HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



**Nguyễn Văn Đôn**

# NGHIÊN CỨU, ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ RADAR FMCW VÀO HỆ THỐNG CẢNH BÁO TRÊN XE Ô TÔ

## ĐỀ ÁN THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ

**(Theo định hướng ứng dụng)**

**HÀ NỘI – 2026**

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

---

**Nguyễn Văn Đôn**

# NGHIÊN CỨU, ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ RADAR FMCW VÀO HỆ THỐNG CẢNH BÁO TRÊN XE Ô TÔ

CHUYÊN NGÀNH : KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ

MÃ SỐ : 8.52.02.03

**ĐỀ ÁN THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ**

**(Theo định hướng ứng dụng)**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC**

TS. TRẦN THỊ THÚY HÀ

**HÀ NỘI-2026**

# LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan tất cả nội dung trong đề án *"Nghiên cứu, ứng dụng công nghệ radar FMCW vào hệ thống cảnh báo trên xe tô tô"* là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn, chỉ bảo, góp ý của TS. Trần Thị Thúy Hà, giảng viên Khoa Kỹ thuật điện tử 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. 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 và không sao chép dưới mọi hình thức. Các tài liệu tham khảo trong đề án được trích dẫn đầy đủ, rõ ràng.

Tôi xin chịu mọi trách nhiệm về công trình nghiên cứu của riêng mình!

**Tác giả đề án**



**Nguyễn Văn Đôn**

## LỜI CẢM ƠN

Trên thực tế không có sự thành công nào mà không gắn liền với những sự hỗ trợ và giúp đỡ dù ít hay nhiều, dù trực tiếp hay gián tiếp của người khác. Trong suốt thời gian từ khi bắt đầu học tập ở giảng đường đại học đến nay, em đã nhận được rất nhiều sự quan tâm, giúp đỡ của quý thầy cô và bạn bè.

Với lòng biết ơn sâu sắc nhất, em xin gửi đến quý thầy cô ở khoa Kĩ thuật Điện tử I, khoa Đào Tạo Sau Đại Học-Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông đã cùng với tri thức và tâm huyết của mình để truyền đạt vốn kiến thức quý báu cho em trong suốt thời gian học tập tại trường.

Để hoàn thành đề án này, em xin chân thành cảm ơn cô TS.Trần Thị Thúy Hà, em Nguyễn Ngọc Anh là người đã tận tình giúp đỡ em hoàn thành đề án môn học này.

Bước đầu đi vào thực tế, tìm hiểu về lĩnh vực sáng tạo trong nghiên cứu khoa học, kiến thức của em còn hạn chế và bỡ ngỡ. Do vậy không tránh khỏi những thiếu sót là điều chắc chắn, em rất mong nhận được những đóng góp quý báu của thầy cô và các bạn để kiến thức của em trong lĩnh vực này ngày càng hoàn thiện hơn.

Một lần nữa em xin chân thành cảm ơn thầy cô và các bạn!

Hà Nội, Tháng 07 Năm 2026

# MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN ..... i
LỜI CẢM ƠN ..... ii
MỤC LỤC ..... iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT ..... v
DANH MỤC BẢNG BIỂU ..... viii
DANH MỤC HÌNH ..... ix
LỜI MỞ ĐẦU ..... 1
CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG RADAR TRÊN Ô TÔ ..... 3
1.1. Giới thiệu chương ..... 3
1.2. Khái quát lịch sử phát triển thành tựu và các vấn đề tồn tại ..... 4
1.2.1. Tiến trình lịch sử phát triển công nghệ radar ..... 4
1.2.2. Các thành tựu đột phá của công nghệ radar hiện nay ..... 6
1.2.3. Các thách thức kỹ thuật và các vấn đề còn tồn tại ..... 7
1.3. Nguyên lý hoạt động cơ bản của hệ thống radar ..... 7
1.3.1. Phương pháp xác định khoảng cách ..... 7
1.3.2. Hiệu ứng Doppler và phương pháp đo vận tốc tương đối ..... 8
1.3.3. Phương pháp điều chế và xử lý tín hiệu radar FMCW ..... 9
1.4. Tổng quan về hệ thống an toàn trên xe ô tô ..... 11
1.4.1. Tổng quan hệ thống an toàn chủ động (ADAS) ..... 11
1.4.2. Phân loại và chức năng ứng dụng của radar trên ô tô ..... 12
1.4.3. Xu hướng phát triển và khả năng tích hợp của hệ thống trong tương lai 13
1.5. Kết luận chương ..... 14
CHƯƠNG II: NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG RADAR FMCW TRÊN Ô TÔ ..... 15
2.1. Giới thiệu chương ..... 15
2.2. Nguyên lý hoạt động radar FMCW ..... 15
2.2.1. Ước lượng khoảng cách ..... 18
2.2.2. Ước lượng vận tốc ..... 21
2.2.3. Ước lượng góc ..... 25
2.2.4. Tổng hợp các thông số ước lượng và ý nghĩa các tham số ..... 28
2.3. Đặc tính tín hiệu và diện tích phản xạ mục tiêu ..... 31
2.3.1. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu ..... 32
2.3.2. Tiết diện phản xạ radar ..... 34
2.4. Phương pháp phát hiện ..... 35

2.4.1. CA-CFAR ..... 36
2.4.2. GO-CFAR ..... 37
2.4.3. So sánh và lựa chọn phương pháp phát hiện ..... 40
2.5. Kết luận chương ..... 42
CHƯƠNG III: XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH CẢNH BÁO AN TOÀN TRÊN XE Ô TÔ SỬ DỤNG CẢM BIẾN RADAR ARS408 ..... 43
3.1. Giới thiệu chương ..... 43
3.2. Lựa chọn phần cứng ..... 43
3.3. Tổng quan về cảm biến radar ARS408 ..... 45
3.4. Thiết kế chương trình xử lý dữ liệu cảm biến radar ARS408 ..... 48
3.4.1. Nhận dữ liệu CAN từ radar ..... 49
3.4.2. Giải mã bản tin radar ..... 50
3.4.3. Quản lý danh sách đối tượng ..... 51
3.4.4. Thiết kế giao diện ..... 52
3.5. Xây dựng thuật toán cảnh báo an toàn ..... 52
3.6. Thiết lập thử nghiệm hệ thống ..... 59
3.6.1. Mục đích thử nghiệm ..... 59
3.6.2. Thiết lập môi trường và kịch bản thử nghiệm ..... 59
3.7. Đánh giá kết quả thực nghiệm hệ thống ..... 60
3.7.1. Kết quả phát hiện và hiển thị mục tiêu ..... 60
3.7.2. Đánh giá độ chính xác dữ liệu khoảng cách và vận tốc tương đối ..... 61
3.7.3. Đánh giá khả năng cảnh báo an toàn ..... 61
3.7.4. Đánh giá ưu điểm nhược điểm của hệ thống ..... 62
3.8. Kết luận chương ..... 62
KẾT LUẬN ..... 64
TÀI LIỆU THAM KHẢO ..... 66
PHỤ LỤC ..... 67

# DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

| Ký hiệu / Viết tắt | Thuật ngữ tiếng Anh | Ý Nghĩa |
|---|---|---|
| ACC | Adaptive Cruise Control | Hệ thống kiểm soát hành trình thích ứng |
| ADC | Analog-to-Digital Converter | Bộ chuyển đổi tương tự - số |
| ADAS | Advanced Driver Assistance Systems | Hệ thống an toàn chủ động / Hệ thống hỗ trợ người lái tiên tiến |
| AEB | Autonomous Emergency Braking | Hệ thống phanh khẩn cấp tự động |
| AoA | Angle of Arrival | Góc đến / Góc định vị |
| BSD | Blind Spot Detection | Hệ thống cảnh báo điểm mù |
| CAN | Controller Area Network | Mạng giao tiếp / Giao thức truyền thông |
| CA-CFAR | Cell Averaging CFAR | Phương pháp phát hiện ngưỡng thích ứng trung bình hóa |
| CFAR | Constant False Alarm Rate | Tỷ lệ cảnh báo sai không đổi |
| COTS | Commercial Off-The-Shelf | Hướng tiếp cận mô-đun hóa thương mại |
| CUT | Cell Under Test | Ô đang kiểm tra |
| DSP | Digital Signal Processor | Bộ xử lý tín hiệu số |
| ECU | Electronic Control Unit | Bộ điều khiển động cơ / Bộ điều khiển trung tâm |

| Ký hiệu / Viết tắt | Thuật ngữ tiếng Anh | Ý Nghĩa |
|---|---|---|
| FCW | Forward Collision Warning | Hệ thống cảnh báo va chạm phía trước |
| FFT | Fast Fourier Transform | Phép biến đổi Fourier nhanh |
| FMCW | Frequency Modulated Continuous Wave | Điều chế tần số sóng liên tục |
| FOV | Field of View | Góc mở / Trường quan sát |
| GO-CFAR | Greatest-Of Constant False Alarm Rate | Phương pháp phát hiện ngưỡng thích ứng dựa trên giá trị cực đại |
| IF | Intermediate Frequency | Tần số trung tần |
| LCA | Lane Change Assist | Hệ thống hỗ trợ chuyển làn an toàn |
| LO | Local Oscillator | Bộ dao động nội |
| LRR | Long Range Radar | Radar tầm xa |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output | Kiến trúc nhiều ăng-ten phát và thu |
| MRR | Medium Range Radar | Radar tầm trung |
| RADAR | Radio Detection and Ranging | Phát hiện và đo khoảng cách bằng sóng vô tuyến |
| RCS | Radar Cross Section | Diện tích phản xạ radar / Tiết diện phản xạ radar |
| RCTA | Rear Cross Traffic Alert | Hệ thống cảnh báo phương tiện cắt ngang phía sau khi lùi |
| RoC | Radar-on-Chip | Radar tích hợp trên Chirp |

| Ký hiệu / Viết tắt | Thuật ngữ tiếng Anh | Ý Nghĩa |
|---|---|---|
| RX | Receiver | Bộ thu / Ăng-ten thu |
| SAE | Society of Automotive Engineers | Hiệp hội Kỹ sư Ô tô Quốc tế |
| SDV | Software-Defined Vehicle | Xe định nghĩa bằng phần mềm |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio | Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu |
| SoC | System on Chip | Vi mạch tích hợp |
| SRR | Short Range Radar | Radar tầm ngắn |
| TTC | Time To Collision | Thời gian tới va chạm |
| TX | Transmitter | Bộ phát / Ăng-ten phát |

# DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1: So sánh đặc tính kĩ thuật giữa các cảm biến chủ đạo trong hệ thống ADAS. .....11
Bảng 1.2: Phân định thông số kỹ thuật và miền ứng dụng của các dòng radar ô tô. ....13
Bảng 2.1: Tóm tắt các thực tế ước lượng. .....29
Bảng 2.2: Ý nghĩa của các tham số. .....29
Bảng 2.3: Bảng so sánh đặc tính kỹ thuật giữa CA-CFAR và GO-CFAR.....40
Bảng 3.1: So sánh đặc tính kỹ thuật giữa cảm biến Continental ARS408 và nền tảng Texas Instruments mmWave SoC. .....44
Bảng 3.2: Nội dung các trường trong dữ liệu CAN của cảm biến. .....50
Bảng 3.3: kết quả đo đạc khoảng cách. .....61

# DANH MỤC HÌNH

Hình 1.1: Anten máy phát Chain Home của Anh.....5
Hình 1.2: Cảm biến radar AWR1843 SoC.....6
Hình 2.1: Tín hiệu Chirp.....16
Hình 2.2: Quy trình hoạt động của radar FMCW.....17
Hình 2.3: Tín hiệu IF của phép đo một mục tiêu. Hình a) biểu diễn miền tần số-thời gian của tín hiệu truyền và thu. Hình b) biểu diễn miền tần số-thời gian của tần số IF. .....19
Hình 2.4: Tín hiệu IF của phép đo nhiều mục tiêu. Hình a) biểu diễn miền tần số-thời gian của các tín hiệu truyền và thu. Hình b) biểu diễn miền tần số-thời gian của các tần số IF. .....20
Hình 2.5: Biểu diễn tín hiệu TX và RX sau một sự dịch chuyển $\Delta\tau$.....22
Hình 2.6: Quy trình ước lượng vận tốc của nhiều mục tiêu.....24
Hình 2.7: Ước lượng AoA của một đối tượng. .....26
Hình 2.8: Quy trình ước lượng AoA của nhiều đối tượng. Trong kịch bản này, hai mục tiêu có cùng vận tốc tương đối. .....27
Hình 2.9: Kiến trúc của thuật toán CA-CFAR. Hình a) Cửa sổ CA-CFAR cho dữ liệu một chiều. Hình b) Cửa sổ CA-CFAR cho dữ liệu hai chiều.....37
Hình 2.10: Kiến trúc của thuật toán GO-CFAR. Hình a) Cửa sổ GO-CFAR cho dữ liệu một chiều. Hình b) Cửa sổ GO-CFAR cho dữ liệu hai chiều. .....39
Hình 3.1: Vùng phát hiện của radar ARS408.....46
Hình 3.2: Mặt trước cảm biến radar ARS408. .....46
Hình 3.3: Mặt sau cảm biến radar ARS408.....47
Hình 3.4: Sơ đồ khối kệ thống.....48
Hình 3.5: Module chuyển đổi CAN sang USB. .....49
Hình 3.6: Vùng nguy hiểm. .....54
Hình 3.7: Minh họa thời gian tới va chạm.....55
Hình 3.8: Lưu đồ thuật toán của hệ thống. .....56

# LỜI MỞ ĐẦU

Gần đây sự phát triển của phương tiện tự hành đã trở thành một trong những chủ đề nghiên cứu hàng đầu trong lĩnh vực kỹ thuật hiện nay. Những chiếc xe tự lái hứa hẹn mang lại nhiều lợi ích to lớn cho xã hội, như tăng cường an toàn giao thông, giảm thiểu sự cố do lỗi người lái, cải thiện hiệu quả di chuyển, và mở ra những khả năng mới trong lĩnh vực giao thông vận tải.

Tuy nhiên, một trong những thách thức lớn nhất đối với việc triển khai rộng rãi các phương tiện tự hành chính là khả năng quan sát và phát hiện chính xác các vật thể xung quanh. Các phương tiện này cần phải có khả năng cảm nhận và phản ứng kịp thời với môi trường xung quanh một cách đáng tin cậy, để đảm bảo sự an toàn cho hành khách cũng như những người tham gia giao thông khác.

Ở đây, công nghệ radar có thể đóng vai trò then chốt. radar, với khả năng phát hiện và đo khoảng cách các vật thể, có tiềm năng giúp các phương tiện tự hành cải thiện đáng kể năng lực quan sát và phản ứng với môi trường xung quanh. radar có thể cung cấp thông tin chi tiết về vị trí, tốc độ và hướng di chuyển của các đối tượng, từ đó giúp các hệ thống điều khiển tự động có thể ra quyết định an toàn và chính xác hơn.

Chính vì vậy, việc nghiên cứu sâu hơn về các ứng dụng của radar trong hệ thống phương tiện tự hành là một lĩnh vực rất đáng quan tâm. Bằng cách tập trung vào đề tài này cho đề án thạc sĩ, em hy vọng sẽ có được những hiểu biết sâu sắc hơn về cách thức radar có thể hỗ trợ và cải thiện các hệ thống phương tiện tự hành. Từ đó, em sẽ có thể đề xuất các giải pháp và kỹ thuật mới, góp phần thúc đẩy sự phát triển của công nghệ phương tiện tự hành.

Nội dung đề án sẽ trình bày về quá trình *"Nghiên cứu, ứng dụng công nghệ radar FMCW vào hệ thống cảnh báo trên xe ô tô"*.

Đề án được bố cục gồm 3 chương:

Chương I: Tổng quan về hệ thống radar.

Chương II: Nghiên cứu hệ thống radar FMCW trên ô tô.

Chương III: Xây dựng chương trình cảnh báo an toàn trên xe ô tô sủ dụng cảm biến radar ARS408.

**Đóng góp của đề án:**

- Xây dựng mô hình xử lý tín hiệu radar FMCW trên nền tảng ARS408.

- Thiết kế chương trình giải mã dữ liệu CAN thời gian thực.
- Xây dựng thuật toán cảnh báo va chạm dựa trên TTC.
- Đánh giá hiệu năng hệ thống trên dữ liệu thực.

Em xin chân thành cảm ơn cô TS. Trần Thị Thúy Hà đã giúp đỡ em trong quá trình thực hiện đề tài. Dưới đây em xin phép trình bày chi tiết các phần nội dung trong đề án.

# CHƯƠNG I: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG RADAR TRÊN Ô TÔ

## 1.1. Giới thiệu chương

Trong kỷ nguyên công nghệ hiện đại, ngành công nghiệp ô tô thế giới đang trải qua một cuộc cách mạng sâu sắc, liên quan đến sự chuyển dịch mạnh mẽ từ các phương tiện cơ khí truyền thống sang các dòng phương tiện thông minh, có khả năng kết nối và tự hành. Để đạt được các cấp độ tự hành cao hơn theo tiêu chuẩn của Hiệp hội Kỹ sư Ô tô Quốc tế (SAE cấp độ 0 đến 5), hệ thống điều khiển trung tâm của phương tiện cần có khả năng nhận thức môi trường xung quanh một cách chính xác và liên tục theo dõi theo thời gian thực. Hệ thống hỗ trợ người lái tiên tiến và các kiến trúc tự hành nâng cao đòi hỏi một hệ thống mạng lưới cảm biến phức tạp để đóng vai trò như các giác quan của chiếc xe.

Hệ thống cảm biến hiện đại trên ô tô thường bao gồm sự kết hợp của Camera, LiDAR, cảm biến siêu âm và hệ thống radar. Mỗi loại cảm biến đều có những ưu điểm vật lý và tầm hoạt động tối ưu riêng biệt. Trong khi camera cung cấp thông tin phong phú về màu sắc, kết cấu cấu trúc, nhận diện biển báo và vạch kẻ đường nhưng lại dễ bị vô hiệu hóa bởi điều kiện thời tiết ánh sáng yếu, sương mù dày đặc hoặc hiện tượng lóa sáng khi xe vào vùng ngược sáng. LiDAR mang lại bản đồ đám mây điểm 3D độ phân giải cực cao nhưng có chi phí sản xuất lớn và suy giảm hiệu năng nghiêm trọng trong điều kiện thời tiết bất lợi như mưa lớn hoặc tuyết rơi. Vì vậy, radar nổi lên như một thành phần cốt lõi, nhờ khả năng hoạt động bền bỉ trong mọi điều kiện thời tiết bất chấp mưa, bão tuyết, sương mù, khói bụi và khả năng đo lường trực tiếp vận tốc tương đối của mục tiêu nhờ hiệu ứng Doppler.

Chương I của đề án này tập trung nghiên cứu và phác thảo một bức tranh toàn cảnh mang tính hệ thống về công nghệ radar ứng dụng trong lĩnh vực ô tô. Nội dung chương sẽ trình bày đi từ tiến trình lịch sử phát triển đồng thời phân tích chi tiết các thành tựu công nghệ đột phá đã đạt được cũng như các bài toán kỹ thuật còn tồn tại chưa được giải quyết triệt để. Tiếp theo, chương này sẽ thiết lập nền tảng lý thuyết thông qua việc phân tích toán học và vật lý chuyên sâu về nguyên lý hoạt động của radar, đặc biệt là công nghệ điều chế tần số sóng liên tục FMCW – cấu trúc nền tảng của radar ô tô hiện đại. Cuối cùng, chương sẽ nêu vai trò của radar trong tổng thể cấu trúc hệ thống an toàn chủ động trên xe ô tô, phân loại các dòng radar theo dải tần, tầm xa và phân tích các xu hướng tích hợp phần cứng, phần mềm trong tương lai.

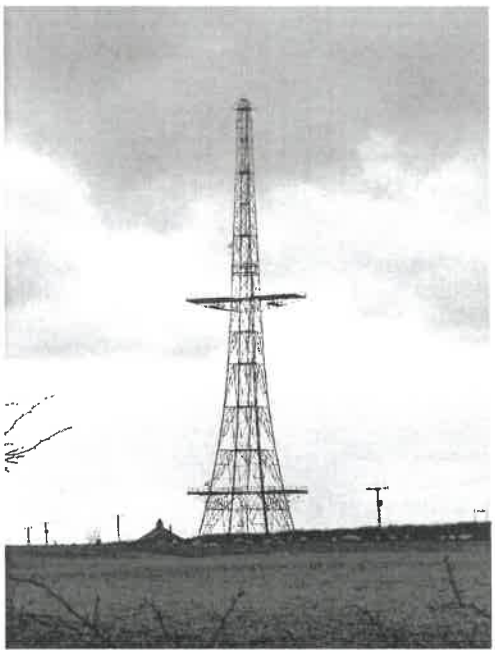
## 1.2. Khái quát lịch sử phát triển thành tựu và các vấn đề tồn tại

### 1.2.1. Tiến trình lịch sử phát triển công nghệ radar

Lịch sử phát triển của công nghệ radar là một hành trình dài kéo dài hơn một thế kỷ, đánh dấu bằng sự chuyển dịch từ các phát minh vật lý thuần túy qua các ứng dụng quân sự mang tính quyết định trong thế chiến tranh thế giới lần thứ hai cho đến khi trở thành một thiết bị cảm biến bán dẫn nhỏ tích hợp trên các phương tiện dân dụng hàng ngày. Quá trình này có thể được chia thành bốn giai đoạn cốt lõi:

*Giai đoạn thiết lập nền tảng lý thuyết (Cuối thế kỷ XIX - Đầu thế kỷ XX):* Nền móng vật lý của radar gắn liền với lý thuyết toán học về trường điện từ của James Clerk Maxwell vào năm 1865. Đến năm 1886, nhà vật lý người Đức Heinrich Hertz đã chứng minh bằng thực nghiệm rằng sóng điện từ có thể phản xạ ngược lại khi gặp các vật thể rắn hoặc các cấu trúc kim loại. Đi sâu vào khai thác hiện tượng này vào năm 1904 Christian Hülsmeyer đã chế tạo thành công và được cấp bằng sáng chế cho thiết bị "Telemobiloscope". Đây là hệ thống sơ khai sử dụng sóng vô tuyến để phát hiện sự hiện diện của tàu thuyền từ xa nhằm tránh đâm va trong sương mù, đánh dấu mốc sơ khai đặt nền móng cho thuật ngữ RADAR (Radio Detection and Ranging) sau này.

*Giai đoạn bùng nổ trong quân sự và Thế chiến II (1939 - 1945):* Sự căng thẳng của cuộc đại chiến thế giới đã thúc đẩy các cường quốc đầu tư nguồn lực khổng lồ vào nghiên cứu radar. Năm 1940, việc phát minh ra ống Magnetron hốc cộng hưởng bởi hai nhà khoa học Randall và Boot tại Đại học Birmingham Anh đã tạo nên một bước ngoặt vĩ đại. Ống Magnetron cho phép tạo ra sóng điện từ ở dải vi ba với công suất cực lớn nhưng kích thước hệ thống lại thu nhỏ đáng kể. Điều này cho phép không chỉ xây dựng hệ thống lưới quét phòng không tầm xa như hệ thống Chain Home của Anh mà còn cho phép lắp đặt radar lên các máy bay chiến đấu và tàu ngầm, thay đổi hoàn toàn cục diện chiến tranh cục bộ.



*Hình 1.1: Anten máy phát Chain Home của Anh.*

*Giai đoạn bán dẫn hóa và xử lý tín hiệu số (Nửa cuối thế kỷ XX):* Sau thế chiến, công nghệ radar chuyển dịch dần sang phục vụ các mục đích dân sự như kiểm soát không lưu, dự báo khí tượng và nghiên cứu vũ trụ. Sự ra đời của bóng bán dẫn transistor và sau đó là các mạch tích hợp đã thay thế hoàn toàn các ống chân không cồng kềnh, tiêu tốn năng lượng. Đồng thời, sự phát triển của các bộ xử lý tín hiệu số DSP tốc độ cao cho phép thực thi các thuật toán phức tạp như phép biến đổi Fourier nhanh (FFT) theo thời gian thực. Giai đoạn này cũng chứng kiến sự ra đời của công nghệ radar mảng pha, cho phép quét và định hướng chùm sóng điện từ bằng cách điều khiển pha tại từng phần tử anten mà không cần đến các cơ cấu truyền động cơ học phức tạp.

