

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**



Hoàng Trung Dũng

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP CHỐNG NHIỄU CHO
MẠNG TRUYỀN THÔNG TÁN XẠ NGƯỢC SỬ DỤNG
PHƯƠNG PHÁP HỌC SÂU TĂNG CƯỜNG**

KHOÁ LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Công nghệ thông tin

HÀ NỘI – 2024

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

Hoàng Trung Dũng

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP CHỐNG NHIỄU CHO
MẠNG TRUYỀN THÔNG TÁN XẠ NGƯỢC SỬ DỤNG
PHƯƠNG PHÁP HỌC SÂU TĂNG CƯỜNG

KHOÁ LUẬN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY

Ngành: Công nghệ thông tin

Cán bộ hướng dẫn: TS. Nguyễn Ngọc Tân

HÀ NỘI – 2024

TÓM TẮT

Tóm tắt: Truyền thông không dây đã và đang đóng vai trò vô cùng quan trọng trong cuộc sống con người. Tuy nhiên phương pháp truyền thông này lại rất dễ bị tấn công gây nhiễu do tín hiệu vô tuyến phát sóng trong không gian mở. Thêm vào đó, với sự phát triển của UAV (thiết bị bay không người lái) với khả năng cung cấp đường truyền tầm nhìn thẳng (LoS) và hệ số suy giảm đường truyền thấp đã hỗ trợ cho việc tấn công đối với kết nối không dây. Trong khoá luận tốt nghiệp này, một phương án chống nhiễu cho mạng truyền thông không dây sẽ được trình bày, sử dụng học tăng cường sâu, kết hợp với kỹ thuật tán xạ ngược và thu hoạch năng lượng để không những chống lại mà còn tận dụng được tín hiệu gây nhiễu từ UAV để nâng cao hiệu suất của hệ thống truyền thông không dây.

Từ khóa: *Truyền thông không dây, Nhiễu, UAV, Học tăng cường sâu, Tán xạ ngược, Thu năng lượng.*

LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, cho phép em gửi lời cảm ơn đến các thầy, cô giáo trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc Gia Hà Nội đã luôn tận tình chỉ bảo và tạo điều kiện trong suốt quá trình em học tập tại trường.

Em xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến thầy giáo TS. Nguyễn Ngọc Tân đã tận tình hướng dẫn và đóng góp ý kiến quý báu trong suốt quá trình thực hiện khóa luận tốt nghiệp của em.

Cuối cùng em xin gửi lời cảm ơn đến gia đình của mình, nơi đã luôn là nguồn động lực cho em trong suốt thời gian vừa qua.

Em xin chân thành cảm ơn.

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng mọi kết quả trình bày trong khóa luận đều do tôi thực hiện dưới sự hướng dẫn của TS. Nguyễn Ngọc Tân.

Tất cả các tham khảo nghiên cứu liên quan đều nêu rõ nguồn gốc một cách rõ ràng từ danh mục tài liệu tham khảo trong khóa luận. Khóa luận không sao chép tài liệu, công trình nghiên cứu từ người khác mà không ghi rõ về mặt tài liệu tham khảo.

Các thống kê, các kết quả trình bày khóa luận đều là từ thực nghiệm khi chạy chương trình. Nếu tôi sai tôi hoàn toàn chịu trách nhiệm theo quy định của trường Đại học Công Nghệ - Đại học Quốc Gia Hà Nội.

Hà Nội, tháng 12 năm 2024

Hoàng Trung Dũng

Mục lục

Chương 1. Đặt vấn đề	1
Chương 2. Cơ sở lý thuyết	3
2.1. Mạng không dây	3
2.1.1. Giới thiệu	3
2.1.2. Phân loại mạng không dây và ứng dụng	4
2.2. Tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến	6
2.2.1. Giới thiệu	6
2.2.2. Thông số đánh giá một cuộc tấn công gây nhiễu	7
2.2.3. Các mô hình tấn công gây nhiễu	8
2.3. Tấn công gây nhiễu bằng UAV	9
2.4. Kỹ thuật chống nhiễu	10
2.4.1. Điều chỉnh công suất phát	10
2.4.2. Trải phổ nhảy tần - FHSS	11
2.4.3. Kỹ thuật điều chỉnh tốc độ - Kỹ thuật RA	11
2.5. Tấn xạ ngược môi trường xung quanh	12
2.5.1. Giới thiệu	12
2.5.2. Mô tả nguyên lý hoạt động	12
2.5.2.1. Quá trình truyền gói tin ở máy phát	12
2.5.2.2. Quá trình giải mã gói tin ở máy thu	13
2.6. Học tăng cường	14
2.6.1. Giới thiệu	14
2.6.2. Quá trình ra quyết định Markov - MDP	15
2.6.3. Hàm giá trị trả về	16
2.6.4. Hàm giá trị và chính sách	17
2.6.5. Phương trình Bellman	17
2.6.6. Chính sách tối ưu và hàm giá trị tối ưu	18
2.7. Một số phương pháp giải quyết bài toán MDP	19
2.7.1. Phương pháp quy hoạch động - Dynamic programming	19

2.7.1.1. Đánh giá chính sách	19
2.7.1.2. Cải thiện chính sách	20
2.7.1.3. Phương pháp lặp chính sách	20
2.7.1.4. Phương pháp lặp giá trị	21
2.7.2. Phương pháp lấy mẫu Monte Carlo	21
2.8. Giải quyết MDP bằng học tăng cường	22
2.8.1. Học tăng cường không mô hình - Model-free RL	22
2.8.2. Thuật toán học khác biệt thời gian - Temporal Difference	22
2.8.2.1. Phương pháp học theo chính sách (on-policy method)	23
2.8.2.2. Phương pháp học không theo chính sách (off-policy method)	24
2.9. Thuật toán Q-learning	25
2.10. Học sâu tăng cường	26
2.11. Mạng sâu Q - DQN	27
Chương 3. Đề xuất phương pháp giải quyết bài toán gây nhiễu từ UAV	29
3.1. Mô hình hệ thống	29
3.1.1. Mô hình gây nhiễu	29
3.1.2. Mô hình kênh truyền	31
3.2. Xây dựng bài toán chống nhiễu từ UAV	32
3.2.1. Không gian trạng thái	32
3.2.2. Không gian hành động	32
3.2.3. Phần thưởng tức thời	33
3.2.4. Hàm mục tiêu	34
3.3. Áp dụng phương pháp học tăng cường Q-learning và học tăng cường sâu DQN để chống nhiễu	34
3.3.1. Sử dụng thuật toán học tăng cường Q-learning	34
3.3.2. Phương pháp học tăng cường sâu DQN	36
Chương 4. Thiết lập mô phỏng và đánh giá hiệu năng	39
4.1. Thông số cài đặt thử nghiệm	39
4.1.1. Thông số hệ thống	39
4.1.2. Thông số cài đặt thuật toán Q-learning và DQN	39

4.1.2.1. Thuật toán Q-learning	39
4.1.2.2. Thuật toán DQN	39
4.2. Kết quả mô phỏng	40
4.2.1. So sánh sự hội tụ của hai thuật toán học tăng cường Q và DQN.....	40
4.2.2. So sánh với chiến lược phòng thủ "greedy" không sử dụng DRL	40
4.2.2.1. Đánh giá hiệu quả khi thay đổi công suất nhiễu	40
4.2.2.2. Đánh giá hiệu quả khi thay đổi số gói tin có thể phát chủ động \hat{d}_t	41
4.2.2.3. Đánh giá hiệu quả khi thay đổi chu kì thu năng lượng T_{harvest} của máy thu trong phương án sử dụng chiến lược phòng thủ cố định "greedy" ...	43
4.2.2.4. Kết luận mô phỏng so sánh DQN và chiến lược greedy	47
Kết luận	48

Danh sách hình vẽ

2.1. Mạng không dây cục bộ.	4
2.2. Mạng cảm biến không dây.	5
2.3. Mạng không dây tạm thời.	6
2.4. Sơ đồ mạch cho bộ giải mã tín hiệu tán xạ ngược.....	14
2.5. Tương tác giữa tác nhân và môi trường.....	15
2.6. Sơ đồ cập nhật thuật toán SARSA.	24
2.7. Sơ đồ cập nhật thuật toán Q-learning.....	25
3.1. Mô hình hệ thống.....	30
4.1. Tỷ lệ hội tụ giữa DQN và Q learning.	41
4.2. So sánh thông lượng trung bình giữa DQN và Greedy P_{avg} thay đổi.....	42
4.3. So sánh số gói tin mất mát giữa DQN và Greedy P_{avg} thay đổi.....	42
4.4. So sánh PDR giữa DQN và Greedy P_{avg} thay đổi.....	43
4.5. So sánh thông lượng trung bình giữa DQN và Greedy \hat{d}_t thay đổi.....	44
4.6. So sánh số gói tin mất mát giữa DQN và Greedy \hat{d}_t thay đổi.	44
4.7. So sánh PDR giữa DQN và Greedy \hat{d}_t thay đổi.	45
4.8. So sánh thông lượng trung bình giữa DQN và Greedy $T_{harvest}$ thay đổi.....	45
4.9. So sánh số gói tin mất mát giữa DQN và Greedy $T_{harvest}$ thay đổi.	46
4.10. So sánh PDR giữa DQN và Greedy $T_{harvest}$ thay đổi.	46

Các từ viết tắt

UAV: unmanned aerial vehicle – Thiết bị bay không người lái

LoS: line-of-sight – Đường truyền tầm nhìn thẳng

RL: reinforcement learning – Học tăng cường

DRL: deep reinforcement learning – Học tăng cường sâu.

DQN: deep q network – Mạng sâu Q.

HTT: harvest then transmit – Chiến lược thu năng lượng để truyền tin

RA: rate adaption – Kỹ thuật điều chỉnh tốc độ phát gói tin

PSR: packet send ratio – Tỷ lệ gói tin được máy phát gửi

PDR: packet delivery ratio – Tỷ lệ gói tin được gửi thành công đến máy thu

MAC: medium access control – Điều khiển truy nhập môi trường

WLAN: wireless local area network – Mạng cục bộ không dây

WSN: wireless sensor network – Mạng cảm biến không dây

FHSS: frequency hopping spread spectrum – Trải phổ nhảy tần

RA: rate adaption – Điều chỉnh tốc độ

RFID: radio frequency identification – Nhận dạng tần số vô tuyến

ATG: air-to-ground – Kênh truyền không đối đất

MDP: Markov decision process – Quá trình ra quyết định Markov

TD: Temporal Difference – Thuật toán học khác biệt thời gian

SGD: Stochastic Gradient Descent – Thuật toán giảm dần độ dốc ngẫu nhiên

Chương 1.

Đặt vấn đề

Truyền thông không dây là thành phần không thể thiếu trong cơ sở hạ tầng viễn thông của xã hội ngày nay, có các ứng dụng và tác động sâu rộng đến mọi mặt của đời sống con người. Mặc dù công nghệ truyền thông không dây đã có rất nhiều bước phát triển qua nhiều thập kỉ, hầu hết các mạng truyền thông không dây vẫn dễ bị tấn công gây nhiễu bởi tính mở của nó. Bằng cách đưa tín hiệu nhiễu vào kênh không dây đích, thiết bị gây nhiễu có thể làm giảm tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng nhiễu (SINR) của máy thu, qua đó làm gián đoạn hoặc ngăn chặn kênh truyền không dây hợp lệ. Không giống như những tác động không có chủ đích, tín hiệu gây nhiễu thường mạnh và qua đó có thể liên tục làm gián đoạn kênh truyền.

Gần đây, thiết bị bay không người lái (UAV) đang ngày càng được sử dụng nhiều hơn để nâng cao năng lực của hạ tầng mạng. Khả năng triển khai nhanh cùng với tính cơ động cao của UAV khiến nó phù hợp với rất nhiều nhiệm vụ, ví dụ như việc triển khai hệ thống mạng tạm thời ở những nơi khó tiếp cận như những vùng xảy ra thiên tai, bão lũ, v.v. UAV có thể cung cấp đường truyền LoS và hệ số suy giảm kênh truyền thấp đến người dùng trên mặt đất khi nó được sử dụng như một trạm phát sóng. Do đó UAV có thể được sử dụng để tăng cường năng lực của hệ thống mạng. Tuy nhiên chính những lợi thế của UAV như ở trên khiến cho nó có thể bị đối tượng xấu khai thác như là một thiết bị gây nhiễu di động, ngăn chặn đáng kể việc truyền dữ liệu và làm giảm chất lượng dịch vụ (QoS) của mạng không dây, nghiêm trọng hơn so với gây nhiễu từ trên mặt đất. Vì thế giải quyết vấn đề gây nhiễu từ UAV là một bài toán đáng quan tâm.

