EKF.

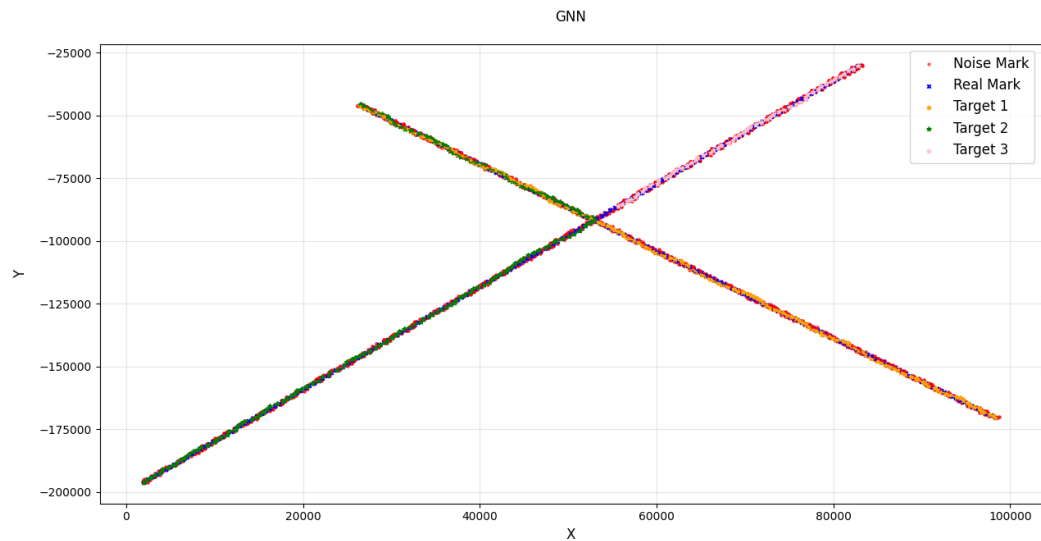
- Đánh giá chất lượng thuật toán tương quan:

Hình 29 mô phỏng hai mục tiêu chuyển động thẳng đều với thông số như sau: Mục tiêu 1 (Cự ly bắt đầu: 200km, Phương vị: 150^0 , vận tốc: 630 km/h, hướng chuyển động: 330^0); Mục tiêu 2 (Cự ly bắt đầu: 200km, Phương vị: 180^0 , vận tốc: 810 km/h, hướng chuyển động: 26^0). Hai mục tiêu cắt nhau sau thời gian di chuyển $t = 9$ phút, tương ứng với cự ly: 105 km, phương vị 150^0 . Tại mỗi thời điểm chuyển động, dữ liệu mục tiêu bao gồm: vị trí thực được làm nhiễu theo phân bố chuẩn $N(0, \delta^2)$ với phương sai $\delta^2 = 50m$ và nhiễu theo phân bố Poisson tương ứng với $\lambda = 6.7 / km^2$ (1 km^2 có 6.7 điểm nhiễu).