*Giai đoạn tích hợp trên ô tô và công nghệ radar-on-Chip (RoC) (Thập niên 1990 - Nay):* Ý tưởng đưa radar lên ô tô đã xuất hiện từ những năm 1970 nhưng các rào cản về kích thước và chi phí khiến dự án không khả thi. Đến năm 1998, Mercedes-Benz lần đầu tiên thương mại hóa hệ thống kiểm soát hành trình thích ứng (ACC) mang tên DISTRONIC sử dụng cảm biến radar băng tần 24 GHz, tuy nhiên module này vẫn rất cồng kềnh và đắt đỏ. Sự bứt phá thực sự diễn ra trong một thập kỷ trở lại đây khi công nghệ mạch tích hợp vi ba đơn tinh thể dựa trên tiến trình công nghệ SiGe và đặc biệt là RF-CMOS phát triển. Công nghệ này cho phép tích hợp toàn bộ các khối chức năng bao gồm Bộ phát (TX), Bộ thu (RX), Bộ dao động nội (LO), Bộ chuyển đổi ADC và lõi xử

lý DSP lên một chip silicon duy nhất hoạt động ở băng tần cao 77 GHz / 79 GHz, đưa kích thước cảm biến xuống mức siêu nhỏ với giá thành sản xuất hàng loạt cực thấp.



*Hình 1.2: Cảm biến radar AWR1843 SoC.*

### 1.2.2. Các thành tựu đột phá của công nghệ radar hiện nay

Hiện nay, công nghệ radar ô tô đã đạt được những cột mốc phát triển vượt bậc, định hình lại cấu trúc của các hệ thống an toàn thông minh:

*Tối ưu hóa tần số và băng thông:* Việc chuyển dịch từ băng tần 24 GHz sang băng tần 77 GHz - 81 GHz đã mang lại những lợi ích vật lý to lớn. Với bước sóng ngắn hơn (khoảng 4mm), kích thước anten giảm đi gần 3 lần, trong khi băng thông khả dụng tăng lên tới 4 GHz (từ 77 GHz đến 81 GHz). Băng thông rộng là điều kiện quyết định giúp nâng cao độ phân giải khoảng cách của radar xuống mức centimet.

*Công nghệ radar hình ảnh 4D:* Đây là thành tựu mang tính cách mạng nhất trong những năm gần đây. Bằng cách áp dụng kiến trúc MIMO với số lượng kênh phát và kênh thu lớn, kết hợp với các thuật toán xử lý tín hiệu siêu phân giải, radar 4D không chỉ đo được khoảng cách, vận tốc tương đối, góc phương vị mà còn đo được cả góc tà/độ cao. Khả năng này giúp radar xuất ra một đám mây điểm có mật độ dày đặc, cho phép nhận dạng và phân loại hình ảnh vật thể (người đi bộ, xe đạp, chướng ngại vật cố định) với độ chính xác tiệm cận LiDAR.

*Tích hợp thuật toán trí tuệ nhân tạo AI:* Các bộ xử lý tín hiệu tích hợp trên radar hiện nay đã đủ mạnh để chạy các mô hình mạng thần kinh nhân tạo sâu. Thay vì chỉ lọc nhiễu bằng thuật toán toán học truyền thống, trí tuệ nhân tạo giúp phân tích mô hình vi chuyển động Doppler để nhận biết hành vi của người đi bộ ví dụ: đang đi bộ, đang chạy hoặc chuẩn bị băng qua đường.

### 1.2.3. Các thách thức kỹ thuật và các vấn đề còn tồn tại

Mặc dù sở hữu những đặc tính ưu việt, radar ô tô vẫn phải đối mặt với các rào cản kỹ thuật nghiêm trọng cần được tiếp tục nghiên cứu và tối ưu hóa:

*Hiện tượng nhiễu giao thoa tương hỗ:* Khi tỷ lệ ô tô trang bị cảm biến radar tăng lên theo cấp số nhân, một số vấn đề nan giải xuất hiện: các xe di chuyển ngược chiều hoặc cùng chiều sẽ liên tục phát ra sóng điện từ trong cùng một dải tần số 77-81 GHz. Sóng phát từ xe A có thể đi thẳng vào bộ thu của xe B gây ra hiện tượng giao thoa sóng. Dẫn đến hệ quả là làm tăng đáng kể nhiễu nền làm giảm độ nhạy của bộ thu, dẫn đến việc bỏ sót các mục tiêu có diện tích phản xạ hiệu dụng nhỏ như người đi bộ hoặc tạo ra các mục tiêu ảo hay còn gọi là hiện tượng nhiễu bóng ma trong hệ thống.

*Độ phân giải góc hạn chế:* Độ phân giải góc của radar phụ thuộc trực tiếp vào kích thước vật lý của mảng anten hay còn gọi là khẩu độ anten. Do không gian lắp đặt trên ô tô bị giới hạn nghiêm ngặt, radar truyền thống có độ phân giải góc khá kém (thường từ 4 đến 10 độ). Điều này dẫn đến sự mất khả năng phân tách các mục tiêu nằm gần nhau ở khoảng cách xa. Ví dụ, một người đi bộ đứng sát cạnh một chiếc xe ô tô đang đỗ sẽ bị radar gộp chung thành một đa mục tiêu duy nhất, gây nguy hiểm cho các kịch bản phanh khẩn cấp tự động.

*Bài toán xử lý vật thể tĩnh và nhiễu địa hình:* Sóng radar phản xạ rất mạnh trên các bề mặt kim loại hoặc bê tông. Trên đường giao thông, các vật thể cố định như biển báo giao thông thấp, lan can cầu, nắp cống bằng kim loại tạo ra các tín hiệu phản xạ cực mạnh. Để tránh việc hệ thống liên tục kích hoạt phanh nhầm do hiểu lầm nắp cống là chướng ngại vật, chúng ta thường phải lập trình các bộ lọc để triệt tiêu các mục tiêu có vận tốc bằng không. Tuy nhiên, bộ lọc này vô tình tạo ra một điểm mù nguy hiểm: nếu có một chiếc xe ô tô bị hỏng và dừng chết máy đột ngột trên đường cao tốc, radar có thể sẽ lọc bỏ hoàn toàn tín hiệu của chiếc xe này dẫn đến các vụ va chạm nghiêm trọng. Do vậy, các nghiên cứu nhằm khắc phục vấn đề này vẫn là mục tiêu của các công ty nghiên cứu giải pháp và các hãng sản xuất xe ô tô.

## 1.3. Nguyên lý hoạt động cơ bản của hệ thống radar

### 1.3.1. Phương pháp xác định khoảng cách

Nguyên lý cơ bản nhất của mọi hệ thống radar là xác định khoảng cách từ cảm biến đến vật thể dựa trên phương pháp đo thời gian di chuyển đến mục tiêu của sóng điện từ. Một tín hiệu sóng vô tuyến được phát ra từ anten phát, lan truyền trong không

gian với vận tốc ánh sáng, va chạm vào bề mặt của mục tiêu và phản xạ ngược trở lại anten thu.

Sóng điện từ lan truyền trong môi trường khí quyển với vận tốc xấp xỉ vận tốc ánh sáng trong chân không, ký hiệu là: $c \approx 3 \times 10^8\ {}^{m}/_{s}$. Do sóng phải thực hiện một hành trình phản hồi (đi từ radar đến mục tiêu và quay trở về), tổng quãng đường mà sóng đã di chuyển bằng hai lần khoảng cách hình học giữa xe và vật thể. Do đó, mối quan hệ giữa khoảng cách $R$ và thời gian trễ $\Delta t$ được biểu diễn qua phương trình toán học nền tảng sau công thức 1.1:

$$R = \frac{c \times \Delta t}{2} \tag{1.1}$$

Trong đó:

- R: Khoảng cách từ radar đến mục tiêu (đơn vị: m).
- c: Vận tốc ánh sáng truyền trong chân không ($c \approx 3 \times 10^8\ {}^{m}/_{s}$).
- $\Delta t$: Thời gian từ thời điểm sóng radar phát đi đến mục tiêu và phản xạ lại ( đơn vị: giây).

Đối với các ứng dụng ô tô, thách thức lớn nhất của phương pháp đo xung trực tiếp là thời gian trễ rất nhỏ. Ví dụ, nếu một vật thể nằm cách đầu xe một khoảng cách R = 15 m, thời gian trễ thu được sẽ là: $\Delta t = \frac{2 \times 15}{3 \times 10^8} = 10^{-7}(s) = 100(ns)$.Để đo lường được khoảng thời gian ở mức nano giây với độ chính xác cao, phần cứng đòi hỏi các bộ đếm xung và mạch chuyển đổi ADC có tần số lấy mẫu rất lớn, đẩy chi phí sản xuất lên mức không tưởng đối với một thiết bị thương mại trên ô tô. Đây chính là lý do công nghệ FMCW được áp dụng thay thế.

### 1.3.2. Hiệu ứng Doppler và phương pháp đo vận tốc tương đối

Một trong những ưu điểm vượt trội nhất của radar so với Camera hay LiDAR là khả năng đo trực tiếp vận tốc tương đối tức thời của mục tiêu trong một chu kỳ quét duy nhất mà không cần thực hiện phép tính vi phân khoảng cách theo thời gian. Tính năng này dựa trên hiện tượng vật lý nổi tiếng: Hiệu ứng Doppler.

Khi một nguồn phát sóng vô tuyến và một mục tiêu phản xạ có sự chuyển động tương đối so với nhau, tần số của tín hiệu sóng nhận được tại bộ thu sẽ bị dịch chuyển so với tần số của tín hiệu được phát ra ban đầu. Sự dịch chuyển tần số này được gọi là tần số Doppler, ký hiệu là $f_d$. Giá trị và dấu của tần số Doppler phụ thuộc hoàn toàn vào

vận tốc hướng kính (radial velocity) tương đối giữa hai đối tượng, được xác định bởi công thức:

$$f_d = \frac{2 \times v_r}{\lambda} = \frac{2 \times v_r \times f_0}{c} \quad (1.2)$$

Trong đó:

- $f_d$: Tần số dịch chuyển Doppler (đơn vị: Hertz - Hz).
- $v_r$: Vận tốc hướng kính tương đối giữa radar và mục tiêu (đơn vị: m/s).
- $\lambda$: Bước sóng của tín hiệu radar phát ra ($\lambda = {}^{c}/_{f_0}$ đơn vị: mét - m).
- $f_0$: Tần số trung tâm của sóng mang phát ra (ví dụ: 77 GHz).

Dựa vào dấu của $f_d$ bộ xử lý có thể lập tức xác định xu hướng chuyển động của mục tiêu:

- Nếu mục tiêu di chuyển lại gần xe ($v_r > 0$ theo quy ước tiến lại gần), các bước sóng phản xạ bị "nén" lại, dẫn đến tần số nhận được cao hơn tần số phát ra ($f_d > 0$).
- Nếu mục tiêu di chuyển ra xa xe ($v_r < 0$), các bước sóng phản xạ bị "giãn" ra, dẫn đến tần số nhận được nhỏ hơn tần số phát ra ($f_d < 0$).

Ở tần số hoạt động 77 GHz, bước sóng $\lambda$ vô cùng nhỏ, chỉ khoảng 3.9 mm. Do đó, ngay cả một sự thay đổi vận tốc rất nhỏ của mục tiêu cũng tạo ra một sự dịch tần Doppler $f_d$ đủ lớn để các bộ xử lý tín hiệu số (DSP) có thể phát hiện và đo lường một cách cực kỳ nhạy bén.

### 1.3.3. Phương pháp điều chế và xử lý tín hiệu radar FMCW

Để giải quyết bài toán đo khoảng cách ngắn với chi phí thấp, radar ô tô hiện đại sử dụng công nghệ điều chế tần số sóng liên tục. Thay vì phát ra các xung năng lượng ngắt quãng, radar FMCW phát ra một dòng sóng vô tuyến liên tục nhưng tần số của nó được điều chế theo thời gian theo một dạng đồ thị tuyến tính xác định, thường là dạng răng cưa hoặc dạng hình tam giác và được gọi là một tín hiệu "Chirp".

Một tín hiệu "Chirp" cơ bản được đặc trưng bởi các thông số hình học sau: Tần số bắt đầu $f_c$, Băng thông điều chế B thời gian kéo dài của một "Chirp" $T_c$, và độ dốc tần số (slope) $S = {}^{B}/_{T_c}$. Quy trình trích xuất thông tin khoảng cách và vận tốc từ sóng FMCW diễn ra qua các bước phần cứng và phần mềm nghiêm ngặt như sau:

Bước 1: Trộn tín hiệu và tạo tần số phách: Khi anten thu nhận tín hiệu phản xạ (RX) từ mục tiêu phản xạ quay lại tín hiệu này thực chất là một bản sao của tín hiệu phát (TX) nhưng bị dịch trễ một khoảng thời gian $\Delta t$ và bị dịch tần Doppler $f_d$. Tín hiệu phát TX và tín hiệu thu RX được đưa đồng thời vào một bộ trộn phần cứng (Mixer). Bộ trộn thực hiện phép nhân hai tín hiệu trong miền thời gian, cho ra đầu ra gồm hai thành phần: một thành phần có tần số bằng tổng tần số (TX + RX) và một thành phần có tần số bằng hiệu tần số (TX - RX). Một bộ lọc thông thấp sẽ loại bỏ thành phần tổng và giữ lại thành phần hiệu, tạo ra tín hiệu trung tần hay còn gọi là tần số phách $f_b$.

Trong trường hợp mục tiêu tĩnh (không có dịch chuyển Doppler), tần số phách $f_b$ là một hằng số cố định trong suốt thời gian diễn ra Chirp và tỷ lệ thuận tuyến tính với khoảng cách:

$$f_b = S \times \Delta t = \frac{2 \times S \times R}{C} \tag{1.1}$$

Như vậy, bài toán đo thời gian trễ nanogiây phức tạp đã được chuyển đổi thành bài toán đo một tần số : $f_b$nằm trong dải Megahertz (MHz) rất dễ dàng xử lý bởi các mạch điện tử thông dụng.

Bước 2: Xử lý tín hiệu số thông qua phép biến đổi Fourier 2 chiều (2D FFT): Để phân tách đồng thời cả khoảng cách và vận tốc trong kịch bản có nhiều mục tiêu động di chuyển phức tạp, hệ thống áp dụng quy trình xử lý tín hiệu số 2D FFT trên một cấu trúc ma trận dữ liệu (Frame) gồm nhiều Chirp liên tiếp:

- Phép biến đổi Fourier thứ nhất: Tín hiệu IF của từng Chirp đơn lẻ sau khi qua bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự sang tín hiệu số sẽ được thực hiện phép biến đổi FFT. Kết quả của bước này sẽ cho ra các đỉnh phổ đại diện cho khoảng cách của các mục tiêu. Trục ngang lúc này chuyển thành trục khoảng cách.
- Phép biến đổi Fourier thứ hai: Hệ thống xếp chồng các kết quả khoảng cách FFT của hàng loạt Chirp (ví dụ 128 hoặc 256 Chirp) trong một khung hình thành một ma trận hai chiều. Phép toán FFT thứ hai được thực hiện theo chiều dọc qua các Chirp liên tiếp tại vị trí đỉnh khoảng cách. Sự thay đổi pha của tín hiệu qua các Chirp liên tiếp chính là do hiệu ứng Doppler tạo ra. Kết quả của phép toán này sẽ bóc tách hoàn toàn vận tốc tương đối của mục tiêu.

Đầu ra cuối cùng của quá trình xử lý 2D FFT là một bản đồ hai chiều trực quan được gọi là bản đồ Range-Doppler. Trên bản đồ này, mỗi mục tiêu cô lập sẽ xuất hiện

dưới dạng một đỉnh năng lượng có tọa độ cụ thể $(R, v)$ cho phép thuật toán định vị chính xác vị trí và trạng thái động lực học của vật thể.

## 1.4. Tổng quan về hệ thống an toàn trên xe ô tô

### 1.4.1. Tổng quan hệ thống an toàn chủ động (ADAS)

Kiến trúc của các hệ thống an toàn trên xe ô tô hiện đại được chia làm hai trường hợp chính an toàn bị động và an toàn chủ động. Hệ thống an toàn bị động như khung gầm hấp thụ lực, túi khí, dây đai an toàn chỉ kích hoạt khi va chạm đã xảy ra nhằm giảm thiểu chấn thương cho hành khách. Trong khi đó, hệ thống an toàn chủ động (ADAS) hướng tới việc can thiệp, phòng ngừa và ngăn chặn va chạm không cho nó xảy ra.

Mọi hệ thống ADAS từ cơ bản đến nâng cao đều vận hành dựa trên một chu trình xử lý vòng kín kinh điển gồm 3 khối chức năng cốt lõi xếp chồng cấu trúc liên thông:

Khối cảm nhận: Bao gồm toàn bộ các cảm biến ngoại quan làm nhiệm vụ liên tục quét môi trường và thu thập dữ liệu thô. Như đã phân tích, để bù trừ khiếm khuyết vật lý của từng loại cảm biến, các kỹ sư áp dụng thuật toán hợp nhất cảm biến. Dữ liệu từ radar và Camera được đồng bộ hóa để tận dụng khả năng nhận diện vật thể của Camera và khả năng đo khoảng cách, vận tốc chính xác của radar.

Khối quyết định và hoạch định: là bộ não xử lý trung tâm. Khối này chạy các thuật toán bám bắt mục tiêu, tính toán thời gian chạm va chạm ước tính. Nếu vượt quá ngưỡng an toàn, hệ thống sẽ đưa ra chiến lược ứng phó phát tín hiệu cảnh báo bằng âm thanh/hình ảnh, hoặc ra lệnh can thiệp khẩn cấp nếu người lái không phản hồi.

Khối chấp hành: Tiếp nhận lệnh từ khối quyết định và trực tiếp điều khiển các cơ cấu cơ điện tử của xe thông qua mạng giao tiếp CAN FD hoặc Automotive Ethernet bao gồm: Hệ thống phanh điện tử ESP/ESC để tự động giảm tốc. Hệ thống trợ lực lái điện EPS để tự động giữ làn hoặc đánh lái tránh chướng ngại vật; và Bộ điều khiển động cơ ECU để ngắt ga.

*Bảng 1.1: So sánh đặc tính kĩ thuật giữa các cảm biến chủ đạo trong hệ thống ADAS.*

| Tiêu chí so sánh | Cảm biến radar | Cảm biến Camera | Hệ thống LiDAR |
|---|---|---|---|
| Đo khoảng cách (Range) | Rất tốt (Lên đến 250m+) | Trung bình (Ước lượng hình học) | Xuất sắc (Độ chính xác cỡ mm) |

| Tiêu chí so sánh | Cảm biến radar | Cảm biến Camera | Hệ thống LiDAR |
|---|---|---|---|
| Đo vận tốc tương đối | Xuất sắc (Hiệu ứng Doppler) | Kém (Phải tính toán qua nhiều frame) | Trung bình (Tính toán qua sai lệch vị trí) |
| Đo góc và phân giải biên dạng | Trung bình đến Kém | Xuất sắc (Độ phân giải megapixel) | Xuất sắc (Đám mây điểm 3D đặc) |
| Kháng thời tiết bất lợi | Tuyệt vời (Không bị ảnh hưởng) | Kém (Bị mù bởi mưa, sương, tối) | Trung bình (Bị tán xạ bởi hạt nước/tuyết) |
| Chi phí sản xuất hàng loạt | Thấp (Nhờ công nghệ RF-CMOS) | Rất thấp | Rất cao (Do cơ cấu quang học phức tạp) |

### 1.4.2. Phân loại và chức năng ứng dụng của radar trên ô tô

Trong một cấu trúc xe ô tô hiện đại, không chỉ có một cảm biến radar duy nhất mà là một mạng lưới các module radar được bố trí tại các vị trí chiến lược xung quanh thân xe. Dựa trên khoảng cách phát hiện và góc mở FOV, radar ô tô được phân chia thành ba nhóm chính:

Radar tầm ngắn SRR: Thường vận hành ở dải tần số 79 GHz với băng thông rộng giúp đạt độ phân giải khoảng cách cực cao. Phạm vi quét của SRR giới hạn từ 0.1 mét đến khoảng 30 mét nhưng có góc mở FOV rất rộng lên tới hơn 120 độ. Các module SRR thường được lắp đặt ẩn phía sau bốn góc của cản trước và cản sau. Chúng chịu trách nhiệm thực thi các tính năng an toàn đô thị cự ly gần bao gồm: hệ thống cảnh báo điểm mù BSD, hệ thống hỗ trợ chuyển làn an toàn (LCA) và hệ thống cảnh báo phương tiện cắt ngang phía sau khi lùi (RCTA).

Radar tầm trung (MRR: Vận hành ở băng tần 77 GHz, có phạm vi đo đạc trong khoảng từ 30 mét đến 100 mét với góc mở FOV trung bình (khoảng 45 đến 60 độ). Lắp đặt chủ yếu ở khu vực chính giữa cản trước hoặc phía sau lưới tản nhiệt. MRR đóng vai trò trung tâm trong việc kích hoạt hệ thống phanh khẩn cấp tự động trong đô thị (AEB-City) và hệ thống cảnh báo va chạm phía trước (FCW) bằng cách phát hiện sớm các phương tiện giảm tốc đột ngột hoặc người đi bộ cắt ngang đường.

Radar tầm xa (LRR - Long Range radar): Thiết kế chuyên biệt cho các kịch bản di chuyển tốc độ cao trên đường cao tốc. LRR tập trung năng lượng bức xạ vào một chùm tia cực hẹp (góc mở FOV chỉ từ 10 đến 20 độ) để đẩy tầm quét đi rất xa, đạt khoảng cách từ 100 mét đến hơn 250 mét. Module này là linh hồn của tính năng Kiểm soát hành trình thích ứng (ACC - Adaptive Cruise Control), cho phép chiếc xe tự động bám đuôi, duy trì khoảng cách an toàn tuyệt đối với xe phía trước ở dải tốc độ lên tới 150 km/h và hệ thống phanh tự động khẩn cấp tốc độ cao (AEB-Highway).

*Bảng 1.2: Phân định thông số kỹ thuật và miền ứng dụng của các dòng radar ô tô.*

| Loại radar | Băng tần hoạt động | Tầm xa phát hiện | Góc mở | Ứng dụng |
|---|---|---|---|---|
| Tầm ngắn | 79 GHz – 81 GHz | 0.1m – 30 m | $100^0 - 150^0$ | BSD, RCTA, LCA Cảnh báo mở cửa |
| Tầm trung | 76 GHz – 77 GHZ | 30m – 100m | $45^0 - 60^0$ | FCM, AEB-City, hỗ trợ qua giao lộ |
| Tầm xa | 76 GHz – 77 GHZ | 100m - > 250m | $10^0 - 20^0$ | ACC, AEB-Highway |

### 1.4.3. Xu hướng phát triển và khả năng tích hợp của hệ thống trong tương lai

Sự phát triển nhanh chóng của cấu trúc điện-điện tử trên ô tô (E/E Architecture) đang thúc đẩy công nghệ radar tiến về hai xu hướng lớn:

*Xử lý dữ liệu tập trung:* Trong kiến trúc truyền thống, mỗi cảm biến radar là một module thông minh tự thực hiện ADC, FFT, bám vết vật thể và chỉ gửi danh sách mục tiêu đã lọc về ECU trung tâm qua mạng CAN Bus. Xu hướng mới hiện nay là đơn giản hóa phần cứng tại biên, biến radar thành các "cảm biến vệ tinh". Các cảm biến này chỉ làm nhiệm vụ thu phát sóng và chuyển toàn bộ dữ liệu trung tần (IF) hoặc dữ liệu mảng thô qua mạng Automotive Ethernet tốc độ cao về siêu máy tính trung tâm của xe. Tại đây, việc xử lý 2D FFT và hợp nhất dữ liệu thô được thực hiện tập trung, giúp giảm độ trễ và tăng tối đa độ chính xác của mô hình môi trường.