Trong khoá luận này, vấn đề tấn công gây nhiễu được tìm hiểu, cũng như vấn đề tấn công gây nhiễu từ UAV đối với mạng truyền thông không dây. Qua đó đề xuất một phương án để không những chống lại mà còn tận dụng cuộc tấn công gây nhiễu để đảm bảo chất lượng đường truyền không dây. Phần còn lại của khoá luận sẽ được chia thành các chương với nội dung cụ thể như sau:

Chương 2: Cơ sở lý thuyết, trong chương này trình bày lý thuyết nền tảng về tấn công gây nhiễu và tấn công gây nhiễu bằng UAV. Cũng như tìm hiểu một số chiến lược chống nhiễu đã được nghiên cứu. Sau đó sẽ đi vào tìm hiểu về RL và DRL - hai phương pháp được sử dụng để chống nhiễu.

Chương 3: Đề xuất phương án giải quyết bài toán tấn công gây nhiễu từ UAV. Trong chương này, bài toán chống lại cuộc tấn công gây nhiễu bằng UAV được mô hình hoá thành bài toán tối ưu và qua đó đề xuất một phương pháp chống nhiễu sử dụng DRL.

Chương 4: Thiết lập mô phỏng và kết quả mô phỏng. Trong chương này, chi tiết về mô hình bài toán cũng như thông số thiết lập mô phỏng phương pháp chống nhiễu được đề xuất sẽ được trình bày. Qua đó so sánh hiệu quả mà phương pháp đề xuất sử dụng DRL mang lại so với chiến lược phòng thủ ”tham lam” (greedy) không sử dụng DRL.

Phần kết luận: Tổng kết và rút ra kết luận.

Chương 2.

Cơ sở lý thuyết

Chương này trình bày lý thuyết nền tảng về truyền thông không dây, tấn công gây nhiễu mạng truyền thông không dây, phương pháp truyền thông tán xạ ngược môi trường, cũng như trình bày về thuật toán học tăng cường (RL) và học tăng cường sâu (DRL) - hai thuật toán sẽ được sử dụng trong bài toán chống nhiễu của mạng không dây.

2.1. Mạng không dây

2.1.1. Giới thiệu

Mạng không dây là một hệ thống mạng truyền tải dữ liệu mà không sử dụng các dây cáp kết nối vật lý. Thay vào đó, mạng không dây sử dụng sóng điện từ để truyền tín hiệu và dữ liệu giữa các thiết bị. Điều này giúp tăng tính di động của thiết bị, vốn là điểm yếu của các kết nối của các kết nối có dây. Phương pháp gửi dữ liệu thông qua môi trường không khí này được ứng dụng vô cùng sâu rộng trong mọi lĩnh vực đời sống con người ngày nay, từ công sở, trường học hoặc thậm chí là trong quân sự, v.v.

Dữ liệu nhận và gửi của mạng không dây được truyền đi xuyên suốt thông qua các tầng ảo sau:

- **Tầng vật lý:** Là tầng thể hiện đặc điểm của kết nối vật lý giữa các thiết bị trong mạng, trong trường hợp mạng không dây, môi trường truyền là không khí. Quá trình nhận và truyền dữ liệu được quản lý bởi tầng vật lý. Trong mạng không dây, dữ liệu nhị phân giữa các thiết bị được chuyển thành tín hiệu điện và sử dụng tần số vô tuyến để gửi và nhận dữ liệu, tất cả quá trình này được thực hiện bởi tầng vật lý. Đây cũng là tầng chịu thiệt hại nặng nề nhất từ cuộc tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến.
- **Tầng liên kết dữ liệu:** Là tầng ở giữa, chịu trách nhiệm kết nối giữa tầng vật lý và tầng mạng, ngoài ra còn thực hiện phân đoạn các gói được gửi bởi các tầng cao hơn thành các khung có thể được gửi bởi tầng vật lý. Tầng này cũng cung cấp khả năng kiểm tra lỗi và định dạng các khung dữ liệu được gửi. Tầng con MAC của tầng liên kết dữ liệu chịu trách nhiệm di chuyển các gói dữ liệu đến và đi từ nút này sang nút khác trên một kênh chung. Kênh truyền trong mạng không dây là một tần số mà các nút sử dụng để gửi dữ liệu. Tầng con MAC sử dụng giao thức MAC để đảm bảo tín hiệu gửi từ các trạm khác nhau trên cùng một kênh truyền không bị xung đột. Tầng này dễ bị tấn công gây nhiễu tầng liên kết dữ liệu - các thiết bị gây nhiễu tinh vi có thể tận dụng lợi thế của tầng liên kết dữ liệu và tạo ra cuộc tấn

công hiệu quả về mặt năng lượng. So với tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến ở tầng vật lý, gây nhiễu tầng liên kết dữ liệu tối ưu hơn về mặt năng lượng.

- **Tầng mạng:** Hoạt động như một liên kết giữa tầng giao vận ở trên và tầng liên kết dữ liệu ở dưới. Chịu trách nhiệm tìm ra cấu trúc mạng và gán địa chỉ, cũng như định tuyến dữ liệu.
- **Tầng giao vận:** Khôi phục dữ liệu bị mất và cũng chịu trách nhiệm truyền lại dữ liệu. Cung cấp khả năng mã hoá dữ liệu và truyền dữ liệu đáng tin cậy.
- **Tầng ứng dụng:** Tầng này chịu trách nhiệm xác định thông số kỹ thuật của dữ liệu được yêu cầu bởi cả người dùng cuối cũng như các nút trong mạng.

2.1.2. Phân loại mạng không dây và ứng dụng

- **WLAN:** mạng không dây cục bộ, hay còn được biết đến nhiều hơn là Wi-Fi. WLAN cho phép thiết bị kết nối với Internet dễ dàng miễn là nó được kết nối với sóng Wi-Fi. WLAN được sử dụng ở rất nhiều nơi xung quanh chúng ta ngày nay, từ hộ gia đình, trường học, công sở, địa điểm kinh doanh, v.v. Thiết bị di động kết nối với điểm truy cập thông qua kết nối không dây sẽ có thể kết nối Internet và di chuyển một cách tự do, miễn là thiết bị đó ở trong tầm phủ sóng của sóng Wi-Fi.

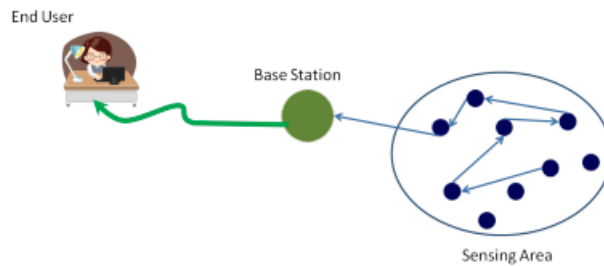
Hình 2.1 mô tả một mạng không dây cục bộ với một điểm truy cập và bốn thiết bị kết nối thông qua môi trường không dây.



Hình 2.1. Mạng không dây cục bộ.

- **WSN:** Mạng cảm biến không dây, là một tập hợp số lượng lớn các nút có khả năng thu thập dữ liệu từ môi trường xung quanh và truyền tải thông tin về trung tâm xử lý dữ liệu hoặc các thiết bị thu thập dữ liệu. Trong WSN, các nút có thể chia sẻ thông tin cho nhau, dữ liệu thu thập từ các cảm biến không được gửi trực tiếp cho người dùng mà được xử lý và tổng hợp lại, chỉ gửi những thông tin mục tiêu mà mạng

cảm biến muốn đạt được. Do đó những dữ liệu tạm thời, không cần thiết, chưa qua xử lý hoặc dữ liệu trung gian giữa các nút sẽ không được gửi tới người dùng.



Hình 2.2. Mạng cảm biến không dây.

Mạng cảm biến không dây có một số ứng dụng sau:

- + Sử dụng trong lĩnh vực an ninh như giám sát ở các khu vực nhạy cảm để phát hiện các mối đe dọa như tấn công sinh học hoặc hoá học, v.v.
 - + Giám sát môi trường: WSN hỗ trợ thu thập thông tin ở những khu vực khó thiết lập cơ sở hạ tầng để giám sát môi trường cũng như môi trường sống.
 - + Trong y học: sử dụng để giúp các bác sĩ theo dõi sức khoẻ của bệnh nhân.
 - + Theo dõi đối tượng: WSN có thể dùng để theo dõi các đối tượng chuyển động nếu sử dụng cảm biến phù hợp.
 - + Hỗ trợ người khuyết tật: Người khuyết tật có thể độc lập hơn và cải thiện khả năng hoạt động với việc sử dụng WSN, WSN cho phép tự chăm sóc hiệu quả hơn và nâng cao chất lượng cuộc sống.
- **Mạng không dây tạm thời (ad hoc):** là mạng không dây không cần bất kì cơ sở hạ tầng hiện có nào để triển khai ví dụ như điểm truy cập hoặc dây cáp. Mỗi thiết bị trong mạng coi là một nút tham gia trực tiếp vào việc định tuyến dữ liệu một cách độc lập bằng cách chuyển tiếp dữ liệu từ nút này sang nút khác mà không cần thêm bất kì một thiết bị quản lý tập trung nào như điểm truy cập, v.v. Mỗi nút trong mạng không dây tạm thời tự động quyết định nút nào sẽ gửi dữ liệu tiếp theo tùy thuộc vào kết nối mạng. Hình 2.3 là một mô hình đơn giản của mạng không dây tạm thời giữa các thiết bị kết nối với nhau mà không có điểm truy cập nào.

Ứng dụng của mạng không dây tạm thời:

- + Trong quân sự: người lính, các thiết bị quân sự như xe tăng, tàu chiến có thể kết nối với nhau mà không cần một cơ sở hạ tầng mạng không dây rõ ràng bằng cách hình thành một mạng không dây tạm thời.
- + Mạng không dây tạm thời có thể được sử dụng trong các nhiệm vụ thực thi pháp luật, giải cứu, v.v.



Hình 2.3. Mạng không dây tạm thời.

- + Có thể được sử dụng trong hội nghị, cuộc họp, bài giảng hoặc các khu vực phục vụ mục đích thương mại, nơi tải mạng có thể rất cao.

2.2. Tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến

Trong mạng truyền thông không dây, đặc tính mở của môi trường truyền, cụ thể ở đây mạng không dây sử dụng không khí là môi trường truyền để truyền và nhận dữ liệu, dẫn đến việc nó rất dễ bị tấn công bởi nhiều kiểu tấn công khác nhau. Ở đây chúng ta nghiên cứu cụ thể loại tấn công mạng không dây bằng gây nhiễu sóng vô tuyến.

2.2.1. Giới thiệu

Tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến được định nghĩa là một hành động cố tình can thiệp vào quá trình truyền và nhận vật lý của truyền thông không dây. Trong đó kẻ tấn công (máy gây nhiễu) sẽ phát tín hiệu vô tuyến trên cùng băng tần mà mạng mục tiêu sử dụng. Mục tiêu của việc tấn công là làm giảm hiệu suất mạng hoặc thậm chí ngăn chặn hoàn toàn việc truyền thông tin không dây giữa các thiết bị.

Trong cuộc tấn công gây nhiễu, máy gây nhiễu đưa năng lượng gây nhiễu vào môi trường không dây, gây cản trở việc truyền tải hợp pháp theo một trong hai cách:

- Máy gây nhiễu gửi tín hiệu nhiễu mạnh gây giảm tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng với nhiễu (SINR) ở máy thu.
- Gây nhiễu liên tục ngăn cản việc máy phát truy cập vào kênh truyền, dẫn đến một cuộc tấn công từ chối dịch vụ (DOS). Tấn công từ chối dịch vụ thực hiện bằng cách gửi tín hiệu nhiễu, gói tin giả khiến kênh truyền hợp lệ bận, làm cho máy phát ngừng gửi bất kỳ dữ liệu nào cho đến khi kênh truyền khả dụng trở lại.

Tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến có một số đặc điểm sau đây:

- **Cố ý:** Đây là hành động gây nhiễu có chủ đích của kẻ tấn công, nhằm vào một mục tiêu cụ thể, không giống với nhiễu tự nhiên gây ra bởi các yếu tố của môi trường.
- **Không tuân thủ các giao thức MAC:** đặc điểm chung của các cuộc tấn công gây nhiễu là việc liên lạc của chúng không tuân theo các giao thức MAC.
- **Phạm vi tấn công:** Máy gây nhiễu có thể nhắm vào một tần số cố định hoặc nhiều tần số khác nhau.

2.2.2. Thông số đánh giá một cuộc tấn công gây nhiễu

Trong tấn công gây nhiễu sóng vô tuyến, các thông số sau phản ánh tác động của cuộc tấn công đến mạng không dây.

- **SINR:** tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng nhiễu là tỉ số giữa công suất của tín hiệu máy phát so với tín hiệu gây nhiễu như tín hiệu từ máy gây nhiễu và nhiễu môi trường trong kênh truyền:

$$\theta = \frac{P_R}{\varphi P_J + \rho^2} \quad (1)$$

trong đó, P_R là công suất nhận được từ máy phát tại cổng (máy thu), P_J là công suất nhiễu được phát của máy gây nhiễu, ρ^2 là phương sai của nhiễu Gauss trắng cộng thêm. φP_J là công suất nhiễu tại cổng, trong đó $0 \leq \varphi \leq 1$ là hệ số suy giảm kênh truyền.

Có thể thấy tín hiệu nhiễu càng mạnh càng làm giảm giá trị SINR ở máy thu, khiến cho tỉ lệ lỗi bit (BER) tăng, gây lỗi khi giải mã gói tin ở máy thu, làm giảm thông lượng và độ tin cậy của kết nối giữa máy phát và máy thu.

- **Thông lượng:** được định nghĩa là tốc độ trung bình gửi gói tin thành công thông qua kênh truyền, được tính thông qua công thức Shannon:

$$C = B \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (2)$$

trong đó, C là dung lượng kênh hoặc thông lượng lý thuyết tối đa (bit/s), B là băng thông của kênh (Hz). Ta có thể nhận thấy thông qua công thức này, thông lượng của kênh giảm khi có sự xuất hiện của tín hiệu gây nhiễu làm giảm chỉ số SINR.

- **PSR:** đại diện cho tỉ lệ giữa gói tin thực sự được gửi thành công bởi máy phát và số gói tin mà máy phát dự định gửi. Nếu máy phát có ý định gửi n gói tin và máy thu chỉ nhận được m gói tin ($m \leq n$) thì PSR được tính như sau:

$$PSR = \frac{m}{n} \quad (3)$$

Số gói tin bị mất so với gói tin dự định gửi là do nhiễu. Tín hiệu nhiễu khiến cho kênh truyền luôn bận khiến máy phát không thể truyền gói tin đến máy thu, dẫn đến gói tin mới đến máy phát bị loại bỏ do hàng đợi gói tin của máy phát đầy, hoặc

gói tin bị loại do ở quá lâu trong hàng đợi. Các giao thức MAC khác nhau có cách xác định kênh truyền đang bận hay không khác nhau, một trong số đó là nếu cường độ tín hiệu của kênh lớn hơn ngưỡng xác định trước, kênh sẽ được xác định là bận.

- **PDR**: là tỉ lệ số gói tin được gửi thành công đến máy thu so với số gói tin được máy phát gửi đi. Sau khi gói tin được máy phát gửi, máy thu vẫn có thể không giải mã được gói tin do ảnh hưởng của nhiễu, dẫn đến gói tin gửi không thành công. PDR có thể được tính ở máy thu bằng tỉ lệ giữa số gói tin nhận được và số gói tin vượt qua được kiểm tra CRC - là kĩ thuật phát hiện lỗi thường được dùng trong mạng truyền thông.

Giả sử n là số gói tin máy thu nhận được và q là số gói tin vượt qua kiểm tra CRC thì:

$$PDR = \frac{q}{n} \quad (4)$$

Ngoài ra PDR còn có thể được tính ở máy phát bằng số gói tin ACK mà máy phát nhận được từ máy thu. Trong cả 2 trường hợp, nếu không có gói tin nào nhận thành công ở máy thu, PDR được xác định là 0.

2.2.3. Các mô hình tấn công gây nhiễu

Có rất nhiều chiến lược tấn công khác nhau mà máy gây nhiễu có thể thực hiện để làm nhiễu mạng không dây. Do đó cũng dẫn đến nhiều mô hình tấn công với nhiều mức độ hiệu quả khác nhau. Tuy nhiên sau đây là một số mô hình gây nhiễu đã chứng minh được tính hiệu quả trong việc làm gián đoạn kết nối mạng không dây.

- **Máy gây nhiễu liên tục**: thiết bị gây nhiễu liên tục phát ra tín hiệu vô tuyến mà không có sự gián đoạn. Tín hiệu nhiễu phát ra có thể là sóng điện từ đơn giản hoặc thậm chí là các bit dữ liệu. Sóng điện từ hoặc các bit dữ liệu được máy gây nhiễu phát ra này không tuân theo bất kì giao thức hoặc quy tắc nào mà các nút trong mạng tuân theo. Kiểu máy gây nhiễu này làm giảm PDR bằng cách làm hỏng các bit tại máy thu, khiến máy thu không thể giải mã dữ liệu. Nó cũng có thể làm giảm PSR bằng cách giữ cho kênh truyền giữa máy phát và máy thu liên tục bận, ngăn chặn việc máy phát sử dụng đường truyền hợp lệ để truyền gói tin đến máy thu.⁷
- **Máy gây nhiễu lừa đảo**: loại máy gây nhiễu này rất giống với máy gây nhiễu liên tục do cùng liên tục truyền tín hiệu hoặc dữ liệu qua mạng. Tuy nhiên điểm khác biệt là máy gây nhiễu lừa đảo không truyền các bit dữ liệu ngẫu nhiên. Máy gây nhiễu giả mạo liên tục đưa các gói tin vào mạng mà không có bất kì khoảng cách nào giữa các lần truyền, và do dữ liệu không phải là các bit ngẫu nhiên, do đó khiến cho nút mạng tin rằng những bit dữ liệu này là hợp lệ và do đó không sử dụng đường truyền nữa. Ví dụ máy gây nhiễu có thể gửi gói tin ACK giả mạo để khiến máy phát tin rằng nó đã truyền dữ liệu thành công.

- **Máy gây nhiễu ngẫu nhiên:** hai kiểu máy gây nhiễu ở trên luôn luôn duy trì việc truyền tín hiệu hoặc dữ liệu vào mạng, dẫn đến việc nó không hiệu quả về mặt năng lượng và phải kết nối với nguồn năng lượng bên ngoài khiến nó hạn chế khả năng di chuyển. Máy gây nhiễu ngẫu nhiên mặt khác có chu kỳ ngủ và chu kỳ gây nhiễu, cả hai chu kỳ có thể tuân theo một phân phối xác suất hoặc có thể hoàn toàn là ngẫu nhiên. Việc có cả hai trạng thái ngủ và gây nhiễu khiến máy gây nhiễu có thể tắt tín hiệu gây nhiễu qua đó tiết kiệm năng lượng trong giai đoạn ngủ và hoạt động như bất kỳ máy gây nhiễu nào trong hai máy gây nhiễu đã thảo luận ở trên trong chu kỳ gây nhiễu của nó.
- **Máy gây nhiễu phản ứng:** ba mô hình gây nhiễu ở trên là ba mô hình gây nhiễu chủ động theo nghĩa là chúng luôn chủ động tấn công kênh truyền bất kể lưu lượng qua kênh như thế nào. Gây nhiễu chủ động thường hiệu quả vì chúng khiến kênh truyền luôn bận rộn, tuy nhiên lại có nhược điểm là dễ bị phát hiện. Một cách tiếp cận khác so với gây nhiễu chủ động là gây nhiễu phản ứng, tức là không cần thiết phải tấn công kênh truyền khi không có lưu lượng trên đường truyền. Thay vào đó máy gây nhiễu phản ứng sẽ không hoạt động khi kênh truyền rảnh rỗi, và bắt đầu phát tín hiệu gây nhiễu ngay khi nó cảm nhận được hoạt động truyền phát tín hiệu trên kênh. Do đó nó nhắm vào việc nhận tin nhắn. Thiết bị gây nhiễu phản ứng có thể không tối ưu về mặt năng lượng do nó phải liên tục lắng nghe để cảm nhận kênh truyền. Tuy nhiên nó khó bị phát hiện hơn gây nhiễu chủ động.

2.3. Tấn công gây nhiễu bằng UAV

Trong phần này, chúng ta cùng xem xét về mô hình kênh truyền không đối đất (ATG) giữa UAV và thiết bị trên mặt đất, qua đó đưa ra một số cơ sở lý thuyết về bài toán tấn công gây nhiễu bằng UAV.

Xem xét một UAV gây nhiễu, thiết bị I nằm trên mặt đất chịu tác động của tín hiệu nhiễu UAV, kênh liên lạc giữa UAV và thiết bị I được mô hình hoá là kênh không đối đất ATG, bao gồm ba thành phần là:

- Đường truyền tầm nhìn thẳng LoS: không có vật cản giữa UAV và thiết bị
- Đường truyền không tầm nhìn thẳng NLoS: tín hiệu không thể đi thẳng giữa UAV và thiết bị vì có vật cản như cây cối, toà nhà, địa hình, v.v.
- Pha đình quy mô nhỏ (small-scale fading): là sự biến động tín hiệu nhanh chóng do hiện tượng đa đường, gây ra các thay đổi về cường độ tín hiệu khi môi trường thay đổi, v.v.

Về cơ bản, tác động của pha đình quy mô nhỏ nhỏ hơn nhiều so với LoS và NLoS, do đó yếu tố này bị bỏ qua. Suy hao đường truyền của kênh không đối đất giữa UAV và

thiết bị I được tính như sau:

$$PL = \begin{cases} \beta_{\text{LoS}}|d|^{-\alpha}, & \text{với đường truyền LoS} \\ \beta_{\text{NLoS}}|d|^{-\alpha}, & \text{với đường truyền NLoS} \end{cases} \quad (5)$$

trong đó, β_{LoS} và β_{NLoS} lần lượt là hệ số suy giảm bổ sung của kênh truyền LoS và NLoS, d là khoảng cách giữa UAV và thiết bị I, α là hệ số suy hao đường truyền của kênh ATG.

Xác suất của kết nối LoS, phụ thuộc vào góc nâng θ_i giữa thiết bị I và UAV, môi trường truyền thông, mật độ xây dựng xung quanh và chiều cao H_J của UAV, có thể được biểu diễn như sau:

$$P_{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + \Phi \exp(-\Psi[\theta_i - \Phi])} \quad (6)$$

trong đó, Φ và Ψ là các tham số của đường cong chữ S, phụ thuộc vào môi trường truyền, ví dụ $\Phi = 150$ và $\Psi = 15$ là các giá trị thường được sử dụng trong môi trường đô thị, góc θ_i được tính như sau:

$$\theta_i = \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{H_J}{d}\right) \quad (7)$$

Xác suất của kết nối NLoS là $P_{\text{NLoS}} = 1 - P_{\text{LoS}}$. Do đó giá trị kì vọng của công suất nhiễu của UAV gây ra ở thiết bị I là:

$$P_{\text{ji}} = P_J P_{\text{LoS}} \beta_{\text{LoS}} |d|^{-\alpha} + P_J P_{\text{NLoS}} \beta_{\text{NLoS}} |d|^{-\alpha} \quad (8)$$

trong đó, P_J là công suất của UAV gây nhiễu.

Nhận thấy rằng khi UAV di chuyển, khoảng cách d và góc nâng θ_i giữa UAV và thiết bị I thay đổi, dẫn đến sự thay đổi cường độ nhiễu tại thiết bị I. Điều này khiến cho tác động của nhiễu UAV lên thiết bị I thay đổi do tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu cộng nhiễu SINR thay đổi.

2.4. Kỹ thuật chống nhiễu

Có nhiều biện pháp đối phó khác nhau để ngăn chặn và giảm thiểu tác động của các cuộc tấn công gây nhiễu, sau đây là một số biện pháp.

2.4.1. Điều chỉnh công suất phát

Đây là cách tiếp cận đơn giản và phổ biến nhất, cụ thể máy phát có thể quyết định phát ở mức công suất thấp để khiến máy gây nhiễu khó khăn hơn trong việc phát hiện

tín hiệu truyền phát. Cách tiếp cận này chỉ khả thi trong việc đối phó với máy gây nhiễu phản ứng và khiến hiệu suất truyền tải giảm xuống rõ rệt. Ngoài ra máy phát có thể lựa chọn tăng công suất phát để lấn át tín hiệu nhiễu ở máy thu, tuy nhiên cách này tốn nhiều năng lượng và không hiệu quả nếu máy gây nhiễu tấn công với mức năng lượng rất lớn.