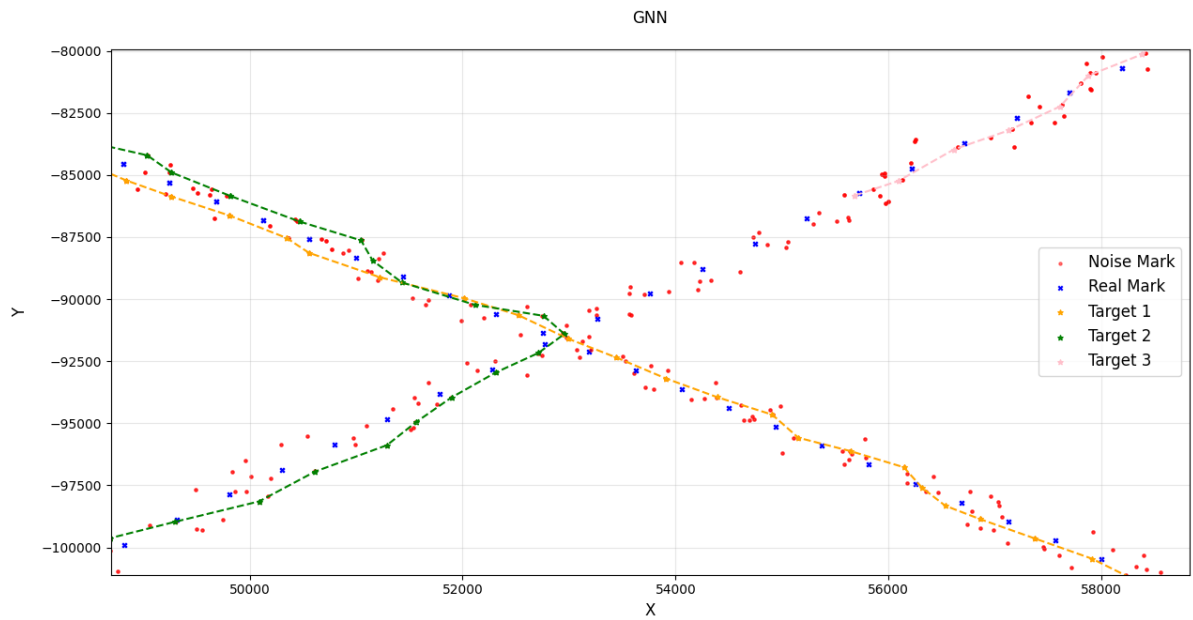


Hình 29: Mô phỏng hai mục tiêu chuyển động cắt nhau

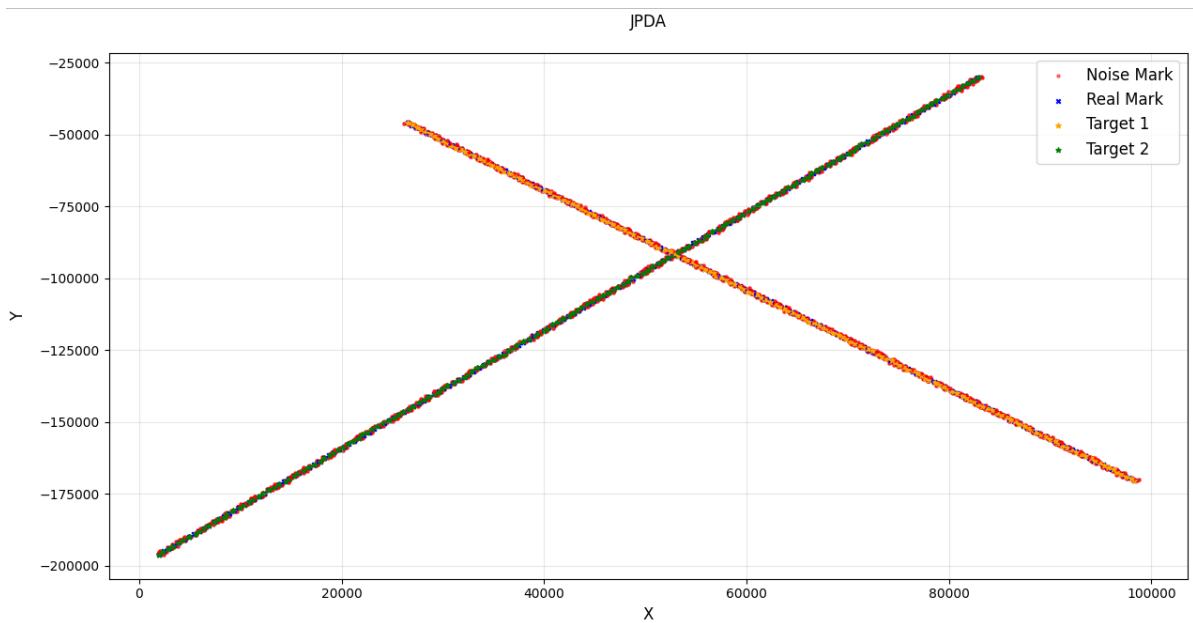
Kết quả theo dõi mục tiêu tương ứng với hai thuật toán tương quan GNN và JPDA kết hợp với bộ lọc phân tử như sau:



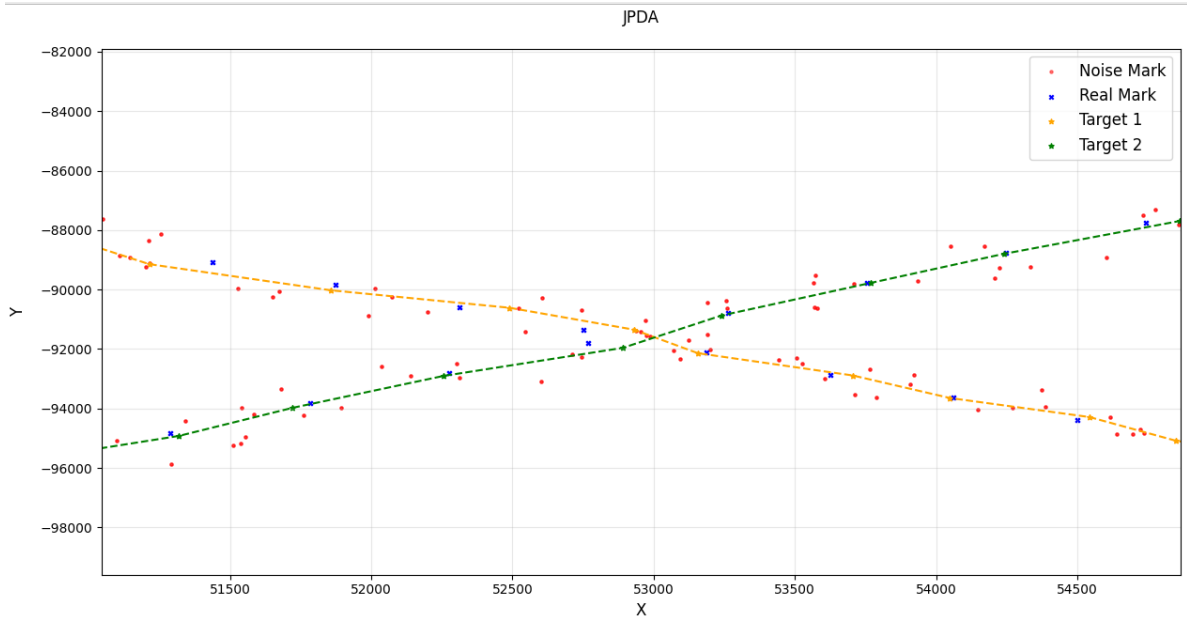
Hình 30: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan GNN



Hình 31: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan GNN tại thời điểm giao nhau



Hình 32: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan JPDA



Hình 33: Kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan JPDA tại thời điểm giao nhau

Hình 30, hình 31 thể hiện kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan GNN với các giá trị nhiễu (noise mark), điểm đo thực (real mark), 03 quỹ đạo mục tiêu (target 1, target 2, target 3). Hình 31 thể hiện tại thời điểm hai mục tiêu thực cắt nhau, thuật toán tương quan GNN bám nhầm quỹ đạo dẫn đến hình thành thêm mục tiêu theo dõi (target 3).

Hình 32, hình 33 thể hiện kết quả theo dõi mục tiêu sử dụng thuật toán tương quan JPDA với các giá trị nhiễu (noise mark), điểm đo thực (real mark), 02 quỹ đạo mục tiêu (target 1, target 2). Hình 33 thể hiện tại thời điểm hai mục tiêu thực cắt nhau, thuật toán tương quan JPDA vẫn duy trì khả năng bám chính xác quỹ đạo thực.

Từ kết quả mô phỏng theo dõi hai mục tiêu trong môi trường có nhiễu và các quỹ đạo cắt nhau, thuật toán tương quan JPDA thể hiện ưu điểm vượt trội so với thuật toán GNN nhờ khả năng xử lý đa giả thuyết và giảm thiểu sai số trong quá trình liên kết dữ liệu.

Kết luận chương 3:

Chương 3 đã trình bày chi tiết các thành phần của hệ thống thực nghiệm theo dõi đa mục tiêu trong ra đa sử dụng thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử. Trên cơ sở dữ liệu giả lập các mục tiêu, kết quả ứng dụng hoạt động hiệu quả, duy trì khả

năng bám sát quỹ đạo khi mục tiêu chuyển động gần nhau và có sự giao cắt quỹ đạo. Đồng thời, đã tiến hành mô phỏng và đánh giá chất lượng của ba bộ lọc EKF, UKF và bộ lọc phần tử thông qua chỉ số RMSE. Kết quả cho thấy bộ lọc phần tử đạt độ chính xác cao nhất, thể hiện qua giá trị RMSE thấp nhất, hoàn toàn phù hợp với cơ sở lý thuyết đã trình bày trong chương 2.