Sự phát triển của radar định nghĩa bằng phần mềm tương tự xu hướng xe định nghĩa bằng phần mềm (SDV), các hệ thống radar thế hệ mới đang chuyển dần sang kiến trúc mà phần cứng được tiêu chuẩn hóa, còn các đặc tính hoạt động được điều khiển và tái cấu hình hoàn toàn bằng phần mềm. Thay vì thiết kế phần cứng riêng cho từng ứng dụng, một nền tảng radar thống nhất có thể linh hoạt điều chỉnh các tham số như băng thông tín hiệu, độ dốc Chirp, thời gian khung, cấu trúc dạng sóng và mẫu búp sóng của mảng anten theo thời gian thực. Việc tái cấu hình này cho phép radar thích nghi với từng điều kiện vận hành của phương tiện, chẳng hạn tự động sử dụng chế độ quét góc rộng để tăng khả năng phát hiện mục tiêu ở môi trường đô thị và chuyển sang chế độ quét tầm xa với độ phân giải vận tốc cao khi phương tiện di chuyển trên đường cao tốc. Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao hiệu quả khai thác phần cứng mà còn mở ra khả năng cập nhật, tối ưu và bổ sung các chức năng mới thông qua phần mềm trong suốt vòng đời của hệ thống mà không cần thay đổi phần cứng.

## 1.5. Kết luận chương

Tổng kết lại, Chương 1 đã thiết lập một nền tảng lý thuyết và tổng quan hệ thống vững chắc về công nghệ radar ứng dụng trên ô tô. Trải qua lịch sử hơn một thế kỷ tiến hóa, từ những hệ thống quân sự phức tạp, radar ngày nay đã đạt tới đỉnh cao công nghệ với kiến trúc radar-on-Chip siêu nhỏ gọn, mở ra kỷ nguyên của radar hình ảnh 4D với năng lực nhận thức không gian đa chiều toàn diện. Bản chất vật lý đặc trưng của sóng điện từ mang lại cho radar lợi thế tuyệt đối về khả năng xuyên thấu các điều kiện thời tiết khắc nghiệt, trở thành mảnh ghép tối quan trọng bên cạnh Camera và LiDAR trong kiến trúc an toàn chủ động ADAS.

Thông qua việc phân tích toán học về nguyên lý đo khoảng cách ToF, hiệu ứng Doppler dịch tần và đặc biệt là quy trình biến điệu, trích xuất tín hiệu phách trong radar FMCW bằng thuật toán 2D FFT, chúng ta đã làm rõ cơ chế chuyển đổi thông minh từ các đại lượng vật lý cự ly ngắn thành các dải tần số Megahertz dễ dàng xử lý. Việc hiểu rõ cách thức phân loại các module radar (SRR, MRR, LRR) cùng xu hướng dịch chuyển sang kiến trúc xử lý dữ liệu thô tập trung chính là tiền đề lý thuyết quyết định để đề án tiến tới triển khai nghiên cứu chuyên sâu về thiết kế, mô phỏng cấu trúc phần cứng và phát triển các thuật toán tối ưu hóa tín hiệu ở các chương tiếp theo.

# CHƯƠNG II: NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG RADAR FMCW TRÊN Ô TÔ

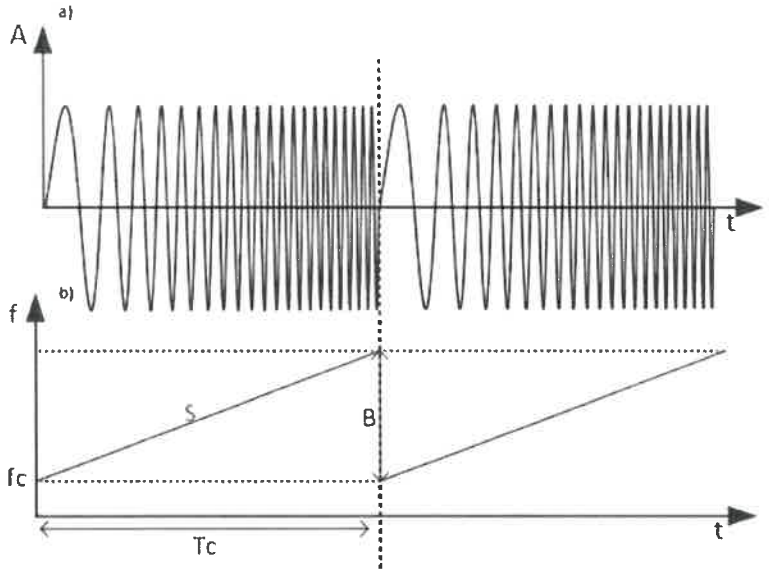
## 2.1. Giới thiệu chương

Như đã được đề cập hướng nghiên cứu từ Chương I công nghệ điều chế tần số sóng liên tục hiện đang đóng vai trò quan trọng và trở thành tiêu chuẩn với các hệ thống cảm biến hỗ trợ người lái trên ô tô hiện đại. Trong một môi trường giao thông phức tạp nơi các phương tiện tự hành phải đưa ra quyết định gần như ngay lập tức. Việc đảm bảo tính chính xác dữ liệu của cảm biến là một yêu cầu tiên quyết. Vì lý do này, chúng ta cần phân tích mang tính toàn diện, chuyên sâu và có hệ thống về nền tảng lý thuyết các thuật toán xử lý tín hiệu của Radar FMCW. Qua đó làm rõ toàn bộ cơ chế tổng hợp, thu phát tín hiệu cho đến các thuật toán xử lý tín hiệu.

Trong chương này, sẽ trình bày chi tiết về hoạt động cơ bản của radar FMCW. Đầu tiên, đề án sẽ đề cấp đến quá trình tổng hợp tín hiệu ở phần cứng, sau đó là quá trình ước lượng các đặc điểm mục tiêu như phạm vi, vận tốc và góc độ thông qua các phép biến đổi Fourier. Bước tiếp theo đề cập đến các đặc tính của tín hiệu và mục tiêu được cung cấp bằng cách khai thác và phân tích các khái niệm vật lý cốt lõi như tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và tiết diện phản xạ radar. Cuối cùng, chương này sẽ đề cập đến kỹ thuật xử lý tín hiệu thích ứng cơ bản để phát hiện mục tiêu dựa trên năng lượng phổ trung bình từ tín hiệu đo được thuật toán CA-CFAR.

## 2.2. Nguyên lý hoạt động radar FMCW

Nguyên lý hoạt động cơ bản của hệ thống radar FMCW được xây dựng dựa trên dạng tín hiệu đặc biệt được gọi là "Chirp". Khác với radar xung truyền thống chỉ phát ra các xung năng lượng rời rạc còn radar FMCW phát ra sóng liên tục. Nhờ vào đặc tính này hệ thống hoạt động ở mức công suất thấp mà vẫn duy trì được tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu cao quá trình tích lũy tín hiệu trong thời gian dài. Về mặt bản chất tín hiệu này có thể được hiểu là một sóng hình sin với giá trị tần số tăng hoặc giảm tuyến tính theo thời gian như được trình bày trong Hình 2.1, Hình 2.1(a) biểu diễn tín hiệu trong miền biên độ theo thời gian, Hình 2.1(b) thể hiện sự biến thiên của tần số tức thời theo thời gian.




*Hình 2.1: Tín hiệu Chirp.*

Từ Hình 2.1(b) có thể xác định bốn tham số đặc trưng của một tín hiệu Chirp, bao gồm:

- Tần số khởi đầu ($f_c$): là tần số tại thời điểm bắt đầu phát Chirp. Trong phạm vi nghiên cứu của đề án này, tín hiệu được tạo bởi mô-đun radar sóng milimet (mmWave) hoạt động trong dải tần 76–81 GHz.
- Băng thông quét tần ($B$): là độ rộng phổ tần của tín hiệu Chirp, được xác định bằng hiệu giữa tần số kết thúc và tần số bắt đầu của quá trình quét.
- Thời gian Chirp ( $T_c$): là khoảng thời gian để hoàn thành một chu kỳ quét tần.
- Độ dốc Chirp ($S$): biểu thị tốc độ thay đổi tần số theo thời gian, được xác định theo công thức:

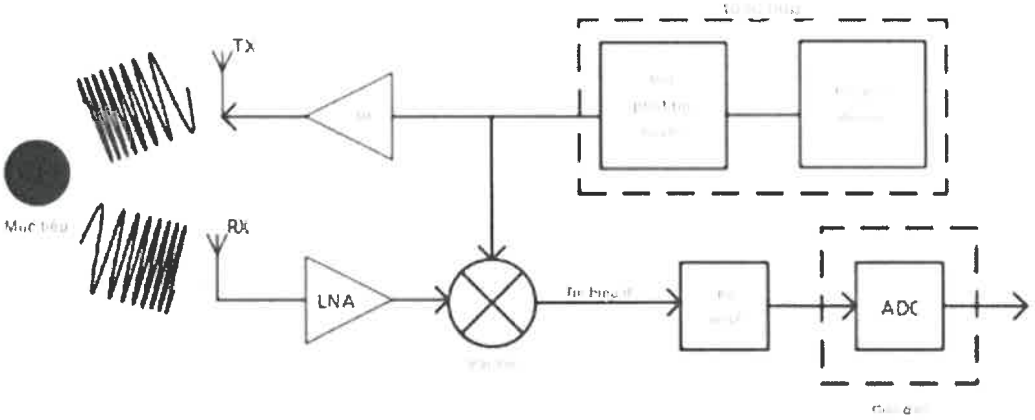
$$S = \frac{B}{T_c} \tag{2.1}$$

với đơn vị thường được biểu diễn dưới dạng MHz/μs hoặc Hz/s.

Bốn tham số trên quyết định các đặc tính quan trọng của hệ thống radar FMCW, đồng thời ảnh hưởng trực tiếp đến độ phân giải khoảng cách, phạm vi đo cực đại, độ phân giải vận tốc cũng như hiệu năng xử lý tín hiệu của hệ thống.

Phần trên đã đề cập đến khái niệm tín hiệu Chirp, tiếp theo chúng ta tìm hiểu nguyên lý hoạt động tổng quát của hệ thống radar FMCW. Hình 2.2 mô tả chuỗi xử lý

tín hiệu từ quá trình phát, thu cho đến khi tạo ra dữ liệu số phục vụ cho các thuật toán xử lý tín hiệu số (DSP).




*Hình 2.2: Quy trình hoạt động của radar FMCW.*

Bộ tổng hợp tần số tạo tín hiệu Chirp dựa trên các tham số đã được cấu hình. Tín hiệu được phát qua anten phát, phản xạ từ mục tiêu và được anten thu tiếp nhận. Tín hiệu thu sau đó được trộn với tín hiệu phát để tạo tín hiệu tần số trung tần tiếp tục được lọc thông thấp số hóa và truyền đến bộ xử lý số.

Quy trình hoạt động của radar FMCW có thể được mô tả như sau:

Đầu tiên, bộ tổng hợp tần số bao gồm bộ tạo tín hiệu sóng điện từ và bộ tạo dạng sóng quét tần, sinh ra tín hiệu Chirp dựa trên các tham số đã đượccấu hình. Tín hiệu này sau khi được khuếch đại sẽ bức xạ ra môi trường thông qua anten phát.

Khi sóng điện từ từ gặp mục tiêu, một phần năng lượng sẽ phản xạ trở lại và được anten thu tiếp nhận sau một khoảng thời gian trễ tương ứng với khoảng cách từ radar đến mục tiêu. Do mục tiêu có thể chuyển động tương đối so với radar nên tín hiệu phản xạ không chỉ bị trễ pha mà còn chịu ảnh hưởng của hiệu ứng Doppler dẫn đến sự thay đổi về tần số.

Tín hiệu thu sau khi được khuếch đại bởi bộ khuếch đại nhiễu thấp sẽ được đưa vào bộ trộn cùng với bản sao của tín hiệu Chirp đang phát. Quá trình trộn này tạo ra tín hiệu có tần số trung tần, còn gọi là tín hiệu nhịp chứa toàn bộ thông tin về khoảng cách và vận tốc của mục tiêu.

Tiếp theo, tín hiệu trung tần được đưa qua bộ lọc thông thấp nhằm loại bỏ các thành phần tần số cao không mong muốn sau đó được chuyển đổi từ tín hiệu tương tự

sang tín hiệu số thông qua bộ chuyển đổi tương tự - số. Dữ liệu số thu được được truyền tới bộ xử lý để thực hiện các thuật toán xử lý tín hiệu số.

Các thuật toán xử lý tín hiệu đóng vai trò trung tâm trong việc khai thác thông tin từ tín hiệu trung tần. Bằng cách phân tích tín hiệu trong miền tần số thông qua các phép biến đổi như FFT một chiều, FFT hai chiều hoặc FFT ba chiều, hệ thống có thể xác định các thông số của mục tiêu bao gồm khoảng cách, vận tốc tương đối, góc phương vị và nhiều đặc trưng khác. Những nội dung này sẽ được trình bày chi tiết trong các mục tiếp theo và là cơ sở lý thuyết cho việc xây dựng các thuật toán xử lý tín hiệu được sử dụng trong đề án.

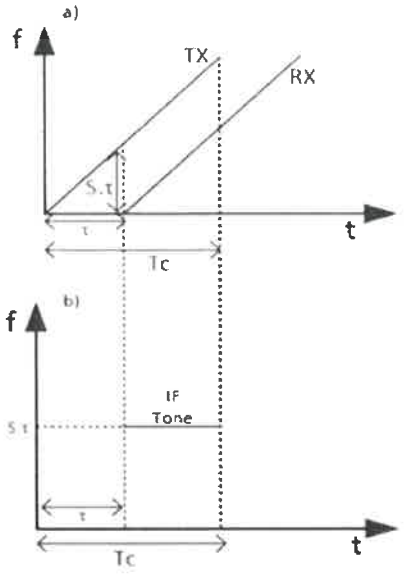
### 2.2.1. Ước lượng khoảng cách

Kết quả đo lường đầu tiên và thường xuyên nhất, mà chúng ta sử dụng radar FMCW là ước lượng phạm vi, tương ứng với khoảng cách giữa mô-đun radar (với các ăng-ten truyền và thu tích hợp) và mục tiêu được đo. Tuy nhiên, để hiểu đầy đủ cách phạm vi liên quan đến tín hiệu Chirp, chúng ta quay lại sơ đồ quy trình làm việc của radar trong Hình 2.2 và phân tích tín hiệu trung tần đến từ khối trộn.

Đầu ra từ một khối trộn Xout từ hai đầu vào hình sin có thể được biểu diễn như sau:

$$X_{out}(t) = \sin[(\omega_1 - \omega_1)t + (\theta_1 - \theta_2)] \quad (2.2)$$

Trong đó $\omega_1 - \omega_1$ và $\theta_1 - \theta_2$ là sự khác biệt của các tần số tức thời và pha của hai tín hiệu đầu vào tương ứng, như được trình bày trong Hình 2.3. Trong sơ đồ này, có một mục tiêu duy nhất trước radar tạo ra một tín hiệu trung tần (IF) với giá trị tần số không đổi là $S \cdot \tau$ (trong đó S là độ dốc của tín hiệu Chirp và τ là thời gian lan truyền hai chiều của sóng điện từ, từ anten radar đến mục tiêu và phản xạ trở lại anten thu của radar).



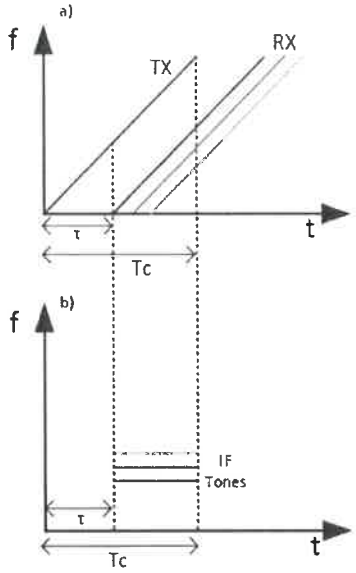

*Hình 2.3: Tín hiệu IF của phép đo một mục tiêu. Hình a) biểu diễn miền tần số-thời gian của tín hiệu truyền và thu. Hình b) biểu diễn miền tần số-thời gian của tần số IF.*

Mối quan hệ của tần số IF với phạm vi của mục tiêu có thể giải thích bằng phương trình 2.1. Trong đó giá trị $S.\tau$ có thể được biểu diễn như sau:

$$IF_{tone} = S.\tau = S.\frac{2R}{c} \tag{2.3}$$

Trong trường hợp khi trong vùng quan sát của radar tồn tại nhiều mục tiêu, mỗi mục tiêu sẽ phản xạ một bản sao của tín hiệu Chirp về anten thu. Do các mục tiêu nằm ở những khoảng cách khác nhau, tín hiệu phản xạ từ mỗi mục tiêu sẽ có độ trễ truyền khác nhau. Sau quá trình trộn với tín hiệu phát, hệ thống sẽ tạo ra nhiều tín hiệu IF có các tần số khác nhau, như minh họa trong Hình 2.4.

Mỗi thành phần tần số IF tương ứng với một mục tiêu và có giá trị tỷ lệ thuận với khoảng cách từ radar đến mục tiêu. Vì vậy, thông qua việc phân tích phổ tần của tín hiệu IF, hệ thống có thể xác định được khoảng cách của từng mục tiêu trong vùng quan sát.




*Hình 2.4: Tín hiệu IF của phép đo nhiều mục tiêu. Hình a) biểu diễn miền tần số-thời gian của các tín hiệu truyền và thu. Hình b) biểu diễn miền tần số-thời gian của các tần số IF.*

Khi hệ thống radar hoạt động trong môi trường có một hoặc nhiều mục tiêu, hai thông số quan trọng cần được xác định là khoảng cách đo tối đa và độ phân giải khoảng cách. Khoảng cách đo tối đa xác định phạm vi xa nhất mà radar vẫn có thể phát hiện mục tiêu một cách đáng tin cậy, trong khi độ phân giải khoảng cách biểu thị khả năng phân biệt hai mục tiêu nằm gần nhau theo phương truyền sóng.

Độ phân giải khoảng cách có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng phát hiện nhiều mục tiêu. Nếu hai mục tiêu nằm quá gần nhau, các tín hiệu phản xạ của chúng sẽ tạo ra các thành phần tần số IF rất gần nhau, khiến hệ thống không thể tách biệt chúng và có thể chỉ nhận diện thành một mục tiêu duy nhất.

Dựa trên biểu thức của tần số phách trong phương trình (1.1) và độ dốc của tín hiệu Chirp trong phương trình (2.1), đồng thời xét đến điều kiện hai thành phần tần số chỉ có thể được phân biệt khi khoảng cách tần số giữa chúng lớn hơn độ phân giải tần số của phép biến đổi Fourier, tức là:

$$\Delta f_c \geq \frac{1}{T_c} \tag{2.4}$$

Thì độ phân giải khoảng cách ($R_{res}$) của radar được xác định theo công thức sau:

$$R_{res} = \frac{c}{2B} \tag{2.5}$$

Từ biểu thức trên có thể thấy, độ phân giải khoảng cách chỉ phụ thuộc vào băng thông quét ($B$) của tín hiệu Chirp. Khi băng thông tăng, radar có khả năng phân biệt hai mục tiêu nằm gần nhau tốt hơn, do đó độ phân giải khoảng cách được cải thiện.

Quan sát Hình 2.4 cho thấy mục tiêu ở khoảng cách lớn nhất sẽ tạo ra tín hiệu IF có tần số lớn nhất. Tuy nhiên, trước khi thực hiện các thuật toán xử lý tín hiệu số, tín hiệu IF phải được chuyển đổi từ miền tương tự sang miền số thông qua bộ chuyển đổi tương tự – số. Do đó, dải tần của tín hiệu IF bị giới hạn bởi tần số lấy mẫu ($f_s$) của ADC. Theo định lý lấy mẫu Nyquist, tần số IF lớn nhất có thể được lấy mẫu chính xác là $f_s/2$. Kết hợp giới hạn trên với biểu thức của tần số IF trong phương trình (2.1), khoảng cách đo tối đa ($R_{\max}$) của radar được xác định theo công thức 2.6:

$$R_{max} = \frac{f_s . c}{2S} \tag{2.6}$$

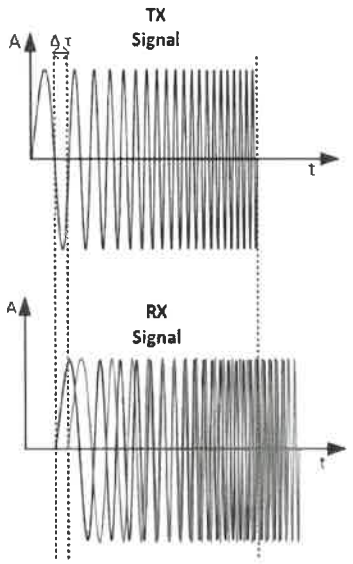
### 2.2.2. Ước lượng vận tốc

Trong thực tế, luôn xuất hiện trường hợp nhiều mục tiêu nằm ở cùng một khoảng cách so với radar nhưng chuyển động với các vận tốc tương đối khác nhau. Khi đó, nếu chỉ thực hiện FFT theo chiều khoảng cách trên dữ liệu của một Chirp thì các tín hiệu phản xạ từ những mục tiêu này sẽ tạo ra cùng một tần số IF do chúng có cùng khoảng cách đến radar. Kết quả là phổ tần chỉ xuất hiện một đỉnh phổ, khiến hệ thống không thể phân biệt được từng mục tiêu riêng lẻ.

Để giải quyết vấn đề này, radar FMCW không chỉ khai thác thông tin về tần số IF mà còn sử dụng sự thay đổi pha của tín hiệu IF giữa các Chirp liên tiếp. Sự biến thiên pha này mang thông tin về vận tốc tương đối của mục tiêu, từ đó cho phép hệ thống phân tách các mục tiêu có cùng khoảng cách nhưng chuyển động với các vận tốc khác nhau. Đây chính là cơ sở của quá trình ước lượng vận tốc và Doppler FFT trong radar FMCW.

Để làm rõ mối quan hệ giữa sự thay đổi pha ($\Delta\Phi$) của tín hiệu IF và sự thay đổi khoảng cách ($\Delta R$) của mục tiêu, Hình 2.5 minh họa ảnh hưởng của sự thay đổi thời gian truyền khứ hồi ($\Delta\tau$) đến tín hiệu phát (TX) và tín hiệu thu (RX). Xét hai Chirp liên tiếp, khi mục tiêu dịch chuyển một khoảng nhỏ, thời gian truyền của tín hiệu phản xạ thay

đổi một lượng Δτ, dẫn đến sự thay đổi pha của tín hiệu IF. Mối quan hệ này là cơ sở để xác định vận tốc của mục tiêu thông qua sự biến thiên pha giữa các Chirp liên tiếp.




*Hình 2.5: Biểu diễn tín hiệu TX và RX sau một sự dịch chuyển Δτ.*

Khi mục tiêu chuyển động với một vận tốc tương đối so với radar, tín hiệu phản xạ (RX) sẽ bị trễ thêm một lượng thời gian $\Delta\tau$ (được minh họa bằng đường màu đỏ trong Hình 2.5). Đồng thời, do sự thay đổi về khoảng cách, tín hiệu phát (TX) sẽ xuất hiện thêm một độ dịch pha tương ứng bằng $2\pi f_c \Delta\tau$.