2.4.2. Trải phổ nhảy tần - FHSS

Trải phổ là kỹ thuật điều chế giúp trải rộng dữ liệu trên toàn bộ băng tần, mặc dù không cần toàn bộ băng tần để gửi dữ liệu đó. Việc trải rộng dữ liệu vượt quá giới hạn cần thiết trên toàn bộ băng tần giúp cho tín hiệu có khả năng chống lại nhiễu.

FHSS là một kỹ thuật trải phổ, trong đó tín hiệu phát chuyển đổi nhanh chóng giữa các kênh tần số. Việc thay đổi kênh được thực hiện bằng thuật toán được chia sẻ giữa máy phát và máy thu trước khi trao đổi dữ liệu. Khi kênh hiện tại bị tấn công, máy phát có thể chuyển sang kênh liên lạc khác để truyền dữ liệu. Nhiều chiến lược tối ưu khác nhau nhằm tối đa hoá thông lượng có thể được sử dụng để máy phát chọn tần số để nhảy khi bị tấn công gây nhiễu như học Q hoặc học sâu Q, hoặc áp dụng lý thuyết trò chơi, v.v. Tuy nhiên điểm yếu của FHSS là kỹ thuật này đòi hỏi nhiều tài nguyên phổ tần hơn để nhảy tần và tránh máy gây nhiễu, nếu máy gây nhiễu đủ mạnh để tấn công nhiều kênh truyền đồng thời thì FHSS trở nên kém hiệu quả hơn.

2.4.3. Kỹ thuật điều chỉnh tốc độ - Kỹ thuật RA

Kỹ thuật điều chỉnh tốc độ cung cấp một cơ chế quan trọng cho hệ thống không dây đánh đổi giữa tốc độ dữ liệu ở tầng vật lý và độ bền vững của hệ thống (khả năng duy trì hiệu suất và độ ổn định của mạng ngay cả trong môi trường bất lợi) nhằm tối đa hoá hiệu suất. RA được coi là cơ chế của tầng MAC và nhiều giải thuật điều chỉnh tốc độ được nghiên cứu, hầu hết dựa trên thông tin của tầng MAC, ví dụ như lựa chọn tốc độ phát dựa trên số khung bị mất. Giả thiết là khi số khung bị mất tăng lên, có nghĩa là kênh truyền đang suy giảm chất lượng, và máy phát nên giảm tốc độ dữ liệu vật lý bằng cách sử dụng sơ đồ điều chế hoặc mã hoá mạnh mẽ hơn. Tuy nhiên trong trường hợp khung bị mất do nhiễu thay vì suy giảm kênh, việc giảm tốc độ truyền có thể thậm chí gây ra tỉ lệ mất mát cao hơn do kéo dài thời gian truyền của khung.

Trong môi trường bị tấn công, ý tưởng chính của kỹ thuật RA là chủ động hoặc thích ứng điều chỉnh tốc độ phát xuống mức thấp hơn. Về cơ bản, RA sử dụng thuật toán điều chỉnh tốc độ để lựa chọn tốc độ phát phù hợp dựa trên điều kiện hiện tại của kênh. Do đó, RA có thể giúp tăng độ tin cậy của đường truyền và vẫn cung cấp thông lượng trên kênh trong trường hợp bị nhiễu tấn công. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng kỹ thuật RA không hiệu quả trên một kênh đơn, và nó cũng không hiệu quả để đối phó với một cuộc tấn công thông minh.

2.5. Tán xạ ngược môi trường xung quanh

2.5.1. Giới thiệu

Tán xạ ngược môi trường xung quanh là một kỹ thuật truyền thông cho phép hai thiết bị có thể truyền dữ liệu cho nhau nhờ việc tận dụng tín hiệu tần số vô tuyến từ môi trường xung quanh. Tín hiệu môi trường xung quanh là những tín hiệu có sẵn trong môi trường như tín hiệu nhiễu, tín hiệu truyền hình, tín hiệu di động.

So với liên lạc vô tuyến truyền thống, kỹ thuật tán xạ ngược này cho phép truyền thông tin mà không cần các quá trình tiêu hao nhiều năng lượng như tạo ra sóng vô tuyến, do đó nó có mức độ tiết kiệm năng lượng cao hơn.

So với kỹ thuật tán xạ ngược truyền thống, ví dụ như RFID hoạt động theo nguyên lý sau: đầu đọc RFID sẽ truyền các tín hiệu công suất cao (1W) đến các thiết bị lân cận như thẻ RFID thụ động - không có pin và hoạt động dựa trên việc thu năng lượng từ tín hiệu của đầu đọc RFID, sau đó tán xạ tín hiệu này để gửi thông tin đến đầu đọc RFID, đầu đọc sau đó sẽ giải mã tín hiệu tán xạ này để trích xuất dữ liệu. So với kỹ thuật RFID này thì tán xạ ngược môi trường xung quanh có một số điểm ưu việt hơn. Thứ nhất, do tận dụng tín hiệu trong môi trường nên nó không cần phải có thêm cơ sở hạ tầng cung cấp năng lượng như đầu đọc RFID cung cấp năng lượng cho các thiết bị lân cận thông qua việc phát tín hiệu công suất cao. Điều này giúp giảm chi phí lắp đặt và bảo trì, thứ khiến cho hệ thống như RFID khó khăn nếu triển khai ở những môi trường ngoài trời hoặc trải rộng trên một không gian rộng lớn. Thứ hai, tác động của nó với môi trường rất nhỏ do nó không tiêu thụ thêm nguồn năng lượng nào ngoài năng lượng có sẵn trong không khí. Cuối cùng nó cung cấp khả năng liên lạc trực tiếp giữa các thiết bị, không giống như hệ thống RFID mà các thẻ cần giao tiếp riêng với đầu đọc và không thể cảm nhận được sự truyền tải của các thẻ lân cận.

2.5.2. Mô tả nguyên lý hoạt động

2.5.2.1. Quá trình truyền gói tin ở máy phát

Thiết kế của máy phát trong tán xạ ngược môi trường xung quanh dựa trên kỹ thuật truyền thông tán xạ ngược thông thường. Về cơ bản, tán xạ ngược đạt được bằng cách thay đổi trở kháng của ăng ten. Theo trực giác, khi sóng gặp ranh giới giữa hai môi trường có trở kháng hoặc mật độ khác nhau thì sóng bị phản xạ trở lại. Điều này đúng cho dù là trong trường hợp sóng cơ truyền qua một sợi dây treo vào một điểm cố định trên tường hay sóng điện từ khi gặp ăng ten. Bằng cách điều chỉnh trở kháng của ăng ten, người ta có thể điều chỉnh năng lượng sóng RF đến bị tán xạ, từ đó cho phép truyền thông tin. Máy phát sẽ điều chế và phản xạ tín hiệu vô tuyến xung quanh hoặc tín hiệu gây nhiễu bằng cách sử dụng bộ điều biến tải. Đầu vào của bộ điều biến tải là một chuỗi các bit 0,1 được tạo ra dựa theo gói tin, khi bit đầu vào là 0, bộ điều biến tải thay đổi trở kháng thành Z_1 và do đó máy phát ở trạng thái không phản xạ. Khi bit đầu vào là 1, bộ điều

biến tải thay đổi trở kháng thành Z_2 qua đó máy phát ở trạng thái phản xạ. Bằng cách này, máy phát có thể tán xạ ngược gói tin đến máy thu. Lưu ý là trong khi thực hiện tán xạ ngược, máy phát còn có thể thu năng lượng (ở trạng thái không phản xạ) nhưng lượng năng lượng thu được là tương đối nhỏ và chỉ đủ dùng cho các hoạt động của mạch tán xạ ngược.

2.5.2.2. Quá trình giải mã gói tin ở máy thu

Để máy thu có thể giải mã tín hiệu tán xạ ngược thông tin với tốc độ thấp hơn tín hiệu môi trường xung quanh (cụ thể là tín hiệu gây nhiễu và tín hiệu môi trường xung quanh). Quá trình giải mã có thể được mô tả như sau. Giả sử chúng ta có một bộ thu kỹ thuật số lấy mẫu tín hiệu ở tốc độ thông tin Nyquist (giả sử dùng ADC), tín hiệu nhận được ở máy thu được lấy mẫu thành $y[n]$ như sau:

$$y[n] = x[n] + \alpha B[n]x[n] + w[n] \quad (9)$$

trong đó, $x[n]$ là mẫu của tín hiệu môi trường xung quanh (có thể là tín hiệu gây nhiễu) nhận được ở máy thu, $w[n]$ là nhiễu môi trường, α là sự suy giảm phức tạp của tín hiệu tán xạ ngược, $B[n]$ là các bit dữ liệu được truyền bởi máy phát. Nếu máy phát truyền thông tin với tốc độ một phần nhỏ, giả sử là $\frac{1}{N}$ dẫn đến $B[Ni + j]$ bằng nhau với $j \in 1 \rightarrow N$. Sau đó máy thu tính công suất trung bình của N mẫu nhận được như sau:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x[n] + \alpha Bx[n] + w[n]|^2 \quad (10)$$

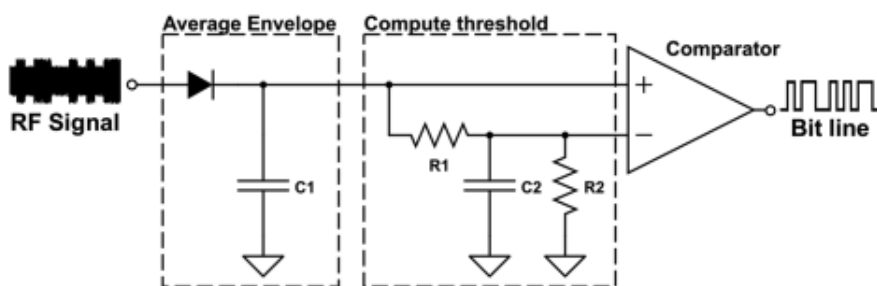
với B nhận giá trị 0 hoặc 1 tùy thuộc vào trạng thái không phản xạ hoặc phản xạ. Do $x[n]$ không tương quan với nhiễu $w[n]$ nên công thức bên trên có thể được viết lại như sau:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y[n]|^2 = \frac{|1 + \alpha B|^2}{N} \sum_{i=1}^N |x[n]|^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |w[n]|^2 \quad (11)$$

Kí hiệu $P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x[n]|^2$ là công suất trung bình của tín hiệu gây nhiễu nhận được (hoặc tín hiệu xung quanh). Bỏ qua nhiễu môi trường, công suất trung bình nhận được ở máy thu là $|1 + \alpha|^2 P$ và P khi máy phát ở trạng thái phản xạ ($B = 1$) và không phản xạ ($B = 0$) tương ứng. Dựa trên sự khác biệt giữa $|1 + \alpha|^2 P$ và P , máy thu có thể giải mã dữ liệu được gửi từ máy phát.

Tuy nhiên sử dụng ADC để lấy mẫu tín hiệu ở máy thu tiêu tốn nhiều năng lượng. Hình sau đây mô tả một sơ đồ mạng chỉ sử dụng các thành phần tương tự để giải mã tín hiệu tán xạ ngược.

Cụ thể ở bộ giải mã trong Hình 2.4, tín hiệu tán xạ ngược đầu tiên được làm mịn bởi mạch "Average Envelope". Sau đó mạch "Compute threshold" xuất ra điện áp thấp và cao của tín hiệu được làm mịn. Sau đó bộ so sánh "Comparator" so sánh tín hiệu với các ngưỡng được xác định trước để lấy ra các bit 0, 1 một cách chính xác.



Hình 2.4. Sơ đồ mạch cho bộ giải mã tín hiệu tán xạ ngược

2.6. Học tăng cường

2.6.1. Giới thiệu

Học tăng cường là quá trình học xem nên làm gì, là quá trình học để kết nối giữa trạng thái và hành động nhằm mục đích tối đa hoá một giá trị phần thưởng số học. Đối tượng học sẽ không được chỉ cụ thể là nên thực hiện hành động nào, thay vào đó phải tự mình khám phá những hành động nào mang lại phần thưởng cao nhất bằng cách thử chúng. Hành động của đối tượng không chỉ mang lại phần thưởng ngay lập tức mà còn ảnh hưởng đến những trạng thái tiếp theo, dẫn đến những phần thưởng tiếp theo. Hai đặc tính thử-sai và những giá trị phần thưởng đến sau là hai đặc điểm nổi bật nhất của học tăng cường.