Ngoài ra, chương này cũng đã mô phỏng đánh giá chất lượng của thuật toán tương quan GNN và JPDA qua bài toán theo dõi hai mục tiêu cắt nhau trong môi trường nhiễu tác động, từ kết quả mô phỏng, thuật toán tương quan JPDA thể hiện ưu điểm vượt trội so với thuật toán GNN nhờ khả năng xử lý đa giả thuyết và giảm thiểu sai số trong quá trình liên kết dữ liệu, phù hợp với cơ sở lý thuyết đã nghiên cứu ở chương 2.

KẾT LUẬN

Đề án “Nghiên cứu ứng dụng thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử trong bài toán theo dõi đa mục tiêu ra đa” đã hoàn thành các nội dung trong đề cương đã đăng ký. Các kết quả chính được thực hiện trong đề án gồm:

1. Trình bày tổng quan các thành phần của hệ thống bám quỹ đạo trong hệ thống ra đa bao gồm hai bước: xử lý sơ cấp thông tin ra đa và xử lý thứ cấp thông tin ra đa.
2. Trình bày cơ sở lý thuyết các bộ lọc phi tuyến và các thuật toán tương quan, đưa ra đánh giá ưu nhược điểm của các bộ lọc và các thuật toán tương quan.
3. Thực hiện xây dựng hệ thống theo dõi đa mục tiêu trong Ra đa ứng dụng thuật toán tương quan JPDA và lọc phần tử.

Hướng nghiên cứu tiếp theo: Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ ron trong lọc mục tiêu di động trong Ra đa. Đề án nghiên cứu trong thời gian hạn chế nên không tránh khỏi thiếu sót, kính mong nhận được ý kiến đóng góp của quý thầy cô và bạn đọc.

DANH MỤC CÁC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Liên, Hoàng Thọ Tu, Nguyễn Mạnh Cường, Huỳnh Ngọc Kỳ, (2007), Cơ sở tự động hóa xử lý tin ra đa, Học viện kỹ thuật quân sự, 51-82
- [2] Hoàng Thọ Tu (2003), Cơ sở xây dựng đài ra đa cảnh giới, Học viện kỹ thuật quân sự, 14-20
- [3] A. SINHA (2012), Track Quality Based Multitarget Tracking Approach for Global Nearest-Neighbor Association, IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems vol. 48, no. 2 April 2012
- [4] Arulampalam, M.S., Maskell, S., Gordon, N. & Clapp, T: A tutorial on particle filters for online nonlinear / non- gaussian Bayesian tracking. IEEE Transactions on Signal Processing. 50(2):174 – 188.
- [5] Blackman S., Popoli R. (August 1999), Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House Radar Library, 1230 pages.
- [6] Kuo-Chu Chang (July 1984), Joint Probabilistic Data Association for Multitarget Tracking with Possibly Unresolved Measurements and Maneuvers. IEEE Transactions On Automatic Control, vol. Ac-29, no. 7. July 1984
- [7] Maria Isabel Ribeiro.: Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties, Institute for Systems and Robotics. February 2004
- [8] M. Sanjeev Arulampalam, Simon Maskell, Neil Gordon, and Tim Clapp, A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking, IEEE Transactions on signal processing, vol. 50, no. 2, February 2002
- [9] Simon D. (2001), Kalman Filtering.
- [10] Simon D. (2006), Optimal State Estimation Kalman, H infinity, and Nonlinear Approaches, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA, 526 pages.
- [11]Thopas E. Fortmann (1980), Multi-Target Tracking Using Joint Probabilistic Data Association
- [12] X. R. Li and V. P. Jilkov.: A Survey of Maneuvering Target Tracking: Dynamic Models, InProc. 2000 SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets, vol. 4048, pages 212–235, Orlando, Florida, USA, April 2000