Do đó, biểu diễn dạng sóng hình sin của tín hiệu phát (TX) và tín hiệu thu (RX) có thể được viết dưới dạng công thức 2.7:

$$TX||RX = A \times \sin(2\pi f_c t + \Phi_0) \tag{2.7}$$

Trong đó A là biên độ của tín hiệu, $f_c$ là tần số sóng mang của Chirp và $\Phi_0$ là pha ban đầu của tín hiệu.

Đối với mục tiêu chuyển động, sự thay đổi khoảng cách giữa radar và mục tiêu sẽ làm thay đổi thời gian tín hiệu từ radar đến mục tiêu rồi phản xạ lại radar, từ đó dẫn đến sự thay đổi pha của tín hiệu IF. Dựa trên biểu thức của tần số IF trong phương trình (2.1) đồng thời sử dụng mối quan hệ: $c = \lambda f_c$. Trong đó $\lambda$ là bước sóng của tín hiệu mang và $c$ là tốc độ ánh sáng, cùng với $\tau$ là thời gian tín hiệu từ radar đến mục tiêu rồi phản xạ lại radar, độ lệch pha của tín hiệu IF có thể được biểu diễn như công thức (2.8):

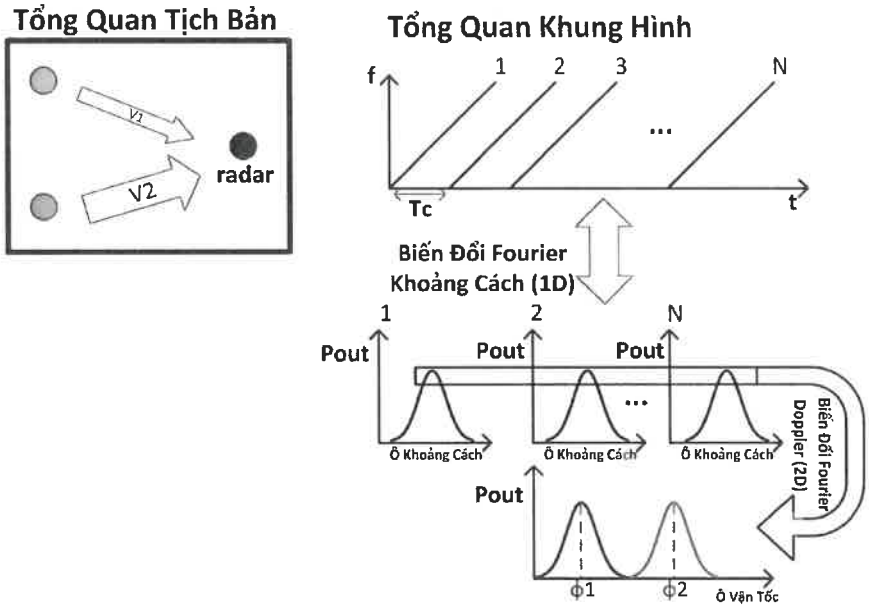
$$\Delta\Phi = 2\pi f_c \frac{2\Delta R}{c} = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \tag{2.8}$$

Trong hệ thống radar FMCW, việc ước lượng vận tốc không chỉ dựa trên một tín hiệu Chirp đơn lẻ mà được thực hiện trên chuỗi các tín hiệu Chirp được phát tuần tự với chu kỳ $T_c$. Sự khác biệt pha đo được giữa hai tín hiệu Chirp liên tiếp có thể được sử dụng để ước lượng vận tốc của mục tiêu ($v$) đã di chuyển một khoảng cách $\Delta R = v \times T_c$. Thay vào phương trình (2.8) vận tốc của mục tiêu được biểu diễn lại như phương trình (2.9) :

$$v = \frac{\lambda\Delta\Phi}{4\pi T_c} \tag{2.9}$$

Từ biểu thức trên có thể thấy, vận tốc của mục tiêu được suy ra trực tiếp từ sự biến thiên pha của tín hiệu IF theo thời gian. Đây là nguyên lý cơ bản của quá trình ước lượng vận tốc trong radar FMCW.

Để mở rộng hơn về quá trình ước lượng vận tốc, xét trường hợp có nhiều mục tiêu, trong đó hai hoặc nhiều mục tiêu nằm ở cùng một khoảng cách so với radar nhưng có các vận tốc tương đối khác nhau. Tương tự như trường hợp một mục tiêu đã trình bày trước đó radar chỉ thu được một tín hiệu IF. Tuy nhiên, tín hiệu IF này chứa thông tin pha của tất cả các mục tiêu. Do đó, để phân biệt và phát hiện từng mục tiêu cần áp dụng phép biến đổi Doppler-FFT trên chuỗi các đỉnh Range FFT tương ứng với $N$ tín hiệu Chirp được phát liên tiếp với chu kỳ $T_c$, như minh họa trong Hình 2.6.




*Hình 2.6: Quy trình ước lượng vận tốc của nhiều mục tiêu.*

Từ Hình 2.6, chúng ta có thể nhận thấy rằng mỗi đỉnh của Doppler-FFT tương ứng với sự khác biệt pha của một mục tiêu được đo. Kết hợp với kết quả từ phương trình (2.9), vận tốc tương đối của các mục tiêu có thể được biểu diễn như sau giả sử có hai mục tiêu đang tiến tới radar:

$$v_1 = \frac{\lambda \Delta\Phi_1}{4\pi T_c} \;||\; v_2 = \frac{\lambda \Delta\Phi_2}{4\pi T_c} \tag{2.10}$$

Sau khi trình bày nguyên lý ước lượng vận tốc, hai đặc tính quan trọng tiếp theo của radar là độ phân giải vận tốc ($v_{res}$) và vận tốc tối đa ($v_{max}$). Độ phân giải vận tốc được định nghĩa là độ chênh lệch vận tốc nhỏ nhất giữa các mục tiêu để radar có thể phân biệt chúng. Dựa trên phương trình (2.8) và tính chất của tín hiệu rời rạc, hai hoặc nhiều đỉnh chỉ có thể được phân biệt trong miền tần số khi khoảng cách giữa chúng lớn hơn $\frac{2\pi}{N}$(rad/sample), trong đó $N$ là số lượng Chirp được sử dụng để thực hiện Doppler FFT, độ phân giải vận tốc có thể được xác định như sau:

$$\begin{cases} \Delta\Phi > \dfrac{2\pi}{N} \\ v > \dfrac{\lambda}{2NT_c} \end{cases} \Rightarrow v_{res} = \frac{\lambda}{2T_f} \tag{2.11}$$

Trong đó, $NT_c$ được gọi là thời gian một khung quét ký hiệu là $T_f$. Mặt khác, giới hạn vận tốc tối đa có thể đo lường mà không xảy ra hiện tượng chồng lấn phổ bị chi phối

bởi định lý lấy mẫu pha. radar chỉ có thể xác định chính xác vận tốc khi độ lệch pha tuyệt đối (ΔΦ) giữa hai lần lấy mẫu liên tiếp nhỏ hơn π radian. Dựa trên điều kiện này, vận tốc tối đa được tính toán theo công thức như sau:

$$\begin{cases} \Delta\Phi < \pi \\ v < \dfrac{\lambda}{4T_c} \end{cases} \Rightarrow v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c} \tag{2.12}$$

### 2.2.3. Ước lượng góc

Trong các nội dung đã trình bày, đề án đã tiến hành phân tích các trường hợp gồm một mục tiêu riêng lẻ và nhiều mục tiêu có vận tốc tương đối khác nhau so với hệ thống radar. Tuy nhiên vẫn còn một tình huống nhiều mục tiêu đồng thời di chuyển về phía radar nhưng có cùng khoảng cách và vận tốc tương đối. Như đã đề cập ở phần trước trong trường hợp này hệ thống chỉ tạo ra một đỉnh phổ duy nhất trong miền FFT xuất hiện đồng thời cả FFT một chiều và hai chiều. Nguyên nhân do các mục tiêu chồng lấn hoàn toàn trong không gian khoảng cách - vận tốc dẫn đến không thể phân tách bằng các phương pháp này.

Vì vậy, để khắc phục hạn chế bên trên đề án đã khai thác thông tin về góc giữa phương truyền sóng tới và pháp tuyến của anten thu hay còn gọi là góc đến. Việc ước lượng góc đến cho phép phân biệt các mục tiêu dù chúng có cùng vận tốc tương đối và khoảng cách. Tuy nhiên để áp dụng phương pháp ước lượng góc thì yêu cầu cần tối thiểu hai phần tử anten thu để tạo ra chênh lệch pha giữa các tín hiệu phản xạ về radar. Từ đó, phục vụ cho quá trình xác định góc đến của mục tiêu.

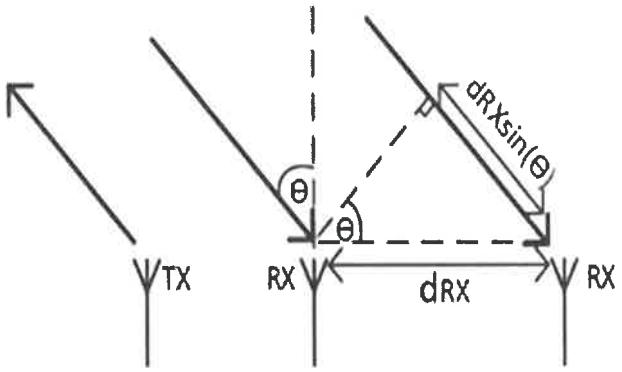
Để đáp ứng yêu cầu khắt khe về độ chính xác trong môi trường giao thông phức tạp, các hệ thống radar ô tô hiện đại không chỉ dừng lại ở cấu hình anten cơ bản mà phải áp dụng kiến trúc nhiều anten phát và nhiều anten thu.

Việc tích hợp nhiều phần tử phát ($M$) và phần tử thu ($N$) đóng vai trò quyết định dựa trên các kỹ thuật cốt lõi sau:

*Thứ nhất, tối ưu hóa độ phân giải góc thông qua cơ chế mảng anten ảo (Virtual Array Layout):* Độ phân giải góc của radar phụ thuộc tuyến tính vào chiều dài tổng thể của khẩu độ mảng anten. Thay vì tăng số lượng các phần tử anten vật lý giải pháp này gây tốn kém chi phí và không gian. Công nghệ radar MIMO cho phép tổng hợp một mảng anten ảo tương đương với $M \times N$ phần tử. Khẩu độ hình học được mở rộng này làm thu hẹp độ rộng búp sóng, giúp radar phân tách rõ ràng các mục tiêu nằm sát nhau về góc phương vị.

*Thứ hai, mở rộng không gian toán học để ước lượng góc hai chiều (2D Angular Estimation):* Nếu chỉ sử dụng một mảng anten tuyến tính một chiều (1D Array), radar chỉ có thể xác định được góc trong mặt phẳng nằm ngang (góc phương vị ). Để phục vụ cho các tính năng tự hành nâng cao, hệ thống cần nhận diện thêm chiều không gian thẳng đứng (góc ngẩng) nhằm phân biệt vật thể trên mặt đường với cầu vượt hay biển báo. Điều này bắt buộc phải cấu hình ma trận anten thu-phát dạng hai chiều (2D Array Grid) với số lượng phần tử lớn.

*Thứ ba, gia tăng số bậc tự do (Degrees of Freedom - DoF) cho hệ thống xử lý tín hiệu:* Việc sở hữu lượng lớn các kênh dữ liệu ảo ($M \times N$) cung cấp ma trận hiệp phương sai tín hiệu có kích thước lớn hơn cho các thuật toán ước lượng phổ góc (như 3D-FFT). Số bậc tự do lớn giúp hệ thống triệt tiêu hiệu quả nhiễu góc (Angular Ambiguity), nâng cao tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), từ đó tăng cường khả năng bám bắt diện tích phản xạ hiệu dụng (RCS) của các mục tiêu có biên dạng phức tạp trong môi trường có mật độ nhiễu nền (Clutter) cao."



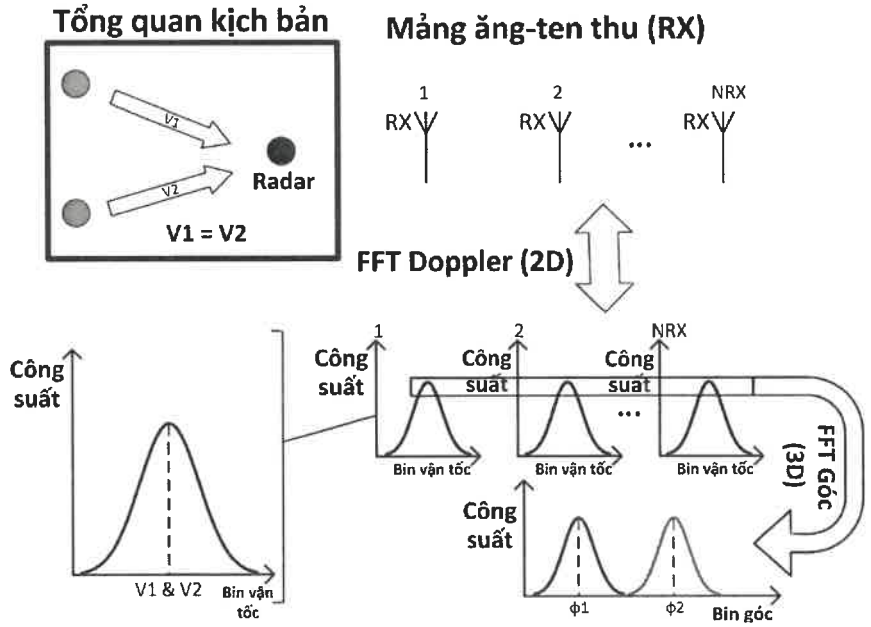

*Hình 2.7: Ước lượng AoA của một đối tượng.*

Trong Hình 2.7, $d_{RX}$ là khoảng cách giữa hai ăng-ten thu, còn $\theta$là góc đến của tín hiệu phản xạ. Từ hình vẽ có thể thấy, do tín hiệu phản xạ đến hai anten theo các thời điểm khác nhau nên quãng đường truyền đến ăng-ten thu thứ hai dài hơn một lượng $\Delta d_{RX}$, được xác định bởi $\Delta d_{RX} = d_{RX}\sin(\theta)$. Do đó, độ lệch pha giữa tín hiệu thu tại hai ăng-ten có thể được biểu diễn như sau:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta d_{RX}}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta d_{RX}\sin(\theta)}{\lambda} \tag{2.13}$$

$$\Rightarrow \theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\Phi}{2\pi d_{RX}}\right) \tag{2.14}$$

Để làm rõ hơn trường hợp có nhiều mục tiêu như đã trình bày ở đầu mục này, xét trường hợp hai hoặc nhiều mục tiêu nằm ở cùng khoảng cách và có cùng vận tốc tương đối so với radar. Trong trường hợp này, các mục tiêu sẽ xuất hiện tại cùng một Range Bin và cùng một Doppler Bin, do đó mỗi đỉnh của Doppler FFT sẽ chứa thông tin pha của tất cả các mục tiêu. Vì vậy, để phân biệt và xác định góc đến của từng mục tiêu, cần thực hiện Angle FFT trên dữ liệu thu được từ $N_{RX}$ăng-ten thu, như minh họa trong Hình 2.8.




*Hình 2.8: Quy trình ước lượng AoA của nhiều đối tượng. Trong kịch bản này, hai mục tiêu có cùng vận tốc tương đối.*

Từ Hình 2.8 và xét theo các kết quả từ (2.14), chúng ta có thể biểu diễn góc đến của từng đối tượng như sau:

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\Phi_1}{2\pi d_{RX}}\right) \,||\, \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\Phi_2}{2\pi d_{RX}}\right) \tag{2.15}$$

với giả định rằng hai vật thể đang tiến tới radar.

Tương tự như quá trình ước lượng khoảng cách và vận tốc, hai thông số quan trọng trong ước lượng góc là độ phân giải góc ($\theta_{res}$) và góc quan sát cực đại hay trường quan sát ký hiệu là $\theta_{max}$. Để xác định độ phân giải góc, xét hai mục tiêu có góc đến lần lượt là $\theta$ và $\theta + \Delta\theta$. Dựa trên điều kiện phân giải đã được áp dụng trong phần ước lượng

vận tốc, kết hợp với biểu thức (2.13), độ phân giải góc $\theta_{res}$ được xác định theo công thức:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d_{RX}}{\lambda}(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) > \frac{2\pi}{N_{RX}}$$

$$\Rightarrow \frac{2\pi d_{RX}}{\lambda}\cos(\theta)\,\Delta\theta > \frac{2\pi}{N_{RX}}$$

$$\Rightarrow \Delta\theta > \frac{\lambda}{N_{RX} d_{RX}\cos(\theta)}$$

$$=> \theta_{res} = \frac{\lambda}{N_{RX} d_{RX}\cos(\theta)} \quad (2.16)$$

Trong thiết kế radar FMCW tiêu chuẩn khoảng các giữa các anten bằng $\lambda/2$. Vì lý do này $\theta_{res}$ sẽ được biểu diễn lại như sau

$$\theta_{res} = \frac{2}{N_{RX}\cos(\theta)} \quad (2.17)$$

Mặt khác trường góc nhìn cũng có thể được ước lượng bằng cách sử dụng cùng tiêu chí như vận tốc tối đa. Do đó, θmax có thể được biểu diễn như sau:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d_{RX}\sin(\theta)}{\lambda} < \pi$$

$$\Rightarrow \theta < \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d_{RX}}\right)$$

$$\Rightarrow \theta_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d_{RX}}\right) \quad (2.18)$$

Trong thiết kế radar FMCW tiêu chuẩn, khoảng cách giữa các ăng-ten bằng λ/2, điều này dẫn đến một trường góc nhìn ±π/2 radian (phương vị).

### 2.2.4. Tổng hợp các thông số ước lượng và ý nghĩa các tham số

Để hệ tổng hợp lại các thông số ước lượng đã trình bày và giải thích ý nghĩa của từng tham số ảnh hưởng lên radar, bảng 2.1 và 2.2 sẽ tóm tắt các cơ sở lý thuyết liên quan từ các phần đã trình bày bên trên. Qua đó, cung cấp cái nhìn tổng quan và so sánh đặc tính của ba đại lượng ước lượng cơ bản: khoảng, vận tốc tương đối và góc đến.

*Bảng 2.1: Tóm tắt các thực tế ước lượng.*

| Đặc tính \ Tham số | Cự ly (Range) [m] | Vận tốc (Velocity) [m/s] | Góc định vị (Angle) [rad][1] |
|---|---|---|---|
| Định nghĩa | $\frac{(c \cdot IF_{tone})}{2S}$ | $\frac{(\lambda \cdot \Delta\Phi)}{4\pi \cdot Tc}$ | $\sin^{-1}\frac{(\lambda \cdot \Delta\Phi)}{(2\pi \cdot dRX)}$ |
| Độ phân giải | $\frac{c}{(2B)}$ | $\frac{\lambda}{(2Tf)}$ | $\frac{2}{(N_{RX} \cdot cos\theta)}$ |
| Giới hạn tối đa | $\frac{(Fs \cdot c)}{2S}$ | $\frac{\lambda}{(4Tc)}$ | $\pm\frac{\pi}{2}$ |

*Bảng 2.2: Ý nghĩa của các tham số.*

| Ký hiệu | Tên gọi tiếng Việt | Thuật ngữ tiếng Anh | Giải nghĩa chi tiết / Đơn vị đo |
|---|---|---|---|
| $c$ | Tốc độ ánh sáng | Speed of light | Hằng số vật lý biểu diễn tốc độ truyền sóng điện từ trong môi trường không khí. Giá trị xấp xỉ $3 \times 10^8$ m/s. |
| $B$ | Băng thông tín hiệu | Bandwidth | Độ rộng dải tần số mà hệ thống radar quét qua trong một xung Chirp. Đơn vị: Hertz (Hz). Băng thông càng lớn thì độ phân giải cự ly càng cao. |
| $S$ | Độ dốc tần số | Slope / Sweep rate | Tốc độ thay đổi (tăng hoặc giảm) của tần số theo thời gian trong một xung |

| Ký hiệu | Tên gọi tiếng Việt | Thuật ngữ tiếng Anh | Giải nghĩa chi tiết / Đơn vị đo |
|---|---|---|---|
| | | | quét Chirp. Bằng tỷ lệ B / $T_c$. Đơn vị: Hz/s. |
| $\lambda$ *(Lambda)* | Bước sóng | Wavelength | Quãng đường mà sóng truyền đi được trong một chu kỳ của tần số trung tâm radar. Đơn vị: mét (m). |
| $T_c$ | Thời gian quét Chirp | Chirp time | Khoảng thời gian cần thiết để radar phát hoàn chỉnh một xung Chirp (từ tần số thấp nhất đến cao nhất của băng thông). Đơn vị: giây (s). |
| $T_f$ | Thời gian khung dữ liệu | Frame time | Tổng thời gian để phát và thu một chuỗi các xung Chirp liên tiếp (một frame dữ liệu). Xác định độ phân giải vận tốc của hệ thống. Đơn vị: giây (s). |
| $\Delta\Phi$ *(Delta Phi)* | Độ lệch pha | Phase shift | Sự chênh lệch về góc pha của tín hiệu nhận được. Được dùng để tính vận tốc (độ lệch pha theo thời gian) hoặc tính góc đến (độ lệch pha không gian). Đơn vị: radian (rad). |
| $d_{RX}$ | Khoảng cách ăng-ten | Antenna spacing | Khoảng cách vật lý giữa tâm của hai phần tử ăng-ten thu (receiver) liền kề nhau. Thường được thiết kế bằng $\lambda/2$ |

| Ký hiệu | Tên gọi tiếng Việt | Thuật ngữ tiếng Anh | Giải nghĩa chi tiết / Đơn vị đo |
|---|---|---|---|
| | | | để tránh nhiễu lố (grating lobes). Đơn vị: mét (m). |
| $N_{RX}$ | Số lượng ăng-ten thu | Number of receivers | Tổng số lượng phần tử nhận tín hiệu trong mảng ăng-ten của radar. Giá trị này tỷ lệ thuận với độ phân giải góc. |
| $F_s$ | Tần số lấy mẫu | Sampling frequency | Tốc độ lấy mẫu tín hiệu tương tự thành tín hiệu số tại bộ ADC (Analog-to-Digital Converter). Giới hạn dải đo cự ly tối đa. Đơn vị: Hertz (Hz). |
| $IF_{tone}$ | Tần số trung tần | IF tone / Beat frequency | Tần số của tín hiệu kết quả sau bộ trộn giữa sóng phát và sóng dội về. Tần số này mang thông tin về cự ly của mục tiêu. Đơn vị: Hertz (Hz). |
| $\theta$ *(Theta)* | Góc đến / Góc định vị | Angle of Arrival (AoA) | Góc hợp bởi hướng phản xạ của mục tiêu so với trục hướng thẳng (boresight) của mảng ăng-ten. Đơn vị: radian (rad) hoặc độ (°). |

## 2.3. Đặc tính tín hiệu và diện tích phản xạ mục tiêu

Trong chương này, đề án đã đưa ra các phương pháp ước lượng các tham số khoảng cách, vận tốc tương đối, và góc đến của các mục tiêu khác nhau có thể được trích xuất từ phân tích phổ của tín hiệu phản xạ lại anten radar. Tuy nhiên, để có đánh giá về chất lượng của tín hiệu nhận được, tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu sẽ được giới thiệu trong phần này liên quan đến các thông số anten và khoảng cách mục tiêu. Tỷ lệ tín hiệu

trên nhiễu (SNR) là một đại lượng cơ bản được sử dụng để ước lượng diện tích phản xạ radar (Radar Cross Section – RCS) của mục tiêu.