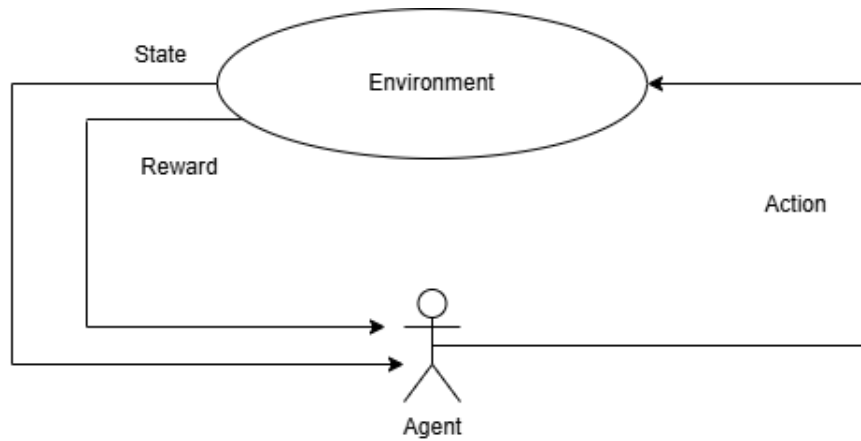
Học tăng cường là một nhánh của học máy, tuy nhiên nó khác biệt so với học có giám sát - là nhánh học máy được nghiên cứu nhiều nhất. Học có giám sát học từ một tập dữ liệu đào tạo đã được gán nhãn bởi một người giám sát có kiến thức. Mỗi dữ liệu trong tập đào tạo bao gồm mô tả về tình huống và một nhãn chỉ ra hành động đúng mà hệ thống cần thực hiện trong tình huống đó. Mục tiêu là hệ thống có thể tổng quát từ các ví dụ huấn luyện và đưa ra được dự đoán chính xác trong các tình huống mới không có trong tập dữ liệu đào tạo. Tuy nhiên học có giám sát lại không phù hợp với bài toán tương tác, do môi trường đôi khi không rõ ràng, có nhiều yếu tố không đoán trước khiến việc thu thập dữ liệu về hành vi mong muốn là rất khó khăn, không thể thu thập đủ dữ liệu đại diện cho tất cả tình huống mà tác nhân phải hành động. Học tăng cường cũng khác so với học không giám sát - là loại hình học tập giúp tìm ra cấu trúc ẩn trong cái tập dữ liệu chưa gán nhãn. Học tăng cường không thể được coi là một dạng của học không giám sát dù nó cũng không dựa vào những dữ liệu có trước về hành vi đúng đắn, tuy nhiên học tăng cường có mục tiêu là tối đa giá trị phần thưởng, thay vì tìm ra cấu trúc ẩn.

Trong học tăng cường, một vấn đề cần giải quyết là yếu tố đánh đổi giữa khám phá và khai thác. Để tác nhân có thể lấy được nhiều phần thưởng, cách tốt nhất là nó sẽ ưu tiên những hành động đã thử trong quá khứ và giành được nhiều giá trị phần thưởng. Tuy nhiên, để tìm được những hành động này, tác nhân cần thử những hành động mà nó chưa từng chọn trước đây. tác nhân cần khai thác những hành động tốt trong quá khứ,

nhưng cũng cần khám phá các hành động mới để tìm được những hành động tốt hơn trong tương lai.

2.6.2. Quá trình ra quyết định Markov - MDP

MDP là mô hình toán học dùng để mô tả môi trường cho bài toán học tăng cường. MDP là dạng hình thức cổ điển của việc ra quyết định theo chuỗi, hành động đưa ra không chỉ ảnh hưởng đến giá trị phần thưởng tức thì mà còn quan tâm đến những tình huống, trạng thái tiếp theo, và những phần thưởng trong tương lai. Đối tượng ra quyết định là tác nhân, thứ mà nó tương tác là môi trường. Khi tác nhân thực hiện một hành động, môi trường phản ứng với hành động đó, thay đổi trạng thái và trả lại một số đại diện cho giá trị phần thưởng, thứ mà tác nhân sẽ tìm cách tối đa hoá theo thời gian thông qua cách nó lựa chọn các hành động.



Hình 2.5. Tương tác giữa tác nhân và môi trường.

Một tính chất quan trọng của MDP là: "Tương lai độc lập với quá khứ khi biết hiện tại". Khi trạng thái hiện tại được xác định, những thông tin thu được trong quá khứ sẽ không còn quan trọng để dự đoán hành động tiếp theo. Tương lai chỉ phụ thuộc vào hiện tại chứ không phụ thuộc vào cách hệ thống đạt được trạng thái hiện tại trong quá khứ. Về mặt toán học, một trạng thái S_t có tính chất Markov khi và chỉ khi:

$$P(s_{t+1}|s_t) = P(s_{t+1}|s_t, s_{t-1}, \dots, s_1) \quad (12)$$

MDP mô hình hoá một môi trường trong đó tất cả trạng thái có tính chất Markov. MDP được mô hình hoá gồm một bộ $(\mathcal{S}, \mathcal{A}, P, r, \gamma)$ trong đó:

- \mathcal{S} là không gian trạng thái: bao gồm tất cả trạng thái của hệ thống.
- \mathcal{A} là không gian hành động: bao gồm tất cả hành động của tác nhân.
- P là hàm xác suất chuyển đổi trạng thái $P := \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$, biểu thị xác suất mà hệ thống chuyển từ trạng thái này đến trạng thái tiếp theo khi thực hiện một hành động cụ thể.

- r là hàm giá trị phần thưởng $r := \mathcal{S} \times \mathcal{A} \times \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$, giúp xác định giá trị phần thưởng mà tác nhân nhận được khi thực hiện một hành động trong một trạng thái cụ thể.
- $\gamma \in [0, 1]$ là hệ số chiết khấu, nó đại diện cho sự đánh đổi giữa giá trị phần thưởng tức thời và những giá trị phần thưởng đến sau trong tương lai.

Dựa vào mô hình cụ thể ở trên, ta diễn tả quá trình ra quyết định Markov một cách chính thức như sau: tác nhân và môi trường tương tác với nhau theo một chuỗi các bước thời gian rời rạc $t = 0, 1, 2, \dots$. Ở mỗi thời điểm t , tác nhân nhận được trạng thái của môi trường $s \in \mathcal{S}$, dựa vào trạng thái này để đưa ra hành động $a \in \mathcal{A}$. Một bước thời gian sau ở thời điểm $t + 1$, tác nhân nhận được một giá trị phần thưởng số học $r_{t+1} \in \mathcal{R}$ và môi trường chuyển sang trạng thái mới s_{t+1} . Hàm xác suất chuyển đổi trạng thái P thể hiện tính động của môi trường trong MDP.

Học tăng cường là một cách giải quyết cho bài toán MDP trong trường hợp các tham số của mô hình MDP chưa xác định.

2.6.3. Hàm giá trị trả về

Hàm giá trị trả về R_t là tổng số phần thưởng tích lũy được chiết khấu từ mốc thời gian t .

$$R_t = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \dots = \sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+k+1} \quad (13)$$

trong đó, T là bước thời gian cuối cùng. T có thể có giá trị hữu hạn hoặc $T = \infty$. Trong trường hợp T có giá trị hữu hạn, chuỗi các tương tác giữa tác nhân và môi trường được chia thành các chuỗi con gọi là các tập, mỗi tập kết thúc với một trạng thái được gọi là trạng thái kết thúc, sau đó môi trường sẽ được đặt lại để chuẩn bị cho một tập tiếp theo. Lấy ví dụ khi chơi một trò chơi, trạng thái kết thúc sẽ là trạng thái thắng, thua, v.v, tác nhân sẽ nhận được phần thưởng tùy thuộc vào trạng thái kết thúc. Các tập hoàn toàn độc lập và không ảnh hưởng đến nhau. Thời gian T cho mỗi tập có thể khác nhau trong các tập khác nhau. Đối với trường hợp $T = \infty$, quá trình tương tác giữa tác nhân và môi trường là một quá trình liên tục và vô hạn, không có trạng thái kết thúc.

Hệ số chiết khấu $\gamma \in [0, 1]$, đại diện cho sự đánh đổi giữa giá trị phần thưởng tức thời và phần thưởng trong tương lai. Giá trị phần thưởng trong tương lai ở thời điểm k chỉ bằng γ^{k-1} so với giá trị phần thưởng tức thời mà tác nhân nhận được.

- Nếu γ gần với giá trị 0, tác nhân sẽ bị coi là thiên cận, do nó chỉ quan tâm đến việc tối đa hoá giá trị phần thưởng tức thời. Điều này khiến tác nhân bỏ qua hành động có thể mang lại lợi ích cao hơn về mặt lâu dài.
- Nếu γ gần với giá trị 1, tác nhân sẽ được coi là nhìn xa trông rộng hơn do nó có tính đến những phần thưởng ở trong tương lai xa hơn.

Nếu MDP là quá trình theo tập (có trạng thái kết thúc) thì γ có thể có giá trị bằng 1, tuy nhiên nếu MDP là quá trình vô hạn ($T = \infty$) thì γ phải có giá trị nhỏ hơn 1, để tránh trường hợp kết quả của hàm giá trị trả về R_t là một giá trị vô hạn.

2.6.4. Hàm giá trị và chính sách

Hành động của tác nhân được xác định bởi một chính sách, kí hiệu là π , quy định cách mà tác nhân đưa ra hành động ở một trạng thái nhất định. Có hai loại chính sách là xác định và ngẫu nhiên. Chính sách xác định được đại diện bởi hàm $\pi(s_t) = a_t$ ($a_t \in \mathcal{A}, s_t \in \mathcal{S}$) là hàm kết nối giữa một trạng thái từ không gian \mathcal{S} đến một hành động từ không gian \mathcal{A} . Chính sách ngẫu nhiên là một phân phối xác suất của không gian hành động \mathcal{A} , dựa trên trạng thái s_t hiện tại: $(\pi(a_t|s_t) \in [0, 1])$. Thông qua học tăng cường, chính sách sẽ được điều chỉnh dựa trên kinh nghiệm mà tác nhân học được.

Hàm giá trị là hàm ước tính mức độ tốt hay xấu của một tác nhân khi ở một trạng thái cụ thể dựa trên giá trị phần thưởng kì vọng. Hàm giá trị thường được xác định cùng với một chính sách π cụ thể vì giá trị phần thưởng trong tương lai phụ thuộc vào chuỗi hành động mà tác nhân sẽ thực hiện dưới chính sách đó.

$$V_\pi(s) = \mathbb{E}_\pi\{R_t|s_t = s\} = \mathbb{E}_\pi\left\{\sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+k+1} | s_t = s\right\}, \forall s \in \mathcal{S} \quad (14)$$

trong đó, kí hiệu \mathbb{E}_π là giá trị kì vọng của biến ngẫu nhiên trong trường hợp tác nhân tuân theo chính sách π . Chúng ta gọi V_π là hàm giá trị trạng thái cho chính sách π .

Tương tự, chúng ta cũng định nghĩa giá trị của việc lựa chọn hành động $a \in \mathcal{A}$ khi tác nhân ở trạng thái $s \in \mathcal{S}$ tuân theo chính sách π , kí hiệu là $Q_\pi(s, a)$:

$$Q_\pi(s, a) = \mathbb{E}_\pi[R_t|s_t = s, a_t = a] = \mathbb{E}_\pi\left[\sum_{k=0}^T \gamma^k R_{t+k+1} | s_t = s, a_t = a\right] \quad (15)$$

Chúng ta gọi $Q_\pi(s, a)$ là hàm giá trị trạng thái - hành động cho chính sách π , thể hiện giá trị khi tác nhân ở trạng thái s , lựa chọn hành động a .

Ta có thể biểu thị hàm giá trị trạng thái $V_\pi(s)$ như là tổng của các giá trị trạng thái - hành động của tất cả các hành động mà tác nhân có thể thực hiện ở trạng thái hiện tại, dựa trên xác suất mà hành động đó được lựa chọn $\pi(s, a)$:

$$V_\pi(s, a) = \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi(s, a) Q_\pi(s, a) \quad (16)$$

2.6.5. Phương trình Bellman

Ta có thể viết lại $V_\pi(s)$ như sau:

$$\begin{aligned}
 V_\pi(s) &= \mathbb{E}_\pi[R_t | s_t = s] \\
 &= \mathbb{E}_\pi[r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \dots | s_t = s] \\
 &= \mathbb{E}_\pi[r_{t+1} + \gamma R_{t+1} | s_t = s] \\
 &= \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi(s, a) \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s' | s, a) [r(s, a, s') + \gamma \mathbb{E}_\pi[R_{t+1} | s_{t+1} = s']] \\
 &= \sum_{a \in \mathcal{A}} \pi(s, a) \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s' | s, a) [r(s, a, s') + \gamma V_\pi(s')], \forall s \in \mathcal{S}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Phương trình trên mô tả mối quan hệ giữa giá trị của hàm giá trị ở trạng thái s và giá trị của hàm giá trị ở trạng thái s' là trạng thái kế tiếp của trạng thái s . Được gọi là phương trình Bellman của V_π .

Tương tự ta cũng có phương trình Bellman cho $Q_\pi(s, a)$ như sau:

$$Q_\pi(s, a) = \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s' | s, a) [r(s, a, s') + \gamma \sum_{a' \in \mathcal{A}} \pi(s', a') Q_\pi(s', a')] \tag{18}$$

2.6.6. Chính sách tối ưu và hàm giá trị tối ưu

Giải quyết bài toán MDP, hay học tăng cường có nghĩa là tìm ra một chính sách giúp tác nhân đạt được nhiều phần thưởng về lâu dài. Một chính sách π được coi là tốt hơn một chính sách π' nếu giá trị trả về kì vọng $V_\pi(s)$ có giá trị lớn hơn giá trị $V_{\pi'}(s)$ với mọi trạng thái s . Một vấn đề có thể có một hoặc nhiều chính sách tối ưu.

$$\pi > \pi' \iff V_\pi(s) > V_{\pi'}(s), \forall s \in \mathcal{S} \tag{19}$$

Về mặt lý thuyết, chứng minh được rằng tồn tại một chính sách mà tốt hơn các chính sách còn lại, gọi là chính sách tối ưu (kí hiệu là π^*). Chúng ta tìm được chính sách tối ưu π^* bằng cách tìm ra hàm giá trị tối ưu $V^*(s)$ và hàm giá trị hành động - trạng thái tối ưu $Q^*(s, a)$:

$$V^*(s) = \max_{\pi} V_\pi(s) \tag{20}$$

Các chính sách tối ưu có cùng một hàm giá trị hành động tối ưu, kí hiệu là Q^* :

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} Q_\pi(s, a), \forall s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A} \tag{21}$$

Hàm giá trị hành động tối ưu được mô tả là giá trị phần thưởng kì vọng tối đa mà một tác nhân có thể nhận được khi thực hiện một hành động tại một trạng thái, và sau đó tuân theo chính sách tối ưu. Do đó ta có thể viết lại hàm Q^* dựa trên hàm V^* như sau:

$$Q^*(s, a) = \mathbb{E}[r_{t+1} + \gamma V^*(s') | s_t = s, a_t = a] \tag{22}$$

Ngoài ra mối quan hệ giữa $V^*(s)$ và $Q^*(s)$ còn có thể được biểu diễn như sau:

$$V^*(s) = \max_{a \in \mathcal{A}} Q^*(s, a) \quad (23)$$

thể hiện rằng giá trị trả về tối ưu $V^*(s)$ ở trạng thái s đạt được bằng cách chọn hành động có giá trị hành động tối ưu cao nhất.

Phương trình Bellman cho hàm giá trị tối ưu:

$$\begin{aligned} V^*(s) &= \max_a \mathbb{E}[r(s, a, s') + \gamma V^*(s') | s_t = s, a_t = a] \\ &= \max_a \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s' | s, a) [r(s, a, s') + \gamma V^*(s')] \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} Q^*(s, a) &= \mathbb{E}[r(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') | s_t = s, a_t = a] \\ &= \sum_{s'} P(s' | s, a) [r(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a')] \end{aligned} \quad (25)$$

2.7. Một số phương pháp giải quyết bài toán MDP

Trong phần này, cùng xem xét một vài phương pháp có thể được sử dụng để giải quyết vấn đề MDP.

2.7.1. Phương pháp quy hoạch động - Dynamic programming

Quy hoạch động là lớp các phương thức để tìm ra những giải pháp cho bài toán MDP trong đó thông tin về tính động của môi trường là giá trị hàm $P(.|s, a)$ được biết trước. Lập trình động tìm ra giá trị của các hàm giá trị ở các trạng thái khác nhau, qua đó tìm ra chính sách tối ưu. Phương pháp quy hoạch động dựa trên một thuộc tính gọi là "bootstrapping" nghĩa là kết quả ước lượng hàm giá trị của các trạng thái sẽ được cập nhật dựa trên ước lượng giá trị của trạng thái kế tiếp, nghĩa là phương pháp này cập nhật giá trị ước lượng dựa trên một giá trị ước lượng khác.

2.7.1.1. Đánh giá chính sách

Để đánh giá một chính sách, chúng ta cần tìm ra kết quả hàm giá trị V_π của chính sách đó. Nghĩa là chúng ta sẽ tính giá trị của hàm giá trị trạng thái V_π của một chính sách bất kì. Nhắc lại phương trình Bellman đối với hàm giá trị (17):

$$\begin{aligned} V_\pi(s) &= \mathbb{E}[R_t | s_t = s] \\ &= \mathbb{E}[r_{t+1} + \gamma V_\pi(s_{t+1}) | s_t = s] \\ &= \mathbb{E}[r_{t+1} + \gamma V_\pi(s_{t+1}) | s_t = s] \\ &= \sum_a \pi(s, a) \sum_{s'} P(s' | s, a) [r(s, a, s') + \gamma V_\pi(s')] \end{aligned} \quad (26)$$

Để tính giá trị của V_π , chúng ta khởi tạo một giá trị V_0 bất kì ở trạng thái bắt đầu (nếu trạng thái được chọn là trạng thái kết thúc thì khởi tạo $V_0 = 0$), sau đó ta tính hàm giá trị ở trạng thái tiếp theo sử dụng công thức cập nhật sau:

$$V_{k+1}(s) = \sum_a \pi(s, a) \sum_{s'|s, a} [r(s, a, s') + \gamma V_k(s')] \quad (27)$$

Khi $k \rightarrow \infty$, chuỗi V_k hội tụ đến giá trị V_π với điều kiện $\gamma < 1$ hoặc tồn tại trạng thái kết thúc dù cho bắt đầu ở bất kì trạng thái nào. Thuật toán này gọi là thuật toán đánh giá chính sách.

2.7.1.2. Cải thiện chính sách

Mục đích của việc tính toán hàm giá trị - trạng thái cho một chính sách bất kì ở trên là nhằm tìm ra chính sách tốt hơn. Định nghĩa chính sách π' tốt hơn chính sách π nếu:

$$V'_\pi(s) \geq V_\pi(s), \forall s \in \mathcal{S} \quad (28)$$

Ở trạng thái s , thay vì chọn hành động tiếp theo dựa theo chính sách π đã xác định từ trước, ta lựa chọn một hành động khác với hành động $a = \pi(s)$ của chính sách π , sau đó tiếp tục tuân theo chính sách π . Như vậy ta có chính sách mới π' . Chứng minh được rằng nếu:

$$Q_\pi(s, \pi'(s)) \geq V_\pi(s) \iff V'_\pi(s) \geq V_\pi(s), \forall s \in \mathcal{S} \quad (29)$$

Có nghĩa là nếu ở trạng thái s , ta lựa chọn được hành động mới $\pi'(s)$ tốt hơn hành động của chính sách cũ $\pi(s)$, sau đó tiếp tục tuân theo chính sách π , thì chính sách mới π' tốt hơn chính sách π .

Do đó ta sẽ có phương pháp cải thiện chính sách như sau: ở mỗi trạng thái s , ta tính toán giá trị của các hành động và chọn hành động có giá trị lớn nhất, ta thu được chính sách mới π' gọi là chính sách tham lam:

$$\begin{aligned} \pi'(s) &= \arg \max_a Q_\pi(s, a) \\ &= \arg \max_a \mathbb{E}[r_{t+1} + \gamma V_\pi(s_{t+1}) | s_t = s, a_t = a] \\ &= \arg \max_a \sum_{s'} P(s'|s, a) [r(s, a, s') + \gamma V_\pi(s')] \end{aligned} \quad (30)$$

với $\arg \max_a$ là kí hiệu thể hiện việc lựa chọn hành động a để giá trị biểu thức đó lớn nhất.

2.7.1.3. Phương pháp lặp chính sách

Phương pháp này phép lặp đi lặp lại một quá trình kết hợp giữa đánh giá chính sách và cải thiện chính sách, ta có một phương pháp gọi là lặp chính sách. Lựa chọn một chính

sách π , chúng ta thực hiện đánh giá chính sách để tính được giá trị V_π , sau đó sử dụng phương pháp cải thiện chính sách để cải thiện chính sách π , tìm ra chính sách mới π' tốt hơn chính sách cũ. Quá trình này được lặp đi lặp lại giúp ta tìm ra chính sách tối ưu.

2.7.1.4. Phương pháp lặp giá trị

Là thuật toán tìm ra chính sách tối ưu π^* bằng cách lặp hàm giá trị - trạng thái để tìm ra $V^*(s)$ dựa trên phương trình Bellman của hàm giá trị tối ưu V^* như đã trình bày ở phần trước (24):

$$V^*(s) = \max_a \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s'|s, a) [r(s, a, s') + \gamma V^*(s')] \quad (31)$$

Hàm giá trị tối ưu V^* được thực hiện bằng cách lặp với luật cập nhật hàm giá trị sau mỗi lần lặp như sau:

$$V_{k+1}(s) = \max_a \sum_{s'} P(s'|s, a) [r + \gamma V_k(s')] \quad (32)$$

Quá trình lặp được thực hiện cho đến khi hội tụ (khi kết quả hàm giá trị không thay đổi quá một ngưỡng ϵ xác định trước), lúc này ta thu được hàm giá trị tối ưu. Chính sách tối ưu được rút ra từ hàm giá trị tối ưu như sau:

$$\pi(s) = \arg \max_a \sum_{s'} P(s'|s, a) [r + \gamma V^*(s')] \quad (33)$$

$\pi \approx \pi^*$ chính là chính sách tối ưu cần tìm.

2.7.2. Phương pháp lấy mẫu Monte Carlo

Trong phương pháp quy hoạch động như trình bày ở trên, giả thiết cần phải biết đầy đủ về tính động của môi trường (hàm $P(.|s, a)$ xác định), điều này đôi khi khó đạt được trong các bài toán thực tế. Phương pháp Monte Carlo dựa trên ý tưởng không cần tính toán hàm giá trị - trạng thái $V(s)$ và hàm giá trị trạng thái - hành động $Q(s, a)$ sử dụng hàm xác suất chuyển đổi trạng thái $P(.|s, a)$ như quy hoạch động, thay vào đó ước tính giá trị hàm $V(s)$ và $Q(s, a)$ thông qua việc lấy mẫu một tập các hành động chuyển trạng thái của môi trường. Phương pháp Monte Carlo được trình bày như sau:

- Bắt đầu từ trạng thái s_0 .
- Lấy mẫu một quỹ đạo từ thời điểm t : $\tau = (s_0, a_0, r_1, s_1, a_1, \dots, s_T, a_T, r_{T+1}, s_{T+1})$ dựa trên môi trường sử dụng chính sách π hiện tại.
- Tính toán giá trị phần thưởng tích lũy $R_t^{(e)} = \sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+k+1}$ ở thời điểm t dựa trên quỹ đạo τ

– Lặp lại những bước trên M lần để ước tính giá trị V_π như sau:

$$V_\pi(s) = \mathbb{E}[R_t | s_t = s] \approx \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M R_t^{(e)} \quad (34)$$

Bằng cách lấy mẫu nhiều quỹ đạo τ từ môi trường, giá trị $V_\pi(s)$ được lấy xấp xỉ bằng cách lấy trung bình như trên. Tuy nhiên trong thực tế, khó xác định được số mẫu quỹ đạo cần lấy để có thể ước tính giá trị được chính xác nhất. Do đó, trong thực hành, ta sẽ tiến hành cập nhật liên tục các giá trị ước tính

$$V_\pi(s) \leftarrow V_\pi(s) + \alpha(R_t - V_\pi(s)) \quad (35)$$

$$Q_\pi(s, a) \leftarrow Q_\pi(s, a) + \alpha(R_t - Q_\pi(s, a)) \quad (36)$$

trong đó, $\alpha \in [0, 1]$ là trọng số tỉ lệ học.