### 2.3.1. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu

Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) là một thông số định lượng cơ bản phản ánh chất lượng của phép đo và khả năng phát hiện mục tiêu trong hệ thống. Về phương diện vật lý SNR được xác định bởi tỷ lệ giữa công suất tín hiệu phản xạ từ mục tiêu về radar so với công suất của nhiễu hiện diện trong hệ thống. Mối quan hệ được biểu diễn thông qua phương trình: $SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$. Trong đó, $P_{signal}$ công suất tín hiệu phản xạ từ mục tiêu về radar, $P_{noise}$ đại diện cho công suất các thành phần nhiễu. Trong môi trường triển khai thực tế nhiễu là sự chồng chập năng lượng từ nhiều nguồn nhiễu khác nhau. Đối với hệ thống radar tồn tại hai nguồn can nhiễu chủ đạo là nhiễu nhiệt và nhiễu dội địa hình.

Nhiễu nhiệt hay còn gọi là nhiễu Johnson-Nyquist được mô hình hóa như quá trình nhiễu trắng với mật độ phổ công suất phân bố đồng đều trên toàn dải tần số vận hành. Ngược lại với nhiễu dội địa hình được phân loại dựa trên đặc tuyến bức xạ của anten nó bao gồm nhiễu búp sóng chính và nhiễu búp sóng phụ. Nhiễu búp sóng chính phát sinh từ các tín hiệu tán xạ lọt vào hướng bức xạ trọng tâm, trong khi nhiễu búp sóng phụ thu nhận năng lượng phản xạ từ các hướng ngoài rìa.

Trong ứng dụng radar ô tô, hiện tượng tán xạ từ mặt đường đóng vai trò là nguồn can nhiễu búp sóng phụ nghiêm trọng nhất do diện tích phản xạ lớn và cự ly tiếp xúc cực ngắn. Hệ quả dẫn đến khi phân tích trên miền tín hiệu số thành phần nhiễu địa hình này thường tập trung năng lượng tại các bin cự ly ngắn trên phổ khoảng cách (1D-FFT) và khu trú tại các thành phần tần số Doppler bằng không trên phổ vận tốc (2D-FFT).

Sau khi giới thiệu khái quát về tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), đề án tiến hành thiết lập mối liên hệ giữa đại lượng này với quá trình phân tích tín hiệu trong hệ thống radar. Để làm rõ mối quan hệ đó, trước hết cần xây dựng phương trình phạm vi radar, mô tả sự phụ thuộc của công suất tín hiệu thu vào các tham số đặc trưng của hệ thống radar cũng như các đặc tính của mục tiêu.

Giả sử radar phát công suất $P_t$ về phía mục tiêu, công suất tín hiệu phản xạ thu được tại bộ thu $P_r$ được xác định như sau:

$$\frac{P_r}{P_t} = \sigma \cdot \frac{G^2}{4\pi}\left(\frac{\lambda}{4\pi d^2}\right)^2 = \frac{\sigma G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 d^4}$$

$$\Rightarrow P_r = \frac{\sigma P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 d^4} \quad (2.19)$$

Trong đó, $P_r$ là công suất tín hiệu thu được hay còn gọi công suất tín hiệu hữu ích $P_{\text{signal}}$, $\sigma$ là tiết diện phản xạ radar của mục tiêu, $G$ là độ lợi của ăng-ten, $\lambda$ là bước sóng của tín hiệu phát và $d$ là khoảng cách từ radar đến mục tiêu.

Mặt khác, công suất nhiễu tại đầu vào bộ thu được giả thiết chủ yếu là nhiễu nhiệt Nyquist, có giá trị:

$$P_{\text{noise}} = k_B T \Delta f \quad (2.20)$$

Trong đó, $k_B$ là hằng số Boltzmann, $T$ là nhiệt độ nhiễu tương đương của hệ thống thu và $\Delta f$ là băng thông của bộ thu. Kết hợp biểu thức công suất tín hiệu thu được với mô hình công suất nhiễu nêu trên, đồng thời sử dụng định nghĩa SNR trong (2.18), ta thu được biểu thức tỷ số tín hiệu trên nhiễu của hệ thống radar như sau:

$$SNR = \frac{P_r}{P_{noise}} = \frac{P_r}{k_B T \Delta f}$$

$$\Rightarrow SNR = \frac{\sigma P_t G^2 \lambda^2 T_{meas}}{(4\pi)^3 d^4 k_B T} \quad (2.21)$$

Trong đó, $T_{meas} = 1/\Delta f$ là chu kỳ đo của hệ thống. Biểu thức SNR trong (2.21) trong trường hợp lý tưởng toàn bộ hệ thống thu bao gồm mảng ăng-ten, đường truyền, bộ suy hao, bộ lọc và các khối xử lý khác, được giả thiết không gây thêm nhiễu ngoài nhiễu nhiệt.

Tuy nhiên, trong thực tế các phần tử của hệ thống thu đều làm suy giảm chất lượng tín hiệu và làm tăng mức nhiễu. Do đó, để mô tả chính xác hơn hiệu năng của hệ thống radar, cần xét đến hệ số nhiễu ký hiệu là $F$. Đại lượng này được định nghĩa là tỷ số giữa SNR tại đầu vào và SNR tại đầu ra .Với SNR ở đầu vào được xác định theo biểu thức (2.21), ta có thể suy ra biểu thức cuối cùng của tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại đầu ra của bộ thu radar như sau:

$$SNR_{out} = \frac{SNR_{in}}{F}$$

$$\Rightarrow SNR_{out} = \frac{\sigma P_t G^2 \lambda^2 T_{meas}}{(4\pi)^3 d^4 k_B T F} \quad (2.22)$$

trong đó F đại diện cho hệ số nhiễu của anten.

### 2.3.2. Tiết diện phản xạ radar

Tiết diện phản xạ radar kí hiệu RCS (Radar Cross Section) là đại lượng đặc trưng cho mức độ phản xạ năng lượng điện từ của mục tiêu khi bị sóng radar chiếu tới. Nói cách khác, RCS biểu thị sự phân bố không gian của năng lượng tán xạ theo các hướng khác nhau sau khi sóng radar tương tác với mục tiêu. Giá trị RCS phụ thuộc vào nhiều đặc tính vật lý của mục tiêu như hình dạng, kích thước, vật liệu chế tạo, đồng thời cũng chịu ảnh hưởng bởi các tham số của hệ thống radar như tần số hoạt động và trạng thái phân cực của sóng tới. Thông thường, RCS được biểu diễn theo đơn vị dBsm.

Việc nghiên cứu và tính toán RCS có ý nghĩa quan trọng vì tham số này phản ánh trực tiếp đặc tính tương tác giữa mục tiêu và sóng điện từ. Trong lĩnh vực radar ô tô, thông tin về RCS giúp nâng cao khả năng phát hiện, nhận dạng và phân loại các đối tượng dựa trên đặc tính phản xạ của chúng. Do đó, việc xây dựng phương pháp xác định RCS cho từng mục tiêu không chỉ phục vụ đánh giá hiệu năng của hệ thống radar mà còn cung cấp các thông tin hữu ích về bản chất của mục tiêu quan sát.

Từ biểu thức SNR đầu ra trong (2.22), có thể suy ra công thức xác định tiết diện phản xạ radar (RCS) của mục tiêu như sau:

$$\sigma = \frac{SNR_{\text{out}}(4\pi)^3 d^4 k_B T F}{P_t G^2 \lambda^2 T_{\text{meas}}} \quad (2.23)$$

Phương trình này cho thấy giá trị RCS phụ thuộc chủ yếu vào các tham số của hệ thống anten cũng như khoảng cách từ radar đến mục tiêu. Để đơn giản hóa việc tính toán các tham số đặc trưng của hệ thống radar không phụ thuộc vào băng thông đo bước sóng và khoảng cách tới mục tiêu được gộp lại thành một hằng số, ký hiệu là AP), được xác định như sau:

$$AP = \frac{P_t G^2}{k_B T F} \quad (2.24)$$

Khi đó phương trình xác định RCS trong (2.23) có thể được viết lại dưới dạng gọn hơn như sau:

$$\sigma = \frac{SNR_{\text{out}}(4\pi)^3 d^4}{\lambda^2 T_{\text{meas}} AP} \quad (2.25)$$

## 2.4. Phương pháp phát hiện

Sau khi tín hiệu phản xạ từ mục tiêu được xử lý qua các bước Range FFT, Doppler FFT và Angle Estimation, kết quả thu được là bản đồ công suất phản xạ (Range-Doppler Map hoặc Range-Angle Map). Tuy nhiên, bản đồ này không chỉ chứa tín hiệu phản xạ từ các mục tiêu mà còn bao gồm nhiễu nhiệt, nhiễu môi trường (clutter) và các tín hiệu phản xạ không mong muốn. Do đó, cần có một phương pháp để phân biệt giữa tín hiệu mục tiêu và nhiễu nhằm đảm bảo độ tin cậy của quá trình phát hiện.

Một phương pháp được sử dụng phổ biến trong các hệ thống radar hiện đại là CFAR (Constant False Alarm Rate). Khác với phương pháp sử dụng ngưỡng cố định, CFAR thiết lập ngưỡng phát hiện thích nghi dựa trên mức nhiễu cục bộ xung quanh ô đang xét (Cell Under Test - CUT), giúp duy trì xác suất báo động giả gần như không đổi ngay cả khi môi trường quan sát thay đổi.

Tùy theo cách ước lượng công suất nhiễu từ các ô tham chiếu (Reference Cells), CFAR được chia thành nhiều biến thể khác nhau. Mỗi thuật toán có những ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với các điều kiện môi trường khác nhau như nhiễu đồng nhất, vùng biên nhiễu hoặc nhiều mục tiêu nằm gần nhau. Trong phạm vi luận văn này, bốn thuật toán CFAR được giới thiệu gồm:

- CA-CFAR (Cell Averaging CFAR): sử dụng giá trị trung bình của các ô tham chiếu để ước lượng mức nhiễu.
- GO-CFAR (Greatest Of CFAR): sử dụng giá trị lớn hơn giữa hai nhóm ô tham chiếu nhằm nâng cao khả năng làm việc tại vùng biên nhiễu.
- SO (CO)-CFAR (Smallest Of CFAR): sử dụng giá trị nhỏ hơn giữa hai nhóm ô tham chiếu để tăng khả năng phát hiện các mục tiêu yếu hoặc nhiều mục tiêu gần nhau.
- OS-CFAR (Ordered Statistics CFAR): sử dụng thống kê theo thứ tự của các ô tham chiếu nhằm tăng khả năng chống ảnh hưởng của các giá trị ngoại lai và môi trường có nhiều mục tiêu.

Nguyên lý chung của các thuật toán CFAR là ước lượng mức nhiễu nền từ các ô tham chiếu, sau đó nhân với một hệ số tỷ lệ để tạo thành ngưỡng phát hiện. Nếu công suất của ô cần kiểm tra vượt quá ngưỡng này thì ô đó được xác định là mục tiêu. Vì thuật toán CA-CFAR và GO-CFAR là hai phương pháp được áp dụng phổ biến trong

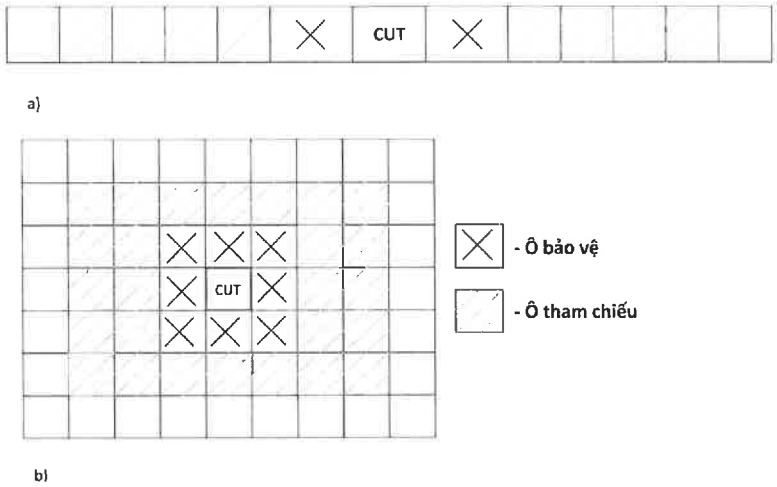
radar FMCW trên xe ô tô. Vì vậy, đề án sẽ tập trung trình bày hai phương pháp này và đưa ra lựa chọn phương pháp phù hợp.

### 2.4.1. CA-CFAR

Việc trích xuất thông tin mục tiêu từ tín hiệu radar là một nhiệm vụ phức tạp do đặc tính không được kiểm soát và biến đổi liên tục của môi trường nhiễu. Trong thực tế, công suất nhiễu liên quan đến các tín hiệu phản xạ không mong muốn thường không xác định và biến thiên theo thời gian. Để tối ưu hóa khả năng phát hiện mục tiêu trong các điều kiện này các kỹ thuật xử lý tín hiệu số thích ứng đóng vai trò then chốt trong việc duy trì tỷ lệ cảnh báo sai không đổi $P_{fa}$.

Đề án sử dụng thuật toán CA-CFAR cải thiện cho việc phát hiện mục tiêu radar. hay còn gọi là phương pháp phát hiện ngưỡng thích ứng đã được phát triển nhằm cung cấp cơ chế dự báo cảnh báo giả đáng tin cậy trong các kịch bản nhiễu biến đổi. CA-CFAR vận hành dựa trên nguyên lý trung bình hóa năng lượng nhiễu nền để hiệu chỉnh ngưỡng phát hiện về mức thiết kế mong muốn.

Trong môi trường hoạt động thời gian thực, bộ phát hiện CA-CFAR duy trì $P_{fa}$ ở mức hằng số bằng cách điều chỉnh ngưỡng phát hiện một cách linh hoạt. Giá trị $P_{fa}$ được thiết kế thường ở mức $10^{-3}$ hoặc nghiêm ngặt hơn là trong khoảng từ $10^{-6}$ đến $10^{-8}$. Quy trình này dựa trên giả định thống kê nhiễu đồng nhất trong khu vực cục bộ; theo đó, công suất nhiễu tại ô đang kiểm tra (CUT) được ước tính bằng cách lấy trung bình các giá trị mẫu từ các ô lân cận. Về mặt cấu trúc, thuật toán CA-CFAR sử dụng một cửa sổ CFAR bao gồm ba thành phần chính: ô đang kiểm tra (CUT), ô chứa tín hiệu nghi vấn cần xác định có mục tiêu hay không. Các ô tham chiếu tập hợp $N$ ô xung quanh CUT, đóng vai trò trích xuất dữ liệu để ước tính công suất nhiễu. Các ô bảo vệ tập hợp các ô nằm ngay sát CUT, có nhiệm vụ loại trừ các thành phần năng lượng mục tiêu bị rò rỉ do độ phân giải của hệ thống. Việc loại trừ này là cần thiết để tránh tình trạng năng lượng mục tiêu làm tăng ngưỡng phát hiện một cách nhân tạo, từ đó gây suy giảm xác suất phát hiện. Hình 2.9 mô tả cấu trúc kiến trúc của thuật toán CA-CFAR áp dụng cho dữ liệu radar một chiều và hai chiều với vị trí trung tâm là CUT.




*Hình 2.9: Kiến trúc của thuật toán CA-CFAR. Hình a) Cửa sổ CA-CFAR cho dữ liệu một chiều. Hình b) Cửa sổ CA-CFAR cho dữ liệu hai chiều.*

Công suất nhiễu tại cửa sổ CFAR bao gồm $N$ ô được ước lượng thông qua giá trị trung bình mẫu các ô tham chiếu, được biểu diễn bởi biểu thức sau:

$$\hat{P}n = \frac{1}{N}\sum i = 1^{N} x_i \tag{2.26}$$

Dựa trên công suất nhiễu ước tính ($\hat{P}_n$) và xác suất cảnh báo sai ($P_{fa}$) thiết kế, ngưỡng phát hiện tối ưu ($T$) được xác lập theo công thức:

$$T = \alpha \cdot \hat{P}_n \tag{2.27}$$

Trong đó, hệ số ngưỡng $\alpha$ được xác định dựa trên yêu cầu về $P_{fa}$ theo phương trình:

$$\alpha = N\left(P_{fa}^{-1/N} - 1\right) \tag{2.28}$$

Sau cùng, giá trị tại ô đang kiểm tra (CUT) được so sánh với ngưỡng phát hiện $T$. Nếu năng lượng của CUT vượt quá ngưỡng này ($CUT > T$), hệ thống sẽ đưa ra quyết định xác nhận sự tồn tại của mục tiêu.

### 2.4.2. GO-CFAR

Việc trích xuất thông tin mục tiêu từ tín hiệu radar là một nhiệm vụ phức tạp do đặc tính không được kiểm soát và biến đổi liên tục của môi trường nhiễu. Trong thực tế, công suất nhiễu liên quan đến các tín hiệu phản xạ không mong muốn thường không xác định và biến thiên theo thời gian. Tại các vùng ranh giới nhiễu địa vật, môi trường nhiễu không đồng nhất đòi hỏi một cơ chế thiết lập ngưỡng động có khả năng thích ứng cao. Để tối ưu hóa khả năng phát hiện mục tiêu và duy trì tính ổn định của hệ thống trong

các điều kiện này, kỹ thuật xử lý tín hiệu số thích ứng đóng vai trò then chốt trong việc duy trì tỷ lệ cảnh báo sai không đổi.

Thuật toán GO-CFAR (Greatest-Of Constant False Alarm Rate), hay còn gọi là phương pháp phát hiện ngưỡng thích ứng dựa trên giá trị cực đại, được phát triển nhằm cung cấp cơ chế dự báo cảnh báo giả đáng tin cậy trong các kịch bản nhiễu biến đổi đột ngột. GO-CFAR vận hành dựa trên nguyên lý lựa chọn giá trị năng lượng nhiễu lớn nhất giữa cửa sổ phía trước và cửa sổ phía sau nhằm hiệu chỉnh ngưỡng phát hiện về mức thiết kế mong muốn, giúp hệ thống không bị đánh lừa bởi sự tăng đột biến của nhiễu nền địa vật.

Trong môi trường hoạt động thời gian thực, bộ phát hiện GO-CFAR duy trì xác suất cảnh báo sai ($P_{fa}$) ở mức hằng số bằng cách điều chỉnh ngưỡng phát hiện một cách linh hoạt. Giá trị $P_{fa}$ được thiết kế thường ở mức $10^{-4}$ hoặc trong khoảng nghiêm ngặt từ $10^{-5}$ đến $10^{-6}$. Quy trình này dựa trên việc phân chia vùng tham chiếu thành hai cấu trúc độc lập: cửa sổ phía trước (Leading Window) và cửa sổ phía sau (Lagging Window). Theo đó, công suất nhiễu tại ô đang kiểm tra (CUT) được quyết định bởi giá trị lớn nhất trong hai vùng ước lượng cục bộ này.

Về mặt cấu trúc, thuật toán GO-CFAR sử dụng một cửa sổ CFAR bao gồm ba thành phần chính: ô đang kiểm tra (CUT), ô chứa tín hiệu nghi vấn cần xác định có mục tiêu hay không; các ô tham chiếu tập hợp $2 \cdot N_{ref}$ ô bao quanh CUT (chia đều thành $N_{ref}$ ô cho mỗi bên Leading và Lagging), đóng vai trò trích xuất dữ liệu để ước tính công suất nhiễu; các ô bảo vệ tập hợp $N_{guard}$ các ô nằm ngay sát hai bên CUT, có nhiệm vụ loại trừ các thành phần năng lượng mục tiêu bị rò rỉ do độ phân giải của hệ thống. Việc loại trừ này là cần thiết để tránh tình trạng năng lượng mục tiêu làm tăng ngưỡng phát hiện một cách nhân tạo, từ đó gây suy giảm xác suất phát hiện. Hình 2.10 mô tả cấu trúc kiến trúc của thuật toán GO-CFAR với vị trí trung tâm là CUT.

a)

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T | T | T | B | CUT | B | T | T | T |

b)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T | T | T | T | T | T | T |
| T | T | T | T | T | T | T |
| T | T | B | B | B | T | T |
| T | T | B | CUT | B | T | T |
| T | T | B | B | B | T | T |
| T | T | T | T | T | T | T |
| T | T | T | T | T | T | T |

*Hình 2.10: Kiến trúc của thuật toán GO-CFAR. Hình a) Cửa sổ GO-CFAR cho dữ liệu một chiều. Hình b) Cửa sổ GO-CFAR cho dữ liệu hai chiều.*

Công suất nhiễu trung bình tại cửa sổ dẫn đầu ($P_{lead}$) và cửa sổ trễ ($P_{lag}$) gồm $N_{ref}$ ô được tính toán độc lập theo hệ thức:

$$P_{lead} = \left(\frac{1}{N_{ref}}\right) \times \sum_{j=1}^{N_{ref}} X_{lead}(j) \text{ và } P_{lag} = \frac{1}{N_{ref}} \times \sum_{k=1}^{N_{ref}} X_{lag}(k) \quad (2.29)$$

Trong đó:

- $P_{lead}$ và $P_{lag}$: Công suất nhiễu trung bình được ước lượng tại nhóm cửa sổ tham chiếu phía trước và phía sau.
- $N_{ref}$: Số lượng ô tham chiếu (Reference cells) được thiết lập ở mỗi một bên của ô đang kiểm tra.
- $X_{lead}(j)$: Giá trị công suất tín hiệu radar tại ô tham chiếu thứ j nằm trong cửa sổ phía trước.
- $X_{lag}(k)$: Giá trị công suất tín hiệu radar tại ô tham chiếu thứ k nằm trong cửa sổ phía sau.

Từ hai giá trị công suất thành phần, đại lượng ước lượng nhiễu tổng thể ($V_{go}$) được quyết định thông qua toán tử lựa chọn cực đại:

$$Vgo = max(Plead, Plag) \quad (2.30)$$

Dựa trên công suất nhiễu ước tính lựa chọn ($V_{go}$) và xác suất cảnh báo sai ($P_{fa}$) thiết kế, ngưỡng phát hiện tối ưu ($T_{go}$) được xác lập theo công thức:

$$Tgo = \alpha \times Vgo \quad (2.31)$$

Trong đó, hệ số ngưỡng α của bộ phát hiện GO-CFAR được xác định dựa trên yêu cầu hàm phi tuyến đối với $P_{fa}$ và số lượng ô tham chiếu $N_{ref}$ theo phương trình:

$$P_{fa} = 2(1 + \alpha) - N_{ref} - (1 + 2\alpha) - N_{ref} \quad (2.32)$$

Sau cùng, giá trị tại ô đang kiểm tra (CUT) được so sánh với ngưỡng phát hiện $T_{go}$. Nếu năng lượng của CUT vượt quá ngưỡng này (CUT > $T_{go}$), hệ thống sẽ đưa ra quyết định xác nhận sự tồn tại của mục tiêu tại vị trí kiểm tra hình học tương ứng.

### 2.4.3. So sánh và lựa chọn phương pháp phát hiện

Để tối ưu hóa khả năng phát hiện mục tiêu của hệ thống radar, việc lựa chọn phương pháp phát hiện mục tiêu phù hợp đóng vai trò quyết định. Có hai phương pháp phổ biến nhất là CA-CFAR (Cell Averaging CFAR) và GO-CFAR (Greatest-Of CFAR). Mỗi phương pháp đều có những đặc tính toán học và hiệu năng xử lý riêng biệt khi đối mặt với các điều kiện nhiễu nền khác nhau. Bảng 3.2 dưới đây trình bày các tiêu chí đối chiếu kỹ thuật giữa hai phương này.