Phương pháp lấy mẫu Monte Carlo chỉ phù hợp với những bài toán mà nhiệm vụ được chia theo tập (tức là quỹ đạo theo chính sách π hữu hạn), do nó có thể tính được giá trị R_t trong trường hợp hữu hạn, với bài toán tương tác vô hạn lần, khó để có thể lấy trung bình của phần thưởng tích lũy.

2.8. Giải quyết MDP bằng học tăng cường

2.8.1. Học tăng cường không mô hình - Model-free RL

Trong học tăng cường, học tăng cường không mô hình là lớp các thuật toán học tăng cường không yêu cầu mô hình môi trường. Điều này có nghĩa là thuật toán học không cố gắng xây dựng hoặc sử dụng một mô hình để dự đoán sự chuyển tiếp trạng thái (hàm xác suất chuyển đổi trạng thái P) hay hàm phần thưởng r . Thay vào đó, nó học thông qua trải nghiệm từ việc tương tác trực tiếp với môi trường.

2.8.2. Thuật toán học khác biệt thời gian - Temporal Difference

Trong phương pháp Monte Carlo, hàm giá trị V_π được ước tính dựa vào việc tính trung bình giá trị phần thưởng tích lũy trong mỗi tập. Tuy nhiên phương pháp Monte Carlo chỉ cập nhật hàm giá trị sau mỗi tập, điều này dẫn đến nó không phù hợp với những vấn đề vô hạn. Phương pháp học khác biệt thời gian (TD) là sự kết hợp giữa ý tưởng từ phương pháp Monte Carlo và phương pháp quy hoạch động (dynamic programming). Giống như Monte Carlo, phương pháp học TD có thể học trực tiếp từ kinh nghiệm tương tác với môi trường mà không cần nắm được tính động của môi trường. Giống quy hoạch động ở chỗ, phương pháp TD cũng cập nhật các ước tính dựa trên những giá trị ước tính khác, mà không cần đợi đến khi kết thúc một tập mới cập nhật giá trị như phương pháp

Monte Carlo, thay vào đó phương pháp TD cập nhật giá trị ước tính ngay ở bước thời gian tiếp theo.

Phương pháp TD đơn giản nhất thực hiện cập nhật hàm giá trị như sau:

$$V_{\pi}(s) \leftarrow V_{\pi}(s) + \alpha \underbrace{[r(s, a, s') + \gamma V_{\pi}(s') - V_{\pi}(s)]}_{\delta} \quad (37)$$

Quá trình này có thể được mô tả như sau: ở thời điểm t , tác nhân thực hiện hành động a theo chính sách hiện tại π , quan sát giá trị phần thưởng tức thời và hệ thống chuyển sang trạng thái mới s' , lúc này hàm giá trị V_{π} được cập nhật theo quy tắc cập nhật như trên. Trong đó $r(s, a, s') + \gamma V_{\pi}(s')$ là ước tính giá trị hàm $V_{\pi}(s)$ dựa trên ước tính hàm giá trị của trạng thái s' tiếp theo sau khi tác nhân thực hiện hành động a và nhận phần thưởng, biểu thức $\delta = r(s, a, s') + \gamma V_{\pi}(s') - V_{\pi}(s)$ gọi là "lỗi khác biệt thời gian", thể hiện sự sai lệch giữa giá trị ước tính hiện tại của V_{π} so với giá trị ước tính cập nhật sau khi tác nhân thực hiện hành động và nhận phần thưởng. α biểu thị cho tốc độ học của tác nhân, tức là tốc độ điều chỉnh giá trị của hàm V_{π} sau mỗi hành động được thực hiện. Hàm giá trị được cập nhật liên tục theo từng bước thời gian chứ không cần đợi hết một tập (tác nhân đến trạng thái kết thúc) và không chỉ khả dụng với bài toán tương tác theo từng tập như phương pháp Monte Carlo mà còn phù hợp với những bài toán tương tác liên tục.

Tương tự với hàm giá trị hành động $Q(s, a)$ cũng áp dụng quy tắc cập nhật tương tự trong phương pháp TD:

$$Q_{\pi}(s, a) \leftarrow Q_{\pi}(s, a) + \alpha \underbrace{[r(s, a, s') + \gamma Q_{\pi}(s', a') - Q_{\pi}(s, a)]}_{\delta} \quad (38)$$

Việc cập nhật giá trị hàm Q như ở trên gọi là quá trình học giá trị hàm Q , chúng ta có hai cách để tác nhân lựa chọn hành động tiếp theo khi học, cách thứ nhất, tác nhân sẽ lựa chọn hành động dựa trên chính sách $\pi(s)$ hiện tại hoặc tác nhân lựa chọn theo hướng tham lam bằng cách chọn hành động tiếp theo $a = \arg \max_a Q(s', a)$. Cách lựa chọn hành động tiếp theo của tác nhân trong phương pháp TD dẫn đến hai phương pháp sau.

2.8.2.1. Phương pháp học theo chính sách (on-policy method)

Ở đây ta xem xét thuật toán **SARSA** - là một thuật toán học TD sử dụng chính sách mà nó đang học để cập nhật giá trị hành động. Điều này có nghĩa là khi lựa chọn hành động tiếp theo, SARSA sẽ sử dụng hành động mà chính sách hiện tại chỉ định, thay vì chọn hành động tối ưu tuyệt đối. Bằng cách sử dụng thêm chính sách ϵ tham lam khi chọn hành động tiếp theo tuân theo chính sách π , SARSA sẽ tìm được chính sách với xác suất bằng 1.

Biểu thức cập nhật hàm giá trị hành động của thuật toán SARSA như sau:

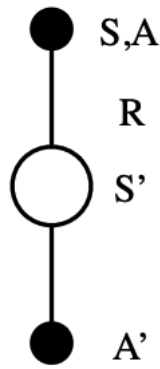
$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q^{\pi}(s_t, a_t)] \quad (39)$$

trong đó, hành động $a_{t+1} = \pi(s_{t+1})$ được lựa chọn tuân trên chính sách hiện tại của tác nhân.

Giá trị "lỗi khác biệt thời gian" δ được biểu diễn như sau:

$$\delta = r_{t+1} + \gamma Q(s_{t+1}, \pi(s_{t+1})) - Q(s_t, a_t) \quad (40)$$

Luật cập nhật của SARSA phụ thuộc vào các giá trị (s, a, r, s', a') , chính là lý do thuật toán có tên gọi SARSA (State - Action - Reward - State - Action), mô tả sự dịch chuyển từ một cặp trạng thái - hành động này sang cặp trạng thái hành động tiếp theo tuân theo chính sách hiện tại của tác nhân.



Hình 2.6. Sơ đồ cập nhật thuật toán SARSA.

Algorithm 1 Thuật toán SARSA

- 1: **Initialize** $Q_0(s, a)$ arbitrarily $\forall s, a$, except that $Q(\text{terminal}, \cdot) = 0$
 - 2: Loop for each episode:
 - 3: Initialize s
 - 4: Choose a from s using policy derived from Q (e.g., ϵ -greedy)
 - 5: Loop for each step of episode:
 - 6: Take action a , observe r, s'
 - 7: Choose a' from s' using policy derived from Q (e.g., ϵ -greedy)
 - 8: $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)]$
 - 9: $s \leftarrow s'; a \leftarrow a'$
 - 10: until s is terminal
-

2.8.2.2. Phương pháp học không theo chính sách (off-policy method)

Nổi bật là thuật toán Q-learning - thuật toán lựa chọn hành động dựa trên cơ chế tham lam, lựa chọn hành động có giá trị hàm giá trị hành động Q cao nhất để cập nhật:

$$\delta = r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t) \quad (41)$$

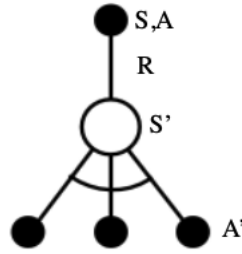
Thuật toán Q-learning sẽ được trình bày chi tiết ở phần sau.

2.9. Thuật toán Q-learning

Như đã trình bày ở phần trước, thuật toán Q-learning là thuật toán TD với phương pháp lựa chọn hành động không theo chính sách hiện tại của tác nhân (off-policy). Thay vào đó, nó lựa chọn hành động tiếp theo dựa trên giá trị tối ưu của hàm Q.

Hàm giá trị hành động Q được cập nhật như sau:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_t, a_t)] \quad (42)$$



Hình 2.7. Sơ đồ cập nhật thuật toán Q-learning.

Algorithm 2 Thuật toán Q-learning

- 1: **Initialize** parameters: $\alpha \in (0, 1]$, small $\epsilon > 0$
 - 2: **Initialize** $Q_0(s, a)$ arbitrarily $\forall s, a$, except that $Q(\text{terminal}, \cdot) = 0$
 - 3: Loop for each episode:
 - 4: Initialize s
 - 5: Loop for each step of episode:
 - 6: Choose a' from s' using policy derived from Q (e.g., ϵ -greedy)
 - 7: Take action a , observe r, s'
 - 8: $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$
 - 9: $s \leftarrow s'$;
 - 10: until s is terminal
-

Tương tự SARSA, ta cũng sử dụng ϵ -greedy để lựa chọn hành động a kế tiếp tuân theo chiến lược tham lam ϵ như sau:

$$a = \begin{cases} \arg \max Q(s, a) & \text{với xác suất } 1 - \epsilon, \\ \text{ngẫu nhiên} & \text{với xác suất } \epsilon. \end{cases} \quad (43)$$

Khi tác nhân lựa chọn hành động có hàm Q lớn nhất, tác nhân đang khai thác kinh nghiệm cũ, ưu tiên hành động đem lại nhiều phần thưởng đã được học trong quá khứ. Khi

tác nhân lựa chọn hành động ngẫu nhiên, nó đang khám phá những hành động mới nhằm tìm ra những hành động có giá trị phần thưởng cao hơn. Vấn đề cân bằng giữa khám phá và khai thác là vấn đề quan trọng, ở thời điểm bắt đầu học, tác nhân nên ưu tiên việc khám phá thông qua lựa chọn ngẫu nhiên những hành động, càng về sau, tác nhân càng giảm tỉ lệ chọn ngẫu nhiên hành động xuống và ưu tiên khai thác từ kinh nghiệm trong quá khứ.

2.10. Học sâu tăng cường

Thuật toán học tăng cường như Q-learning ở trên là một phương pháp hiệu quả để giải quyết những bài toán đối phó với sự thay đổi và không chắc chắn của môi trường. Tuy nhiên, học tăng cường lại giới hạn với những bài toán ít chiều, với những bài toán mà không gian hành động và trạng thái lớn, ví dụ như bài toán Backgammon với 10^{20} trạng thái, học tăng cường truyền thống không giải quyết được bài toán. Để giải quyết vấn đề bài toán nhiều chiều như trên, thì học tăng cường sâu - sự kết hợp giữa học tăng cường và mạng thần kinh sâu là một cách tiếp cận phù hợp.

Trong phương pháp học tăng cường truyền thống, hàm giá trị trạng thái $Q(s, a)$ thường được lưu dưới dạng bảng, với mỗi cặp trạng thái - hành động là một giá trị của bảng. Việc này chỉ phù hợp với những bài toán có số lượng hành động và trạng thái nhỏ, với những bài toán nhiều chiều, sẽ khiến thời gian truy cập để cập nhật một giá trị trong bảng lâu hơn và bộ nhớ để lưu trữ bảng cũng lớn. Dẫn đến thay vì áp dụng phương pháp lập bảng, chúng ta sử dụng xấp xỉ hàm để ước lượng giá trị của hàm $V(s)$ cũng như hàm $Q(s, a)$, dựa trên giá trị đã biết, thực hiện học và dự đoán xấp xỉ những giá trị chưa biết. Với phương pháp xấp xỉ hàm, thay vì lưu giữ các giá trị Q trong bảng, chúng ta biểu thị chúng bằng một hàm tham số $Q_\theta(s, a)$. Phương pháp học tăng cường truyền thống ví dụ như TD giúp cập nhật giá trị tham số θ và tìm được chiến lược tối ưu π^* khi hội tụ. Ở đây chúng ta sử dụng mạng neuron sâu như một hàm xấp xỉ, chúng ta chuyển từ học tăng cường truyền thống sang học tăng cường sâu, giúp giải quyết những vấn đề phức tạp và nhiều chiều.