*Bảng 2.3: Bảng so sánh đặc tính kỹ thuật giữa CA-CFAR và GO-CFAR.*

| Tiêu chí đánh giá | Thuật toán CA-CFAR | Thuật toán GO-CFAR |
|---|---|---|
| Nguyên lý ước lượng nhiễu | Lấy trung bình cộng công suất của toàn bộ các ô trong cả hai cửa sổ tham chiếu (Leading và Lagging). | Lấy trung bình độc lập từng cửa sổ, sau đó chọn giá trị lớn nhất (MAX) làm nền nhiễu. |
| Hiệu năng trong môi trường nhiễu đồng nhất | Tối ưu nhất. Đạt xác suất phát hiện (Probability of Detection - $P_d$) cao nhất so với mọi biến thể CFAR. | Suy giảm nhẹ. Ngưỡng phát hiện bị đẩy lên cao hơn mức cần thiết do toán tử MAX, làm giảm $P_d$. |

| Tiêu chí đánh giá | Thuật toán CA-CFAR | Thuật toán GO-CFAR |
|---|---|---|
| Khả năng xử lý tại biên nhiễu (Clutter Edges) | Hạn chế. Dễ xảy ra hiện tượng báo động giả (False Alarms) khi cửa sổ trượt đi vào vùng ranh giới có nhiễu cao đột ngột. | Rất tốt. Kiểm soát chặt chẽ xác suất báo động giả tại các vùng chuyển giao địa vật phức tạp. |
| Hiệu ứng che khuất đa mục tiêu (Target Masking) | Bị ảnh hưởng, nhưng mức độ suy giảm xác suất phát hiện ở mức vừa phải khi có mục tiêu lân cận. | Bị ảnh hưởng rất nặng. Chỉ cần một mục tiêu phụ lọt vào một trong hai cửa sổ, ngưỡng sẽ tăng vọt, che khuất hoàn toàn mục tiêu chính. |
| Độ phức tạp tính toán | Rất thấp. Thuận lợi cho việc triển khai trên các hệ thống yêu cầu xử lý thời gian thực (Real-time). | Cao hơn do phải thực hiện thêm các phép toán so sánh logic cực đại giữa các mảng dữ liệu. |

Dựa trên các phân tích đối chiếu tại Bảng 3.2, đề án quyết định lựa chọn thuật toán CA-CFAR làm phương pháp xử lý cốt lõi cho khối phát hiện mục tiêu của hệ thống. Vì những ưu điểm mà CA-CFAR mang lại như sau:

- *Ưu tiên xác suất phát hiện cao trong môi trường giao thông chuẩn:* Mục tiêu của hệ thống cảnh báo an toàn trên ô tô là phát hiện bám bắt các phương tiện đang di chuyển phía trước. Trong phần lớn các tình huống vận hành trên đường cao tốc hoặc đường đô thị, nhiễu nền (từ mặt đường, không gian trống) thường có tính chất phân bố đồng nhất (Homogeneous Clutter). Trong điều kiện này, lý thuyết phát hiện tín hiệu đã chứng minh CA-CFAR là bộ phát hiện tối ưu nhất, mang lại xác suất phát hiện ($P_d$) cao nhất cho một mức xác suất báo động giả ($P_{fa}$) cho trước. Trong khi đó, GO-CFAR có xu hướng nâng ngưỡng quá cao, dễ dẫn đến việc bỏ sót các mục tiêu có diện tích phản xạ (RCS) nhỏ như xe máy hoặc người đi bộ.
- *Khắc phục hiệu ứng che khuất (Target Masking):* Môi trường giao thông thực tế là môi trường đa mục tiêu dày đặc (nhiều xe chạy nối đuôi hoặc chạy song song).

Nếu sử dụng GO-CFAR, khi một phương tiện lân cận lọt vào cửa sổ tham chiếu, toán tử cực đại sẽ lập tức đẩy ngưỡng phát hiện của ô đang xét lên mức cực đoan, dẫn đến việc hệ thống không phát hiện tạm thời và bỏ sót các phương tiện phía. CA-CFAR sử dụng phương pháp trung bình hóa toàn cục, do đó chia sẻ và làm suy giảm năng lượng nhiễu của mục tiêu phụ, giúp duy trì khả năng phân giải đa mục tiêu tốt hơn đáng kể so với GO-CFAR.

- *Tối ưu hóa độ phức tạp thuật toán và thời gian thực thi:* CA-CFAR có kiến trúc tính toán đơn giản, tuyến tính, không yêu cầu các bộ so sánh phân nhánh phức tạp. Điều này cho phép dễ dàng được tối ưu hóa trên các nền tảng vi điều khiển nhúng của ô tô, đảm bảo độ trễ của toàn bộ chu trình xử lý (từ khi thu thập ADC đến khi ra quyết định cảnh báo) đáp ứng được tiêu chuẩn thời gian thực khắt khe của hệ thống ADAS.

## 2.5. Kết luận chương

Chương II đã xây dựng thành công nền tảng lý thuyết và cơ sở toán học vững chắc về hệ thống radar FMCW ứng dụng trên ô tô. Nghiên cứu đã làm sáng tỏ toàn diện cơ chế vận hành của cảm biến, từ quá trình điều chế tín hiệu Chirp ở cấp độ phần cứng cho đến các chu trình xử lý tín hiệu số (DSP) phức tạp. Thông qua việc ứng dụng chuỗi phép biến đổi Fourier đa chiều (1D, 2D và 3D-FFT), hệ thống đã chứng minh được năng lực vượt trội trong việc bóc tách và định vị đồng thời ba tham số động học cốt lõi: khoảng cách, vận tốc tương đối và góc phương vị của đa mục tiêu trong môi trường giao thông hỗn hợp.

Bên cạnh đó, việc phân tích chuyên sâu các đại lượng vật lý như tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu SNR và tiết diện phản xạ radar RCS đã cung cấp thông tin quan trọng, giúp hệ thống không chỉ dừng lại ở việc phát hiện mục tiêu mà còn tiến tới phân loại đặc tính vật lý của các mục tiêu. Hơn nữa, việc khảo sát và áp dụng thuật toán xử lý tín hiệu thích ứng CA-CFAR đã giải quyết triệt để bài toán can nhiễu dội địa hình đảm bảo độ tin cậy cho luồng dữ liệu và duy trì tỷ lệ cảnh báo giả luôn ở mức kiểm soát nghiêm ngặt.

Toàn bộ hệ thống cơ sở lý luận, mô hình toán học và các giải pháp lọc nhiễu được đúc kết trong chương này đóng vai trò là tiền đề khoa học mang tính quyết định. Đây chính hướng quan trọng để đề án tiếp tục triển khai thiết kế kiến trúc phần mềm, xây dựng thuật toán và đánh giá thực nghiệm mô hình cảnh báo an toàn chủ động sử dụng module radar ARS408 sẽ được trình bày chi tiết tại Chương III.

# CHƯƠNG III: XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH CẢNH BÁO AN TOÀN TRÊN XE Ô TÔ SỬ DỤNG CẢM BIẾN RADAR ARS408

## 3.1. Giới thiệu chương

Chương I, chương II đã trình bày cơ sở lý thuyết về công nghệ radar ô tô, nguyên lý hoạt động của radar FMCW chương này tập trung vào việc xây dựng chương trình cảnh báo an toàn trên xe ô tô sử dụng cảm biến radar ARS408. Mục tiêu của chương là hiện thực hóa các thuật toán xử lý dữ liệu radar, phân tích thông tin mục tiêu và xây dựng hệ thống cảnh báo nhằm hỗ trợ người lái phát hiện sớm các nguy cơ va chạm trong quá trình tham gia giao thông.

Nội dung chương trình được xây dựng dựa trên dữ liệu thời gian thực do cảm biến radar ARS408 cung cấp thông qua giao thức truyền thông CAN. Các thông tin về khoảng cách, vận tốc tương đối, góc phương vị và trạng thái của các đối tượng được thu thập, giải mã và xử lý để xác định vị trí cũng như mức độ nguy hiểm của từng mục tiêu trong vùng quan sát. Trên cơ sở đó, hệ thống thực hiện đánh giá nguy cơ va chạm theo các tiêu chí đã thiết kế và đưa ra các cảnh báo phù hợp nhằm nâng cao khả năng hỗ trợ người lái.

Bên cạnh việc trình bày kiến trúc tổng thể của phần mềm, chương này còn mô tả quy trình xây dựng chương trình, từ khâu tiếp nhận dữ liệu radar, xử lý và quản lý đối tượng, đến việc thiết kế giao diện hiển thị và chức năng cảnh báo. Ngoài ra, chương cũng trình bày kết quả thực nghiệm của hệ thống trong các tình huống giao thông điển hình nhằm đánh giá khả năng hoạt động của chương trình, từ đó làm cơ sở phân tích hiệu quả và tính ứng dụng của giải pháp cảnh báo an toàn sử dụng cảm biến radar ARS408 trong thực tế.

## 3.2. Lựa chọn phần cứng

Trong các nghiên cứu về hệ thống radar FMCW ứng dụng trên ô tô hiện nay, việc lựa chọn phần cứng thường được phân chia thành hai hướng tiếp cận chính:

- Hướng tiếp cận vi mạch tích hợp (SoC - System on Chip): Sử dụng các chip radar nguyên bản hoặc mạch phát triển chuyên dụng như dòng mmWave của Texas Instruments (AWR1843, IWR6843).
- Hướng tiếp cận mô-đun hóa thương mại (Commercial Off-The-Shelf - COTS): Sử dụng các cảm biến radar đã được đóng gói và tích hợp sẵn bộ vi xử lý chuyên dụng từ các nhà sản xuất công nghiệp ô tô, điển hình là dòng Continental ARS408.

Do mục tiêu nghiên cứu của đề án tập trung vào tầng ứng dụn gbao gồm việc tối ưu hóa thuật toán nhận diện nguy cơ va chạm, xử lý luồng dữ liệu CAN và phát triển giao diện hiển thị thời gian thực việc đảm bảo một nguồn dữ liệu đầu vào ổn định và có độ tin cậy cao là điều kiện quan trọng.

Cảm biến Continental ARS408 là một giải pháp đã được chuẩn hóa cho công nghiệp ô tô. Thiết bị tích hợp sẵn bộ xử lý tín hiệu hiệu năng cao, cho phép tự động thực hiện toàn bộ quá trình DSP từ thu thập tín hiệu thô đến xuất dữ liệu ở mức đối tượng. Sự khác biệt hai giải pháp phần cứng này được tổng hợp chi tiết tại bảng 3.1.

*Bảng 3.1: So sánh đặc tính kỹ thuật giữa cảm biến Continental ARS408 và nền tảng Texas Instruments mmWave SoC.*

| Tiêu chí so sánh | Cảm biến Continental ARS408 | Nền tảng TI AWR1843 / IWR6843 |
|---|---|---|
| Phân loại thiết bị | Cảm biến radar thương mại hoàn thiện (COTS), đạt tiêu chuẩn công nghiệp ô tô (Automotive Grade). | Vi mạch tích hợp xử lý tín hiệu radar (SoC) / Mạch thử nghiệm và phát triển (EVM). |
| Dạng dữ liệu đầu ra | Dữ liệu mức đối tượng (Object-level data): Cự ly, vận tốc, góc và ID của tối đa 250 mục tiêu đã qua bộ lọc tracking. | Dữ liệu thô từ ADC (Raw ADC data) hoặc Đám mây điểm (Point Cloud). Dữ liệu đối tượng phụ thuộc vào thuật toán người dùng tự viết. |
| Yêu cầu xử lý tín hiệu số (DSP) | Không yêu cầu. Thiết bị tự động thực hiện các thuật toán toán học lõi (FFT, CFAR, Kalman Filter). | Yêu cầu rất cao. Người lập trình phải tự cấu hình dạng sóng, xử lý nhiễu nền và bám sát đa mục tiêu. |
| Giao thức truyền thông | CAN Bus (chuẩn ISO 11898), tương thích trực tiếp với cấu trúc mạng nội bộ trên ô tô. | UART, SPI, CSI-2. Cần thiết kế thêm mạch giao tiếp hoặc cấu |

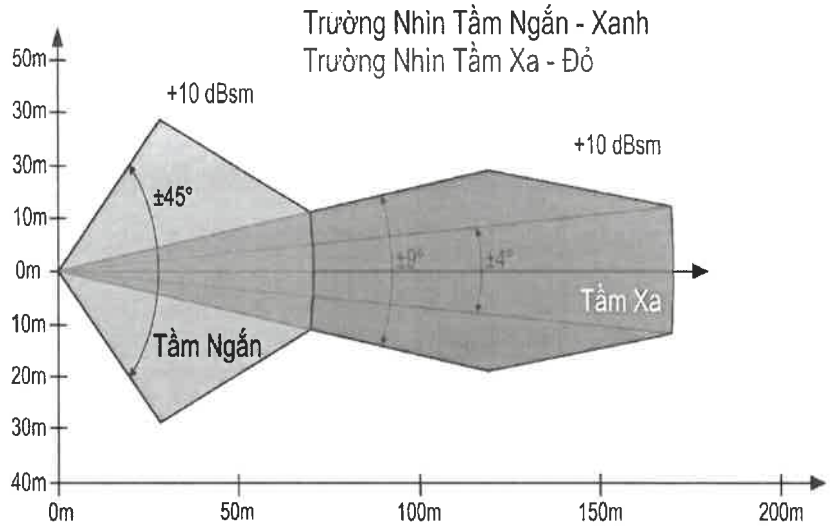
| Tiêu chí so sánh | Cảm biến Continental ARS408 | Nền tảng TI AWR1843 / IWR6843 |
|---|---|---|
| | | hình phần mềm phức tạp để chuyển đổi sang CAN. |
| Độ ổn định hệ thống | Được hiệu chuẩn hệ thống (Calibration) từ nhà sản xuất; hoạt động ổn định dưới các tác động ngoại cảnh. | Phụ thuộc vào thiết kế mạch vật lý, cấu hình độ lợi anten và thuật toán xử lý phần mềm của người phát triển. |
| Mức độ phù hợp với đề tài | Tối ưu. Cho phép tập trung nghiên cứu thuật toán tiền va chạm (TTC) và tối ưu hóa thời gian thực cho giao diện HMI. | Hạn chế. Tiêu tốn phần lớn thời gian nghiên cứu vào tầng xử lý tín hiệu thô và cấu hình phần cứng mức thấp. |

Từ những phân tích trên, để lựa chọn cảm biến radar Continental ARS408 làm nền tảng phần cứng thu thập dữ liệu. Lựa chọn này vừa đảm bảo tính chính xác, thực tế của dữ liệu đầu vào cho hệ thống cảnh báo ADAS, vừa tối ưu hóa được thời gian nghiên cứu để tập trung giải quyết triệt để các bài toán ở tầng ứng dụng.

### 3.3. Tổng quan về cảm biến radar ARS408

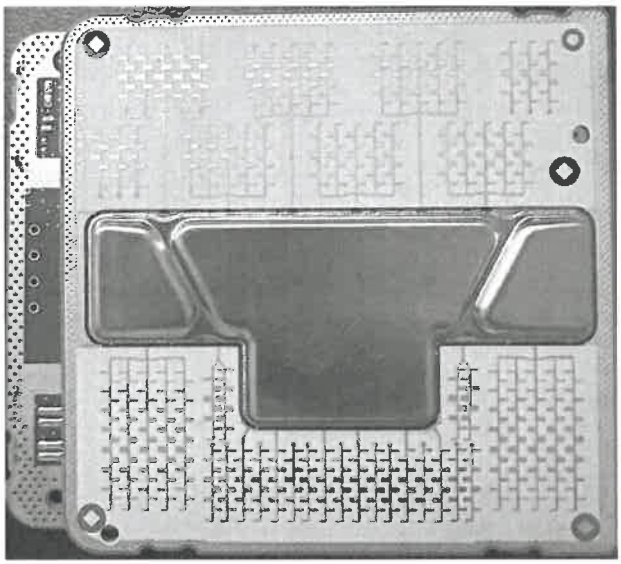
Trong hệ thống cảnh báo an toàn trên ô tô, cảm biến radar đóng vai trò là thiết bị thu thập thông tin về môi trường xung quanh xe. So với các loại cảm biến khác như camera hoặc lidar, radar có ưu điểm nổi bật là khả năng hoạt động ổn định trong nhiều điều kiện thời tiết bất lợi như mưa, sương mù, bụi hoặc môi trường thiếu ánh sáng. Nhờ đó radar được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống hỗ trợ lái xe tiên tiến và là một trong những cảm biến quan trọng trên các phương tiện hiện đại.

Trong đề án này, cảm biến được sử dụng là ARS408, thuộc dòng radar tầm xa hoạt động ở băng tần 76–77 GHz.

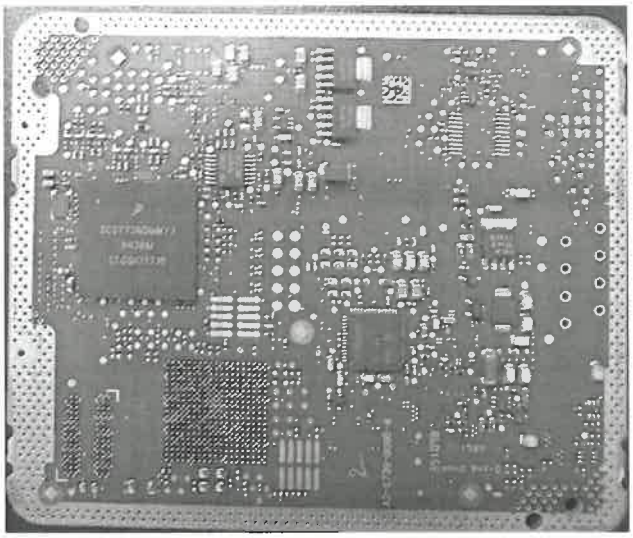



*Hình 3.1: Vùng phát hiện của radar ARS408.*

Cảm biến được thiết kế nhằm phát hiện và theo dõi các phương tiện, người đi bộ hoặc vật cản phía trước xe với độ chính xác cao. ARS408 sử dụng nguyên lý radar điều chế tần số sóng liên tục FMCW cho phép đồng thời xác định khoảng cách, vận tốc tương đối và góc phương vị của nhiều mục tiêu trong vùng quan sát. Hình 3.2 mặt trước cảm biến chứa mảng anten, Hình 3.2 mặt sau của cảm biến chứa vi điều khiển SC5772NQMMY3 của NXP chuyên xử lý dữ liệu cảm biến radar.



*Hình 3.2: Mặt trước cảm biến radar ARS408.*



*Hình 3.3: Mặt sau cảm biến radar ARS408.*

Một trong những ưu điểm nổi bật của ARS408 là khả năng phát hiện đồng thời nhiều mục tiêu với tốc độ cập nhật cao. Đối với mỗi đối tượng được phát hiện, cảm biến cung cấp các thông tin như mã định danh đối tượng khoảng cách theo phương dọc và phương ngang, vận tốc tương đối góc phương vị xác suất tồn tại của mục tiêu và các chỉ số phản ánh chất lượng đo. Những thông tin này là cơ sở để xây dựng các thuật toán theo dõi mục tiêu và cảnh báo va chạm trong các hệ thống hỗ trợ lái xe.

Cảm biến ARS408 hỗ trợ hai chế độ xuất dữ liệu chính là Cluster Mode và Object Mode. Trong chế độ Cluster Mode, radar xuất ra các điểm phản xạ thu được sau quá trình xử lý tín hiệu ban đầu, phù hợp cho các thuật toán theo dõi mục tiêu do người dùng tự phát triển. Trong khi đó, Object Mode cung cấp trực tiếp danh sách các đối tượng đã được radar phân tích và theo dõi, bao gồm đầy đủ các thông tin động học và trạng thái của từng mục tiêu. Trong phạm vi đề án này, hệ thống sử dụng Object Mode, giúp giảm khối lượng xử lý và thuận lợi cho việc xây dựng chương trình cảnh báo.

Việc trao đổi dữ liệu giữa cảm biến và bộ xử lý được thực hiện thông qua mạng truyền thông CAN với tốc độ truyền lên đến 500 kbps. Các thông tin về cấu hình cảm biến, trạng thái hoạt động và dữ liệu mục tiêu đều được đóng gói dưới dạng các bản tin CAN theo định dạng do nhà sản xuất quy định. Chương trình trên máy tính thực hiện việc tiếp nhận, giải mã các bản tin này để xây dựng danh sách đối tượng và phục vụ cho quá trình đánh giá nguy cơ va chạm.

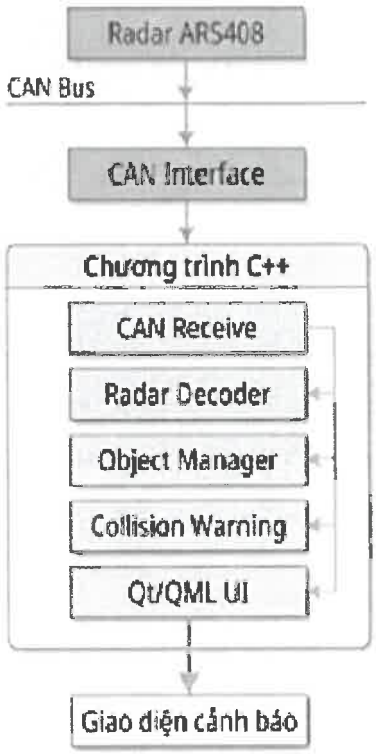
Nhờ khả năng phát hiện mục tiêu ở khoảng cách xa, độ chính xác cao và khả năng làm việc ổn định trong nhiều điều kiện môi trường, cảm biến radar ARS408 là lựa chọn phù hợp cho các nghiên cứu về hệ thống cảnh báo an toàn và hỗ trợ lái xe.

Trong đề án này, ARS408 đóng vai trò là nguồn cung cấp dữ liệu đầu vào cho toàn bộ chương trình cảnh báo được xây dựng và đánh giá.

## 3.4. Thiết kế chương trình xử lý dữ liệu cảm biến radar ARS408

Chương trình xử lý dữ liệu radar được xây dựng theo mô hình phân tầng nhằm tách biệt các chức năng chính của hệ thống, bao gồm thu thập dữ liệu, xử lý dữ liệu, đánh giá nguy cơ và hiển thị kết quả. Cách tổ chức này giúp giảm sự phụ thuộc giữa các thành phần, tạo thuận lợi cho việc kiểm thử, bảo trì và mở rộng chương trình trong quá trình phát triển.

Kiến trúc của chương trình gồm năm khối chức năng chính như hình 3.4: khối tiếp nhận dữ liệu CAN, khối giải mã bản tin radar, khối quản lý đối tượng, khối xử lý cảnh báo và khối giao diện người dùng. Dữ liệu được truyền tuần tự qua từng khối, trong đó đầu ra của khối trước là đầu vào của khối kế tiếp. Toàn bộ quá trình xử lý được thực hiện theo thời gian thực, đồng bộ với chu kỳ cập nhật dữ liệu của cảm biến ARS408.




*Hình 3.4: Sơ đồ khối kệ thống.*

Khối tiếp nhận dữ liệu chịu trách nhiệm giao tiếp với thiết bị CAN để nhận các bản tin từ cảm biến radar. Sau khi kiểm tra tính hợp lệ của dữ liệu, các bản tin được chuyển tới khối giải mã để chuyển đổi sang các thông số vật lý. Tiếp theo, các đối tượng được cập nhật vào bộ quản lý mục tiêu nơi lưu trữ và duy trì trạng thái của từng đối tượng trong vùng quan sát. Cuối cùng, dữ liệu được đưa tới khối đánh giá nguy cơ va chạm và giao diện hiển thị nhằm cung cấp thông tin trực quan cho người sử dụng.

Việc phân chia chương trình thành các module độc lập giúp hệ thống dễ dàng bổ sung các chức năng mới như theo dõi quỹ đạo mục tiêu, hợp nhất dữ liệu từ nhiều cảm biến hoặc tích hợp các thuật toán hỗ trợ lái xe nâng cao mà không ảnh hưởng đến các thành phần hiện có.

### 3.4.1. Nhận dữ liệu CAN từ radar

radar ARS408 truyền dữ liệu đến bộ xử lý thông qua mạng CAN với chu kỳ cập nhật liên tục. Mỗi bản tin CAN mang một mã định danh riêng để biểu thị loại dữ liệu được truyền, chẳng hạn như trạng thái radar, thông tin cấu hình hoặc dữ liệu của các đối tượng được phát hiện.

Trong chương trình, một luồng riêng được sử dụng để lắng nghe dữ liệu từ thiết bị CAN như Hình 3.5, đề án dùng module chuyển đổi CAN sang USB nhằm đảm bảo quá trình tiếp nhận không làm gián đoạn giao diện người dùng. Mỗi khi nhận được một khung CAN, chương trình tiến hành kiểm tra mã định danh và độ dài dữ liệu trước khi chuyển sang giai đoạn giải mã.



*Hình 3.5: Module chuyển đổi CAN sang USB.*

Việc tách riêng mô-đun tiếp nhận dữ liệu giúp chương trình có thể thay đổi thiết bị giao tiếp CAN hoặc tốc độ truyền mà không ảnh hưởng đến các thành phần xử lý phía

sau. Đồng thời, cơ chế xử lý theo sự kiện giúp giảm tải cho bộ xử lý và đảm bảo khả năng cập nhật dữ liệu theo thời gian thực.

### 3.4.2. Giải mã bản tin radar

Sau khi nhận được các bản tin CAN, chương trình tiến hành giải mã dữ liệu theo định dạng do nhà sản xuất quy định.

*Bảng 3.2: Nội dung các trường trong dữ liệu CAN của cảm biến.*

| Vào/Ra | ID | Tên Thông Điệp | Nội Dung (Content) |
|---|---|---|---|
| Vào | 0x200 | radarCfg | Cấu hình cảm biến radar |
| Ra | 0x201 | radarState | Trạng thái radar |
| Vào | 0x202 | FilterCfg | Cấu hình bộ lọc Cluster)và Object |
| Ra | 0x203 | FilterState_Header | Tiêu đề trạng thái bộ lọc |
| Ra | 0x204 | FilterState_Cfg | Trạng thái cấu hình bộ lọc |
| Vào | 0x400 | CollDetCfg | Cấu hình hệ thống phát hiện va chạm |
| Vào | 0x401 | CollDetRegionCfg | Cấu hình vùng phát hiện va chạm |
| Ra | 0x408 | CollDetState | Trạng thái phát hiện va chạm |
| Ra | 0x402 | CollDetRegionState | Trạng thái vùng phát hiện va chạm |
| Vào | 0x300 | SpeedInformation | Tốc độ xe |
| Vào | 0x301 | YawRateInformation | Tốc độ góc yaw của xe |
| Ra | 0x600 | Cluster_0_Status | Trạng thái cụm Object |
| Ra | 0x701 | Cluster_1_General | Thông tin chung của Cluster |
| Ra | 0x702 | Cluster_2_Quality | Thông tin chất lượng Cluster |
| Ra | 0x60A | Obj_0_Status | Trạng thái đối tượng |
| Ra | 0x60B | Obj_1_General | Thông tin chung của đối tượng |
| Ra | 0x60C | Obj_2_Quality | Thông tin chất lượng đối tượng |

| Vào/Ra | ID | Tên Thông Điệp | Nội Dung (Content) |
|---|---|---|---|
| Ra | 0x60D | Obj_3_Extended | Thông tin mở rộng của đối tượng |
| Ra | 0x60E | Obj_4_Warning | Cảnh báo phát hiện va chạm của đối tượng |
| Ra | 0x700 | VersionID | Nhận dạng phiên bản phần mềm |
| Ra | 0x8 | CollDetRelayCtrl | điều khiển rơ-le |

Mỗi trường dữ liệu trong bản tin được chuyển đổi từ giá trị nhị phân sang đại lượng vật lý thông qua hệ số tỉ lệ và giá trị bù tương ứng.

Đối với mỗi đối tượng, chương trình thu được các thông số quan trọng như khoảng cách theo phương dọc, khoảng cách theo phương ngang, vận tốc tương đối, gia tốc, góc phương vị, diện tích phản xạ radar (RCS) và xác suất tồn tại của mục tiêu. Các thông số này được lưu vào cấu trúc dữ liệu của từng đối tượng để phục vụ cho các thuật toán xử lý phía sau.

Việc giải mã chính xác các bản tin CAN là bước quan trọng quyết định độ tin cậy của toàn bộ hệ thống cảnh báo, bởi mọi thuật toán đánh giá nguy cơ đều dựa trên các thông số này.

### 3.4.3. Quản lý danh sách đối tượng

Sau khi dữ liệu được giải mã, chương trình tiến hành cập nhật danh sách các đối tượng đang tồn tại trong vùng quan sát của radar. Mỗi đối tượng được quản lý thông qua một mã định danh do cảm biến cung cấp, giúp theo dõi liên tục trạng thái của mục tiêu trong nhiều chu kỳ quét.

Khi radar phát hiện một mục tiêu mới, chương trình sẽ tạo một bản ghi mới trong danh sách đối tượng. Ngược lại, nếu đối tượng đã tồn tại, các thông số như vị trí, vận tốc và trạng thái sẽ được cập nhật theo dữ liệu mới nhất. Những mục tiêu không còn xuất hiện trong nhiều chu kỳ liên tiếp sẽ được loại bỏ khỏi danh sách nhằm đảm bảo dữ liệu luôn phản ánh đúng môi trường thực tế.

Việc quản lý đối tượng theo Object ID giúp hạn chế hiện tượng trùng lặp dữ liệu và tạo điều kiện thuận lợi cho các thuật toán đánh giá nguy cơ va chạm hoạt động ổn định.

### 3.4.4. Thiết kế giao diện

Giao diện người dùng được xây dựng bằng Qt/QML nhằm trực quan hóa dữ liệu radar theo thời gian thực. Các đối tượng được biểu diễn trên màn hình theo vị trí tương ứng trong hệ tọa độ của radar, đồng thời hiển thị các thông tin như khoảng cách, vận tốc tương đối và trạng thái cảnh báo.

Để đảm bảo khả năng cập nhật liên tục, dữ liệu từ các mô-đun xử lý được truyền tới giao diện thông qua cơ chế tín hiệu và khe của Qt. Khi danh sách đối tượng thay đổi, giao diện sẽ tự động cập nhật mà không cần làm mới toàn bộ màn hình, giúp giảm tải cho hệ thống và nâng cao trải nghiệm người sử dụng.

Ngoài việc hiển thị vị trí của các mục tiêu, giao diện còn thể hiện trạng thái hoạt động của radar, số lượng đối tượng được phát hiện và mức cảnh báo hiện tại. Thiết kế này giúp người sử dụng dễ dàng quan sát tình hình giao thông phía trước và nhanh chóng nhận biết các tình huống có nguy cơ va chạm.

## 3.5. Xây dựng thuật toán cảnh báo an toàn

Sau khi dữ liệu từ cảm biến radar ARS408 được tiếp nhận và xử lý, bước tiếp theo là đánh giá mức độ nguy hiểm của các đối tượng trong vùng quan sát để đưa ra cảnh báo phù hợp cho người lái. Thuật toán cảnh báo được xây dựng nhằm phát hiện sớm nguy cơ va chạm, từ đó hỗ trợ người điều khiển phương tiện có đủ thời gian thực hiện các thao tác như giảm tốc độ, chuyển làn hoặc phanh khẩn cấp.

Trong phạm vi đề án, việc đánh giá nguy cơ va chạm được thực hiện dựa trên các thông số do radar cung cấp, bao gồm khoảng cách theo phương dọc, khoảng cách theo phương ngang và vận tốc tương đối giữa xe và đối tượng. Các thông số này được sử dụng để xác định vị trí của mục tiêu trong vùng quan sát, ước lượng thời gian còn lại trước khi xảy ra va chạm và phân loại mức độ nguy hiểm của từng đối tượng.

Thuật toán cảnh báo được chia thành ba bước chính. Trước hết, hệ thống xác định các đối tượng nằm trong vùng có khả năng ảnh hưởng đến chuyển động của xe. Tiếp theo, đối với từng mục tiêu thỏa mãn điều kiện, chương trình tính toán thời gian tới va chạm. Cuối cùng, dựa trên giá trị TTC kết hợp với khoảng cách đến mục tiêu, hệ thống phân loại mức cảnh báo và hiển thị kết quả trên giao diện người dùng.

Việc xây dựng thuật toán theo quy trình trên giúp giảm số lượng cảnh báo không cần thiết, đồng thời đảm bảo chỉ những mục tiêu thực sự có khả năng gây nguy hiểm

mới được đưa vào quá trình đánh giá. Điều này góp phần nâng cao độ tin cậy của hệ thống và hạn chế gây mất tập trung cho người lái.

**Nguyên lý xây dựng thuật toán cảnh báo**

Thuật toán cảnh báo an toàn trong hệ thống được xây dựng nhằm mục đích đánh giá mức độ nguy hiểm của các đối tượng được phát hiện bởi cảm biến radar ARS408 và đưa ra các cảnh báo phù hợp theo từng mức độ rủi ro khác nhau. Trong bối cảnh giao thông thực tế, số lượng đối tượng xuất hiện trong vùng quan sát của radar có thể thay đổi liên tục, bao gồm nhiều loại mục tiêu như phương tiện phía trước phương tiện ở làn bên cạnh hoặc các vật thể tĩnh. Do đó, việc xây dựng một thuật toán cảnh báo hiệu quả cần đảm bảo đồng thời hai yếu tố: độ chính xác trong đánh giá nguy cơ và khả năng giảm thiểu cảnh báo sai.

Dựa trên đặc tính của dữ liệu thu được từ radar ARS408, hệ thống sử dụng hai nhóm dữ liệu chính để phục vụ cho quá trình đánh giá nguy cơ va chạm, bao gồm khoảng cách tương đối và vận tốc tương đối giữa xe và mục tiêu. Hai đại lượng này đóng vai trò nền tảng trong việc mô tả trạng thái động học giữa phương tiện và đối tượng xung quanh, từ đó cho phép ước lượng khả năng xảy ra va chạm trong tương lai gần.

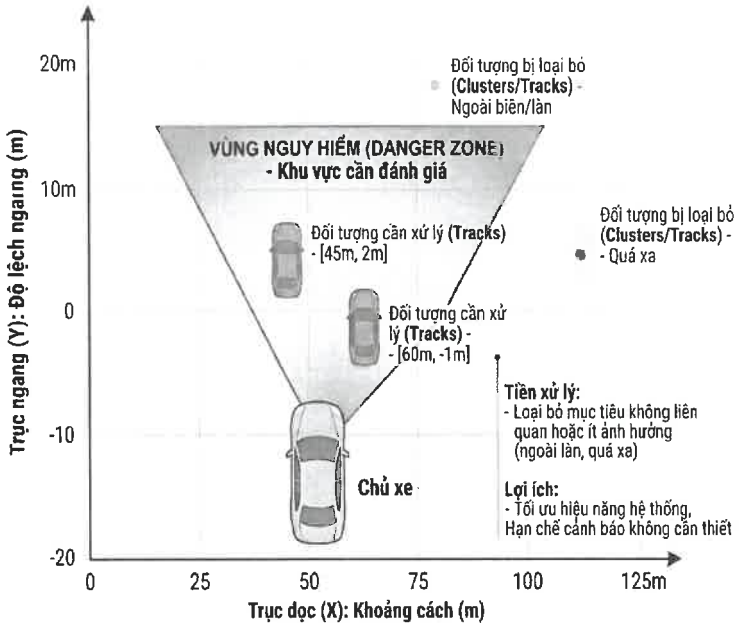
Trong đó, khoảng cách tương đối phản ánh vị trí hiện tại của đối tượng so với xe theo hệ tọa độ radar, thường được biểu diễn thông qua thành phần khoảng cách theo phương dọc và phương ngang. Thành phần vận tốc tương đối thể hiện xu hướng di chuyển giữa hai đối tượng cho biết mục tiêu đang tiến lại gần hay di chuyển ra xa so với xe. Sự kết hợp của hai thông số này giúp hệ thống không chỉ đánh giá trạng thái tĩnh tại thời điểm hiện tại mà còn dự đoán được xu hướng thay đổi trong tương lai gần.

Trên cơ sở đó, thuật toán cảnh báo tập trung vào hai yếu tố cốt lõi như sau:

- Vùng nguy hiểm được định nghĩa là khu vực không gian phía trước xe mà trong đó các đối tượng xuất hiện có khả năng ảnh hưởng trực tiếp đến quỹ đạo di chuyển của phương tiện như hình 3.6. Đây là bước tiền xử lý quan trọng nhằm loại bỏ các mục tiêu không liên quan hoặc ít ảnh hưởng đến tình huống lái xe thực tế, chẳng hạn như các đối tượng nằm ngoài làn đường hoặc ở khoảng cách quá xa.
- Trong hệ tọa độ radar, mỗi đối tượng được xác định bởi hai thành phần vị trí chính:

+ Trục dọc (X): biểu diễn khoảng cách từ xe đến mục tiêu theo hướng chuyển động .

+ Trục ngang (Y): biểu diễn độ lệch ngang so với tâm xe .




*Hình 3.6: Vùng nguy hiểm.*

Một đối tượng chỉ được đưa vào quá trình đánh giá nếu thỏa mãn điều kiện nằm trong vùng quan sát hợp lệ nằm phía trước xe và không vượt quá giới hạn biên ngang được xác định trước. Việc xác định vùng nguy hiểm giúp giảm đáng kể số lượng đối tượng cần xử lý, từ đó tối ưu hiệu năng hệ thống và hạn chế các cảnh báo không cần thiết.

- Thời gian tới va chạm :

Sau khi lọc các đối tượng nằm trong vùng nguy hiểm, hệ thống tiến hành ước lượng thời gian còn lại trước khi xảy ra va chạm, gọi là TTC và được minh họa như hình 3.7 Phương trình tính TTC:

$$TTC = \frac{D}{V_{rel}} \tag{3.1}$$

Trong đó:

D: là khoảng cách giữa xe và mục tiêu theo phương dọc.

$V_{rel}$: là vận tốc tương đối giữa xe và mục tiêu theo phương dọc.

Điều kiện áp dụng:

Nếu $V_{rel} > 0$: mục tiêu đang tiến lại gần có nguy cơ va chạm.

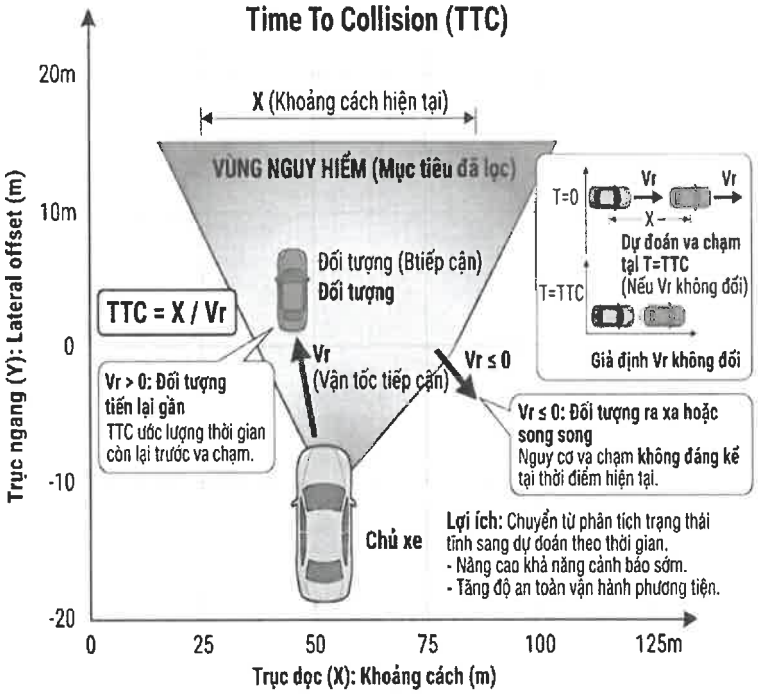
Nếu $V_{rel} \leq 0$: mục tiêu không tiến lại gần.

Đây là một trong những đại lượng quan trọng nhất trong các hệ thống hỗ trợ lái xe tiên tiến vì nó phản ánh trực tiếp mức độ khẩn cấp của tình huống giao thông.

Thời gian tới va chạm được xác định dựa trên giả định rằng vận tốc tương đối giữa xe và đối tượng không thay đổi trong một khoảng thời gian ngắn. Khi đó thời gian có thể được ước lượng thông qua tỷ lệ giữa khoảng cách hiện tại và vận tốc tiếp cận.

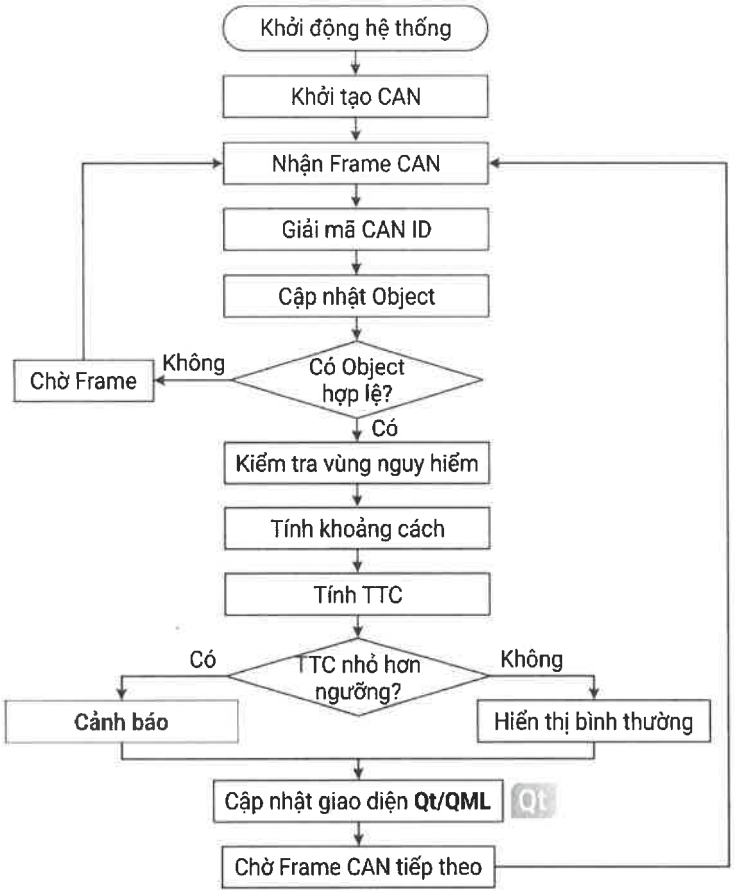
Nếu đối tượng đang tiến lại gần xe vận tốc tương đối dương thời gian tới va chạm cho biết thời gian còn lại trước khi xảy ra va chạm. Ngược lại, nếu đối tượng di chuyển ra xa hoặc vận tốc tương đối bằng không, nguy cơ va chạm được xem là không đáng kể tại thời điểm hiện tại.

Việc sử dụng thời gian tới va chạm giúp hệ thống chuyển từ bài toán phân tích trạng thái tĩnh sang bài toán dự đoán theo thời gian, từ đó nâng cao khả năng cảnh báo sớm và tăng độ an toàn khi vận hành phương tiện.




*Hình 3.7: Minh họa thời gian tới va chạm.*

Qua quá trình phân tích như trên đề án đưa ra lưu đồ thuật toán như hình 3.8.




*Hình 3.8: Lưu đồ thuật toán của hệ thống.*

Hình 3.8 trình bày lưu đồ giải thuật xử lý dữ liệu của hệ thống cảnh báo va chạm sử dụng radar ARS408. Mục tiêu của giải thuật là thu nhận dữ liệu từ cảm biến radar thông qua mạng CAN, xác định các đối tượng phía trước, tính toán chỉ số thời gian tới va chạm và đưa ra cảnh báo theo thời gian thực.

*Bước 1. Khởi động hệ thống*

Khi chương trình được khởi động, hệ thống tiến hành khởi tạo các thành phần cần thiết bao gồm:

- Khởi tạo giao diện Qt/QML.
- Khởi tạo SocketCAN.
- Thiết lập tốc độ truyền CAN (500 kbps).
- Cấp phát bộ nhớ lưu trữ danh sách đối tượng radar.

Sau khi hoàn thành quá trình khởi tạo, hệ thống chuyển sang trạng thái chờ dữ liệu từ radar.

*Bước 2. Thu nhận Frame CAN*

Radar ARS408 truyền liên tục các bản tin CAN chứa thông tin về các mục tiêu phát hiện được.

Mỗi khi một CAN Frame được nhận, hệ thống thực hiện:

- Đọc CAN ID.
- Kiểm tra độ dài dữ liệu.
- Lưu dữ liệu vào bộ đệm.

Nếu chưa nhận được dữ liệu mới, chương trình tiếp tục chờ frame tiếp theo.

*Bước 3. Giải mã CAN ID*

Dựa trên CAN ID, hệ thống xác định loại bản tin nhận được. Sau khi xác định loại bản tin, các byte dữ liệu được giải mã theo tài liệu giao thức của radar để thu được các thông số:

- Object ID.
- Khoảng cách theo trục X.
- Khoảng cách theo trục Y.
- Vận tốc tương đối.
- Gia tốc.
- Góc phương vị.
- Xác suất tồn tại của mục tiêu.

*Bước 4. Cập nhật thông tin đối tượng*

Do thông tin của một mục tiêu được truyền trên nhiều frame CAN khác nhau, hệ thống sử dụng Object ID để ghép các bản tin tương ứng. Sau khi nhận đủ thông tin của một Object, cấu trúc dữ liệu sẽ được cập nhật. Nếu dữ liệu chưa đầy đủ hoặc Object không hợp lệ thì hệ thống tiếp tục chờ các frame kế tiếp.

*Bước 5. Kiểm tra vùng nguy hiểm*

Không phải mọi mục tiêu đều cần được cảnh báo. Do đó hệ thống chỉ lựa chọn các mục tiêu nằm trong vùng quan tâm phía trước xe. Các mục tiêu nằm ngoài vùng này sẽ bị loại bỏ nhằm giảm cảnh báo giả.

*Bước 6. Tính khoảng cách*

Đối với các mục tiêu hợp lệ, khoảng cách từ radar đến mục tiêu được tính theo:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.2}$$

Trong đó:

- $x$ là khoảng cách dọc.
- $y$ là khoảng cách ngang.

Khoảng cách này được sử dụng cho việc hiển thị và tính TTC.

*Bước 7. Tính Time-To-Collision (TTC)*

Nếu mục tiêu đang tiến lại gần xe (vận tốc tương đối âm), hệ thống tính thời gian tới va chạm.

*Bước 8. Đánh giá mức độ nguy hiểm*

Giá trị TTC được so sánh với ngưỡng cảnh báo được thiết lập trước. Nếu $TTC < T_{th}$ thì hệ thống xác định có nguy cơ va chạm và kích hoạt cảnh báo. Ngược lại, hệ thống tiếp tục hiển thị trạng thái bình thường.

Thông thường:

- TTC < 2 s: cảnh báo nguy hiểm.
- TTC từ 2–4 s: cảnh báo sớm.
- TTC > 4 s: trạng thái an toàn.

(Ngưỡng này có thể thay đổi tùy theo yêu cầu của hệ thống.)

*Bước 9. Cập nhật giao diện Qt/QML*

Sau khi hoàn thành quá trình xử lý, toàn bộ thông tin được gửi tới giao diện Qt/QML để hiển thị:

- Vị trí mục tiêu trên màn hình radar;
- Khoảng cách.
- Vận tốc.
- Giá trị TTC.
- Trạng thái cảnh báo (màu xanh, vàng hoặc đỏ).

Quá trình này được thực hiện theo thời gian thực nhằm đảm bảo người sử dụng luôn nhận được thông tin mới nhất.

*Bước 10. Lặp xử lý*

Sau khi giao diện được cập nhật, hệ thống quay trở lại trạng thái chờ CAN Frame tiếp theo và lặp lại toàn bộ quy trình. Do radar truyền dữ liệu liên tục với chu kỳ khoảng

50–100 ms, giải thuật hoạt động theo cơ chế vòng lặp vô hạn cho đến khi chương trình kết thúc.

## 3.6. Thiết lập thử nghiệm hệ thống

### 3.6.1. Mục đích thử nghiệm

Mục đích của quá trình thử nghiệm hệ thống là kiểm tra và đánh giá khả năng hoạt động thực tế của chương trình xử lý dữ liệu radar ARS408 trong các điều kiện mô phỏng giao thông. Thử nghiệm tập trung vào việc xác minh khả năng tiếp nhận dữ liệu CAN, giải mã thông tin mục tiêu quản lý đối tượng theo thời gian thực và đưa ra cảnh báo an toàn phù hợp.

Bên cạnh đó, quá trình thử nghiệm cũng nhằm đánh giá độ ổn định của hệ thống khi xử lý nhiều mục tiêu đồng thời, khả năng cập nhật dữ liệu liên tục và độ chính xác của các mức cảnh báo được xây dựng trong thuật toán.

### 3.6.2. Thiết lập môi trường và kịch bản thử nghiệm

Hệ thống được triển khai thử nghiệm trên nền tảng phần cứng và phần mềm như sau:

- Cảm biến radar: Continental ARS408 (76–77 GHz FMCW radar)
- Thiết bị giao tiếp CAN: USB-to-CAN adapter (hoặc CAN interface tương đương)
- Bộ xử lý: đề án xử dụng máy tính nhúng Raspberry Pi 5
- Ngôn ngữ lập trình: C++
- Framework giao diện: Qt/QML
- Giao thức truyền thông: CAN bus (500 kbps hoặc theo cấu hình radar)

Trong quá trình thử nghiệm, radar được lắp đặt cố định phía trước xe hoặc mô hình mô phỏng, đảm bảo vùng quan sát hướng về phía các mục tiêu thử nghiệm.

**Kịch bản thử nghiệm:**

Để đánh giá toàn diện hệ thống, một số kịch bản thử nghiệm được thiết lập như sau:

- Kịch bản 1: Mục tiêu tĩnh phía trước xe.

Một vật thể đứng yên được đặt trong vùng quan sát của radar địa hình bằng phẳng với các khoảng cách khác nhau. Mục đích của kịch bản này là kiểm tra khả năng phát hiện mục tiêu và hiển thị chính xác khoảng cách.

- Kịch bản 2: Mục tiêu di chuyển tiến lại gần.

Năm phương tiện hoặc vật thể di chuyển theo hướng thẳng về phía xe trên địa hình đường giao thông thực tế với vận tốc ổn định. Kịch bản này được sử dụng để kiểm tra khả năng tính toán TTC và mức độ cảnh báo theo thời gian thực.

- Kịch bản 3: Mục tiêu di chuyển cắt ngang.

Sáu mục tiêu di chuyển từ trái sang phải hoặc ngược lại trên địa hình đường giao thông thực tế và trong vùng quan sát của radar. Kịch bản này nhằm đánh giá khả năng lọc vùng nguy hiểm và hạn chế cảnh báo sai.

- Kịch bản 4: Nhiều mục tiêu đồng thời.

Nhiều đối tượng xuất hiện đồng thời trong vùng quan sát với các hướng và vận tốc khác nhau. Kịch bản này kiểm tra khả năng quản lý đa đối tượng và hiệu năng xử lý của hệ thống.

**Quy trình thực hiện::**

Bước 1: Khởi động hệ thống radar ARS408 và thiết bị giao tiếp CAN.

Bước 2: Khởi chạy chương trình xử lý dữ liệu trên máy tính.

Bước 3: Kiểm tra kết nối CAN và luồng dữ liệu đầu vào.

Bước 4: Thực hiện các kịch bản thử nghiệm đã xây dựng.

Bước 5: Quan sát dữ liệu hiển thị trên giao diện Qt/QML.

Bước 6: Ghi nhận kết quả về khoảng cách, vận tốc và mức cảnh báo.

Bước 7: Đánh giá độ ổn định và độ chính xác của hệ thống.

**Kết quả:**

Trong quá trình thử nghiệm, hệ thống cho thấy khả năng hoạt động ổn định trong việc tiếp nhận và xử lý dữ liệu từ radar ARS408. Các đối tượng được phát hiện và hiển thị theo thời gian thực, đồng thời hệ thống có thể cập nhật trạng thái cảnh báo tương ứng với sự thay đổi của khoảng cách và vận tốc tương đối.

Khi số lượng mục tiêu tăng lên, hệ thống vẫn duy trì được khả năng xử lý ổn định nhờ kiến trúc module hóa và cơ chế xử lý theo luồng riêng biệt cho dữ liệu CAN.

## 3.7. Đánh giá kết quả thực nghiệm hệ thống

### 3.7.1. Kết quả phát hiện và hiển thị mục tiêu

Trong quá trình thử nghiệm, radar ARS408 cho khả năng phát hiện đồng thời nhiều mục tiêu trong vùng quan sát phía trước xe. Các mục tiêu được hiển thị trên giao diện theo dạng tọa độ 2D, tương ứng với khoảng cách dọc và khoảng cách ngang so với xe.

Kết quả cho thấy hệ thống có khả năng cập nhật liên tục các mục tiêu theo từng chu kỳ quét của radar đảm bảo dữ liệu hiển thị phản ánh đúng trạng thái môi trường thực tế.

**Nhận xét:**

- Các mục tiêu đứng yên được hiển thị ổn định theo thời gian.
- Các mục tiêu di chuyển được cập nhật vị trí liên tục.
- Không xảy ra hiện tượng mất đối tượng trong điều kiện tín hiệu ổn định.

### 3.7.2. Đánh giá độ chính xác dữ liệu khoảng cách và vận tốc tương đối

Để đánh giá độ chính xác, các giá trị khoảng cách và vận tốc thu được từ radar được so sánh với giá trị thực tế trong quá trình thử nghiệm.

Kết quả cho thấy:

- Sai số khoảng cách nằm trong giới hạn cho phép của cảm biến radar(thường nhỏ hơn mức sai số công bố từ nhà sản xuất .
- Vận tốc tương đối được cập nhật ổn định khi đối tượng di chuyển thẳng về phía hoặc rời xa radar .
- Sai số tăng nhẹ trong trường hợp mục tiêu di chuyển ngang hoặc thay đổi hướng đột ngột.

*Bảng 3.3: kết quả đo đạc khoảng cách.*

| Trường hợp | Khoảng cách thực (m) | Khoảng cách đo (m) | Sai số (%) |
|---|---|---|---|
| Mục tiêu đứng yên | 10 | 10.3 | 3% |
| Mục tiêu tiến lại gần | 20 → 5 | 20.5 → 5.2 | <5% |
| Mục tiêu cắt ngang | 15 | 15.8 | ~5% |

### 3.7.3. Đánh giá khả năng cảnh báo an toàn

Thuật toán cảnh báo dựa trên vùng nguy hiểm và TTC cho kết quả hoạt động phù hợp với các tình huống thử nghiệm.

**Kết quả quan sát:**

- Khi mục tiêu tiến lại gần với vận tốc cao, hệ thống chuyển sang mức cảnh báo nguy hiểm nhanh chóng.
- Khi mục tiêu ở xa hoặc di chuyển ra xa, hệ thống không kích hoạt cảnh báo.

- Trong các tình huống cắt ngang, hệ thống chỉ cảnh báo khi đối tượng đi vào vùng nguy hiểm.

**Nhận xét:**

Thuật toán giúp giảm đáng kể các cảnh báo không cần thiết, đồng thời đảm bảo phản ứng kịp thời trong các tình huống có nguy cơ va chạm thực sự.

### 3.7.4. Đánh giá ưu điểm nhược điểm của hệ thống

Dựa trên kết quả thực nghiệm, hệ thống xử lý dữ liệu radar ARS408 đạt được các tiêu chí chính sau:

- Phát hiện và theo dõi mục tiêu ổn định trong thời gian thực.
- Độ chính xác khoảng cách và vận tốc phù hợp với yêu cầu ứng dụng ADAS .
- Thuật toán cảnh báo hoạt động đúng logic, giảm cảnh báo sai.
- Hệ thống đảm bảo khả năng mở rộng và xử lý đa đối tượng.

Tuy nhiên, hệ thống vẫn tồn tại một số hạn chế như:

- Độ chính xác giảm trong điều kiện nhiều nhiễu hoặc nhiều mục tiêu giao nhau.
- Chưa tích hợp thêm cảm biến hỗ trợ (camera/lidar) để tăng độ tin cậy .
- Thuật toán TTC giả định vận tốc không đổi, chưa phản ánh đầy đủ các tình huống phức tạp thực tế.

## 3.8. Kết luận chương

Trong chương này, đề án đã trình bày quá trình xây dựng và phát triển chương trình cảnh báo an toàn trên xe ô tô sử dụng cảm biến radar ARS408. Từ việc phân tích yêu cầu hệ thống, thiết kế kiến trúc phần mềm, xây dựng các khối chức năng xử lý dữ liệu đến việc thiết kế thuật toán cảnh báo và kiểm thử thực nghiệm, toàn bộ quá trình được thực hiện theo hướng tiếp cận module hóa nhằm đảm bảo tính linh hoạt, dễ mở rộng và phù hợp với các yêu cầu của hệ thống thời gian thực.

Cụ thể, chương đã tập trung vào việc thiết kế các khối chức năng chính bao gồm khối tiếp nhận dữ liệu CAN, khối giải mã dữ liệu radar, khối quản lý đối tượng, khối xử lý cảnh báo và khối giao diện hiển thị. Các khối này được tổ chức theo kiến trúc phân tách rõ ràng, giúp tối ưu quá trình xử lý dữ liệu và giảm sự phụ thuộc giữa các thành phần trong hệ thống.

Bên cạnh đó, thuật toán cảnh báo được xây dựng dựa trên hai yếu tố chính là vùng nguy hiểm và thời gian tới va chạm. Sự kết hợp giữa phân tích không gian và phân tích động học giúp hệ thống có khả năng đánh giá chính xác mức độ nguy hiểm của các

đối tượng trong môi trường giao thông, đồng thời giảm thiểu cảnh báo sai trong các tình huống không cần thiết.

Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định trong điều kiện thực tế, có khả năng phát hiện và theo dõi nhiều đối tượng đồng thời, xử lý dữ liệu theo thời gian thực và đưa ra cảnh báo phù hợp theo từng mức độ nguy cơ. Tuy nhiên, hệ thống vẫn còn một số hạn chế nhất định, đặc biệt trong các tình huống giao thông phức tạp hoặc khi có nhiều đối tượng xuất hiện chồng lấn trong vùng quan sát.

Chương trình xây dựng trong đề án đã đáp ứng được các mục tiêu đề ra là cơ sở quan trọng để phát triển các hệ thống hỗ trợ lái xe nâng cao hơn trong tương lai, đặc biệt khi kết hợp với các cảm biến khác như camera, LiDAR nhằm tăng độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống.

# KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ đề án, hệ thống cảnh báo an toàn trên xe ô tô sử dụng cảm biến radar ARS408 đã được nghiên cứu, thiết kế và xây dựng thành công. Đề án tập trung vào việc khai thác dữ liệu radar thông qua giao tiếp CAN, thực hiện giải mã các bản tin radar, xây dựng mô hình quản lý đối tượng và phát triển thuật toán cảnh báo dựa trên vùng nguy hiểm và thời gian tới va chạm TTC.

Về mặt hệ thống, chương trình được xây dựng theo kiến trúc module hóa với các khối chức năng rõ ràng, bao gồm: khối tiếp nhận dữ liệu CAN, khối giải mã dữ liệu radar, khối quản lý đối tượng, khối xử lý cảnh báo và khối giao diện hiển thị. Cách tổ chức này giúp hệ thống dễ dàng mở rộng, bảo trì và nâng cấp trong tương lai, đồng thời đảm bảo khả năng xử lý dữ liệu theo thời gian thực.

Về mặt thuật toán, việc kết hợp giữa vùng nguy hiểm và thời gian tới va chạm TTC đã giúp hệ thống đánh giá chính xác mức độ rủi ro của các đối tượng trong môi trường giao thông. Thuật toán này cho phép loại bỏ các mục tiêu không liên quan và tập trung vào các tình huống có khả năng gây va chạm, từ đó nâng cao hiệu quả cảnh báo và giảm thiểu cảnh báo sai.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định trong nhiều kịch bản khác nhau, có khả năng phát hiện và theo dõi đồng thời nhiều đối tượng, xử lý dữ liệu theo thời gian thực và đưa ra cảnh báo phù hợp theo từng mức độ nguy hiểm. Điều này chứng minh rằng hệ thống đáp ứng được các yêu cầu cơ bản của một hệ thống hỗ trợ lái xe sử dụng radar.

Tuy nhiên, hệ thống vẫn còn tồn tại một số hạn chế nhất định như độ chính xác giảm trong môi trường có nhiều nhiễu, chưa tích hợp thêm các cảm biến bổ trợ và thuật toán TTC còn dựa trên giả định vận tốc không đổi trong thời gian ngắn.

**Hướng phát triển**

Trong tương lai, hệ thống có thể được phát triển và mở rộng theo các hướng sau nhằm nâng cao độ chính xác và tính ứng dụng thực tế:

- Tích hợp đa cảm biến : Kết hợp radar ARS408 với camera, LiDAR hoặc cảm biến siêu âm nhằm tăng độ chính xác trong việc phát hiện và phân loại đối tượng, đồng thời giảm sai số trong môi trường phức tạp.
- Cải tiến thuật toán cảnh báo: Nâng cấp mô hình TTC bằng cách xem xét thêm gia tốc của đối tượng, quỹ đạo di chuyển và mô hình dự đoán hành vi để tăng độ chính xác trong các tình huống động.

- Áp dụng thuật toán học máy: Sử dụng các mô hình học sâu để phân loại đối tượng, dự đoán hành vi giao thông và cải thiện khả năng ra quyết định của hệ thống cảnh báo.
- Tối ưu hiệu năng hệ thống: Nâng cấp cơ chế xử lý song song, tối ưu luồng dữ liệu CAN và cải thiện hiệu suất hiển thị nhằm đáp ứng tốt hơn trong các hệ thống nhúng hoặc thời gian thực.
- Triển khai trên nền tảng nhúng thực tế: Đưa hệ thống lên các nền tảng như Linux Embedded hoặc ECU ô tô để tiến gần hơn đến ứng dụng thực tế trong công nghiệp ô tô.

# TÀI LIỆU THAM KHẢO

**Giáo trình & bài giảng tiếng Việt:**

[1]. *TS. Đặng Hoài Bắc, TS. Nguyễn Ngọc Minh*, Thiết kế hệ thống nhúng, Nhà xuất bản Thông tin và Truyền thông, Hà Nội, 2013.

[2]. *ThS. Trần Thúy Hà, ThS. Đỗ Mạnh Hà*, Giáo trình điện tử số, Nhà xuất bản Bưu điện, Hà Nội, 2009.

[3]. *ThS. Đỗ Mạnh Hà, ThS. Trần Thúy Hà, ThS. Trần Thục Linh*, Bài giảng Cấu kiện điện tử, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Hà Nội, 2013.

[4]. *N.Đ.Luyện, N.V.Bắc, V.H.Thanh*, "Giáo trình nguyên lý ra đa," Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2007.

**Báo khoa học tiếng Anh:**

[5]. *Thang M. Nguyen*, Ra đa center, Viettel High Technology Industries Corporation Viettel Group,Hanoi,Vietnam.,"A Method for Processing Unwanted Target Caused by Reflection in Secondary Surveillance Ra đa", 2022 14th International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS). Year: 2022 | Conference Paper | Publisher: IEEE Pages: 135-143.

# PHỤ LỤC

Code xử lý giao diện cảnh báo:

- Code nhận các thông tin từ phía c++ gửi lên code qml giao diện

```
Connections {
    target: canManager
    function onRadarObjectDetected(objId, distLong, distLat, vel, rcs, isDanger, ttc) {
        var found = false;
        var currentTime = Date.now();
        if (isDanger) {
            root.systemInDanger = true;
            dangerTimeoutTimer.restart();
        }
        for (var i = 0; i < sharedRadarModel.count; i++) {
            if (sharedRadarModel.get(i).objId === objId) {
                sharedRadarModel.setProperty(i, "dist", distLong);
                sharedRadarModel.setProperty(i, "lat", distLat);
                sharedRadarModel.setProperty(i, "vel", vel);
                sharedRadarModel.setProperty(i, "rcs", rcs);
                sharedRadarModel.setProperty(i, "isDanger", isDanger);
                sharedRadarModel.setProperty(i, "ttc", ttc);
                sharedRadarModel.setProperty(i, "lastUpdated", currentTime);
                found = true;
                break;
            }
        }
        if (!found) {
            sharedRadarModel.append({
                "objId": objId, "dist": distLong, "lat": distLat,
                "vel": vel, "rcs": rcs, "isDanger": isDanger,
                "ttc": ttc, "lastUpdated": currentTime
            });
        }
    }
}
```

- Code hiển thị mục tiêu và cảnh báo:

```
// === DANH SÁCH MỤC TIÊU ===
        ListView {
            Layout.fillWidth: true; Layout.fillHeight: true; clip: true; spacing: 0
            model: sharedRadarModel
            delegate: Rectangle {
                width: parent.width; height: 35
                color: model.isDanger ? "#40FF4D4D" : "transparent"
                Rectangle { width: parent.width; height: 1; color: "#2A3544";
anchors.bottom: parent.bottom }
                RowLayout {
                    anchors.fill: parent; anchors.leftMargin: 5
                    Label { text: model.objId; color: "white"; font.bold: true;
Layout.preferredWidth: 30 }
                    Label { text: Number(model.dist).toFixed(1) + " m"; color:
root.neonGreen; Layout.preferredWidth: 70 }
                    Label { text: Number(model.vel).toFixed(1) + " m/s"; color: model.vel
< 0 ? root.warningRed : root.neonGreen; Layout.preferredWidth: 70 }
                    Label {
                        text: model.ttc < 90 ? Number(model.ttc).toFixed(2) + "s" : "--"
                        color: model.isDanger ? root.warningRed : root.rcsOrange
                        font.bold: model.isDanger
                        Layout.fillWidth: true
                    }
                }
            }
        }
```

```
//==== Hiển thị cảnh báo ===//
Rectangle {
    id: globalWarningOverlay
    anchors.fill: parent
    color: "transparent"
    border.color: root.warningRed
    border.width: 10
    visible: root.systemInDanger
    z: 999
    SequentialAnimation on opacity {
      running: root.systemInDanger
      loops: Animation.Infinite
      NumberAnimation { from: 0.2; to: 1.0; duration: 250 }
      NumberAnimation { from: 1.0; to: 0.2; duration: 250 }
    }
    Rectangle {
      anchors.top: parent.top
      anchors.topMargin: 60
      anchors.horizontalCenter: parent.horizontalCenter
      width: 400; height: 60
      color: "#B3FF0000"
      radius: 30
      Text {
        anchors.centerIn: parent
        text: " ⚠ NGUY CƠ VA CHẠM (FCW) ⚠ "
        color: "white"
        font.pixelSize: 22
        font.bold: true} }}
```

Code giải mã CAN nhận các mục tiêu và tính toán thời gian tới va chạm:

- Code nhận các mục tiêu

```
// ID 0x63B: GÓI OBJECT GENERAL - LƯU VÀO CACHE
if (id == 0x63B && payload.size() >= 8) {
   int objId = (uint8_t)payload[0];
   RadarObject& obj = radarCache[objId]; // Lấy từ Cache hoặc tạo mới
   uint8_t b1 = (uint8_t)payload[1];
   uint8_t b2 = (uint8_t)payload[2];
   uint8_t b3 = (uint8_t)payload[3];
   uint8_t b4 = (uint8_t)payload[4];
   uint8_t b5 = (uint8_t)payload[5];
   uint8_t b6 = (uint8_t)payload[6];
   uint8_t b7 = (uint8_t)payload[7];
   // Bóc tách tọa độ
   uint16_t rawDistLong = (b1 << 5) | (b2 >> 3);
   obj.distLong = (rawDistLong * 0.2) - 500.0;
   uint16_t rawDistLat = ((b2 & 0x07) << 8) | b3;
   obj.distLat = (rawDistLat * 0.2) - 204.6;
   uint16_t rawVelLong = (b4 << 2) | (b5 >> 6);
   obj.velLong = (rawVelLong * 0.25) - 128.0;
   obj.rcs = b7 * 0.5 - 50.0;
   uint8_t dynProp = b6 & 0x07;
   obj.isStatic = (dynProp == 1 || dynProp == 3 || dynProp == 5 || dynProp == 7);
   obj.hasGeneral = true; // Đánh dấu đã nhận gói 1
}
```

```
    // ID 0x63D: GÓI OBJECT EXTENDED - LẤY GIA TỐC VÀ TÍNH TTC
    else if (id == 0x63D && payload.size() >= 8) {
        int objId = (uint8_t)payload[0];
        // Phải có gói 0x63B trước đó thì mới xử lý
        if (radarCache.find(objId) != radarCache.end() && radarCache[objId].hasGeneral) {
            RadarObject& obj = radarCache[objId];
            // Bóc gia tốc tương đối (accelLong)
            uint16_t rawAccelLong = (payload[1] << 3) | (payload[2] >> 5);
            obj.accelLong = (rawAccelLong * 0.01) - 10.0;
            bool inDrivingCorridor = isObjectInDynamicCorridor(obj.distLong, obj.distLat,
m_vehicleSpeed, currentEgoYawRate);
            // 2. Tính TTC Động học
            double ttc = calculateEnhancedTTC(obj.distLong, obj.velLong, obj.accelLong);
            bool isDanger = false;
            if (inDrivingCorridor) {
                if (obj.velLong < -0.2) {
                    if (obj.isStatic) {
                        if (obj.distLong < m_warningDistance) {
                            isDanger = true;
                        }
                    } else {
                        if (ttc <= m_warningTTC) {
                            isDanger = true;
                        }
                    }
                }
            }
            emit radarObjectDetected(objId, obj.distLong, obj.distLat, obj.velLong, obj.rcs,
isDanger, ttc); // gửi lên giao diện
```

BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

**CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM**
**Độc lập - Tự do - Hạnh phúc**

# BÁO CÁO GIẢI TRÌNH
# SỬA CHỮA, HOÀN THIỆN ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP

Họ và tên học viên: Nguyễn Văn Đôn
Chuyên ngành: Kỹ thuật Điện tử
Khóa: 2023 đợt 1

Tên đề tài: Nghiên cứu, ứng dụng công nghệ radar FMCW vào hệ thống cảnh báo trên xe ô tô.

Người hướng dẫn khoa học: TS. Trần Thị Thúy Hà

Ngày bảo vệ: 21/07/2026

Các nội dung học viên đã sửa chữa, bổ sung trong đề án tốt nghiệp theo ý kiến đóng góp của Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp:

| TT | Ý kiến hội đồng | Sửa chữa của học viên |
|---|---|---|
| 1 | Chỉnh sửa lỗi soạn thảo, lỗi ngữ pháp, chính tả | Học viên đã rà soát, chỉnh sửa các lỗi soạn thảo, các lỗi ngữ pháp |
| 2 | Bổ sung tài liệu tham khảo | Tiếp thu góp ý của Hội đồng, tác giả đã bổ sung thêm tài liệu tham khảo |
| 3 | Giải thích thêm về lưu đồ thuật toán hình 3.8 và đưa mã nguồn vào phụ lục | Tiếp thu góp ý của Hội đồng, tác giả đã bổ sung thêm giải thích chi tiết lưu đồ thuật toán hình 3.8 và thêm mã nguồn vào phần phụ lục |
| 4 | Giải thích thêm về việc chỉ đề cập CA-CFAR, GO-CFAR. Bổ xung giới thiệu SO, OS -CFAR | Tác giả đã giới thiệu thêm về SO, OS - CFAR trong chương 2 và nhận xét. |

*Hà Nội, ngày 28 tháng 7 năm 2026*

**Ký xác nhận của**

| CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN | THƯ KÝ HỘI ĐỒNG | NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC | HỌC VIÊN |
|---|---|---|---|
| TS. Nguyễn Trung Hiếu | TS. Nguyễn Thị Hương Thảo | TS. Trần Thị Thúy Hà | Nguyễn Văn Đôn |