Chúng ta xem xét phương pháp học tăng cường sâu dựa trên xấp xỉ hàm giá trị V , một phép xấp xỉ hàm V được học và chính sách được xác định bằng cách thực hiện hành động tham lam dựa trên V . Trong học tăng cường sâu, các bộ xấp xỉ hàm đơn giản là các mạng nơ ron được tham số hoá bởi tham số θ - là trọng số kết nối giữa các lớp của mạng. Áp dụng các phương pháp học tăng cường như SARSA và Q-learning, ta thu được chính sách π_θ phụ thuộc trực tiếp vào giá trị của hàm tham số $Q_\theta(s, a)$. Về mặt toán học, việc học của mạng nơ ron trở thành vấn đề tối thiểu giá trị hàm mất mát được định nghĩa giữa giá trị trả về thực tế từ môi trường R_t và hàm tham số trạng thái hành động $Q_\theta(s, a)$:

$$\mathcal{L}(\theta) = \mathbb{E}_\pi[(R_t - Q_\theta(s, a))^2] \quad (44)$$

Trong phương pháp học tăng cường SARSA, hàm mất mát được định nghĩa như sau:

$$\mathcal{L}(\theta) = \mathbb{E}_{\pi}[(r(s, a, s') + \gamma Q_{\theta}(s', \pi(s')) - Q_{\theta}(s, a))^2] \quad (45)$$

Tương tự với phương pháp học tăng cường Q-learning, hàm mất mát được định nghĩa như sau:

$$\mathcal{L}(\theta) = \mathbb{E}_{\pi}[(r(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q_{\theta}(s', a') - Q_{\theta}(s, a))^2] \quad (46)$$

2.11. Mạng sâu Q - DQN

Thuật toán DQN là sự kết hợp giữa học tăng cường và một lớp của mạng nơ ron nhân tạo là mạng nơ ron sâu. Dùng để giải quyết bài toán tác nhân tương tác với môi trường thông qua một chuỗi các quan sát, hành động và phần thưởng. Mục tiêu của tác nhân là học và đưa ra hành động tối ưu phần thưởng tích lũy trong tương lai, cụ thể là DQN sử dụng mạng nơ ron sâu tích chập để tìm xấp xỉ của hàm trạng thái - hành động tối ưu $Q^*(s, a)$.

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} \mathbb{E}[r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots] \quad (47)$$

Học tăng cường được biết đến là không ổn định trong trường hợp sử dụng hàm xấp xỉ ví dụ như sử dụng mạng nơ ron, sự không ổn định này gây ra bởi một số yếu tố như: sự tương quan giữa các dữ liệu tuần tự khi quan sát, dẫn đến một sự thay đổi nhỏ trong giá trị của Q cũng khiến chính sách thay đổi và do đó thay đổi phân phối dữ liệu. Để đối phó với sự tương quan của các dữ liệu quan sát được tuần tự, thuật toán DQN sử dụng hai kỹ thuật: đầu tiên là dùng bộ nhớ phát lại với kích cỡ lớn, dữ liệu tuần tự quan sát được được lưu vào bộ nhớ, sau đó lựa chọn ngẫu nhiên dữ liệu từ bộ nhớ này để học và giảm thiểu hàm mất mát sử dụng thuật toán giảm dần độ dốc ngẫu nhiên (SGD), giúp loại bỏ được sự tương quan giữa các dữ liệu. Kỹ thuật thứ hai là sử dụng một mạng mục tiêu Q'_{θ} để tăng sự ổn định của giá trị mục tiêu $r(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q_{\theta}(s', a')$, mạng mục tiêu Q'_{θ} có kiến trúc giống hệt mạng Q_{θ} nhưng có tần suất cập nhật thấp hơn, thường là sau hàng nghìn lần cập nhật thì mạng mục tiêu Q'_{θ} được cập nhật với tham số mới nhất của mạng Q_{θ} .

Algorithm 3 Thuật toán học tăng cường sâu DQN.

- 1: Initialize replay memory D
 - 2: Initialize the Q-network Q with random weights θ .
 - 3: Initialize the target Q-network \hat{Q} with weight $\theta' = \theta$.
 - 4: **for** $t = 1$ to T **do**
 - 5: With probability ϵ select a random action a_t , otherwise select $a_t = \arg \max Q^*(s_t, a_t, \theta)$
 - 6: Perform action a_t and observe reward r_t and next state s_{t+1}
 - 7: Store transition (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) in the replay memory D
 - 8: Sample random mini-batch of transitions (s_j, a_j, r_j, s_{j+1}) from D
 - 9: $y_j = r_j + \gamma \max_{a_{j+1}} \hat{Q}(s_{j+1}, a_{j+1}, \theta')$
 - 10: Perform a gradient descent step on $(y_j - Q(s_j, a_j, \theta))^2$.
 - 11: Every C steps reset $\hat{Q} = Q$
 - 12: **end for**
-

Chương 3.

Đề xuất phương pháp giải quyết bài toán gây nhiễu từ UAV

Trong chương này, bài toán chống nhiễu từ UAV được mô hình hoá thành bài toán tối ưu sử dụng MDP, giải quyết bài toán chống nhiễu lúc này trở thành việc tìm lời giải cho bài toán tối ưu thông qua việc tối đa giá trị hàm mục tiêu. Chương này đề xuất một phương pháp sử dụng Q-learning và DQN để giải quyết bài toán tối ưu MDP, qua đó giúp kênh truyền không những chống lại mà còn tận dụng cuộc tấn công gây nhiễu từ UAV.

3.1. Mô hình hệ thống

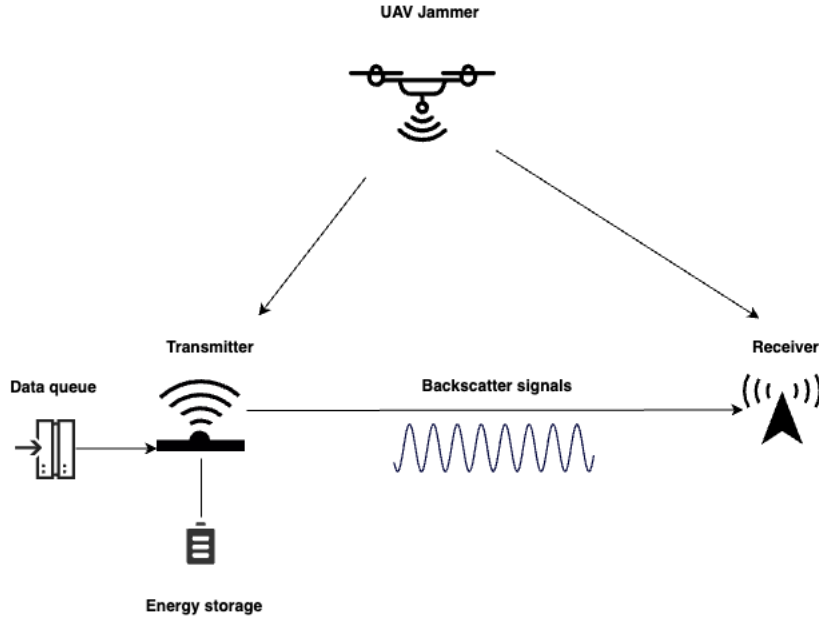
Ở đây, xem xét một hệ thống truyền thông không dây bao gồm một máy phát, một máy thu và một UAV gây nhiễu (Hình 3.1). Máy phát được trang bị bộ đệm dữ liệu để đóng vai trò như hàng đợi dữ liệu trước khi truyền đến máy thu, ngoài ra máy phát còn được trang bị bộ thu năng lượng và một mạch tán xạ ngược môi trường có khả năng tán xạ sóng nhiễu để truyền gói tin. Khi bị nhiễu tấn công, máy phát có thể thu năng lượng từ tín hiệu nhiễu để sử dụng cho mục đích truyền gói tin chủ động đến máy thu sau này khi máy gây nhiễu không tấn công - chế độ HTT, hoặc tán xạ ngược dữ liệu dựa trên sóng nhiễu - chế độ tán xạ ngược.

3.1.1. Mô hình gây nhiễu

Khoá luận này xem xét một UAV có khả năng gây nhiễu thông minh. Giả sử UAV có khả năng lắng nghe kênh truyền giữa máy phát và máy thu khi tấn công. Điều này cho phép UAV có thể điều chỉnh vị trí cũng như chiến lược gây nhiễu để tối đa hoá thiệt hại lên kênh truyền giữa máy phát và máy thu. Mục tiêu của UAV là làm giảm giá trị SINR tại máy thu, khiến cho kênh thông lượng của kênh truyền giảm xuống, giá trị SINR được tính như công thức (1) ở phần cơ sở lý thuyết như sau:

$$\theta = \frac{P_R}{\varphi P_J + \rho^2} \quad (48)$$

trong đó, P_R là công suất nhận được từ máy phát tại cổng (máy thu), P_J là công suất nhiễu được phát của máy gây nhiễu, ρ^2 là phương sai của nhiễu Gauss trắng cộng thêm. φP_J là công suất nhiễu tại cổng, trong đó $0 \leq \varphi \leq 1$ là hệ số suy giảm kênh truyền.



Hình 3.1. Mô hình hệ thống.

Giá trị công suất sóng nhiễu P_J của UAV tác động lên máy thu là giá trị thay đổi do UAV có khả năng thay đổi vị trí để tối ưu hoá khả năng tấn công kênh truyền như giả thiết ở trên. Khi UAV đến gần máy phát và máy thu, khả năng xuất hiện đường truyền LoS tăng lên do góc nâng θ_i tăng lên, dẫn đến cường độ nhiễu tác động lên máy phát và máy thu tăng lên. Ngược lại khi UAV di chuyển ra xa máy phát và máy thu, khả năng gặp vật cản và các yếu tố như tăng khả năng kênh truyền NLoS, dẫn đến cường độ nhiễu tác động lên máy phát và máy thu giảm. Ngoài ra, sẽ có những thời điểm sóng nhiễu từ UAV không tác động đến máy phát và máy thu, do sóng nhiễu có thể không truyền đến được máy phát và máy thu do yếu tố vật cản từ môi trường, hoặc do UAV là thiết bị hạn chế về mặt năng lượng, nên có những thời điểm nó cần quay lại trạm để thay pin để bổ sung năng lượng, khi đó UAV không tấn công kênh truyền hay cường độ gây nhiễu của UAV lên máy phát và máy thu là 0W.

Giả sử $P_J = \{P_0^J, \dots, P_n^J, \dots, P_N^J\}$ là vector tập các giá trị cường độ nhiễu khác nhau trong các thời điểm khác nhau của UAV. Tại mỗi thời điểm, do sự thay đổi vị trí hoặc do yếu tố môi trường, v.v, cường độ nhiễu từ UAV là khác nhau và là một trong những giá trị trong vector P_J với giá trị xác suất là x_n . Trong đó giá trị nhỏ nhất trong vector P_J là 0W, tương ứng với những thời điểm sóng nhiễu từ UAV không tác động đến kênh truyền như đã trình bày ở trên.

Kí hiệu $J_s = \{x = (x_0, \dots, x_n, \dots, x_N), \sum_{i=0}^N x_n = 1\}$ là vector xác suất tấn công của UAV tương ứng với các mức năng lượng trong vector P_J , hay J_s còn được coi như là chiến lược tấn công của UAV.

Do UAV là thiết bị hạn chế về mặt năng lượng, UAV xác định một chiến lược tấn công J_s sao cho mức công suất nhiễu trung bình P_{avg} phù hợp với mức năng lượng và

trạng thái hiện tại của UAV. Do giả thiết UAV gây nhiễu thông minh có khả năng lắng nghe kênh truyền, giả sử UAV gây nhiễu sẽ nhận về một phần thưởng w_n^J tương ứng với mỗi giá trị cường độ nhiễu P_n^J trong vector P_J , w_n^J đại diện cho số gói tin từ máy phát đến máy thu không thành công do tác động của sóng nhiễu (ví dụ do không giải mã thành công gói tin tại máy thu do SINR giảm). Kí hiệu $w_J = \{w_0^J, \dots, w_n^J, \dots, w_N^J\}$ là vector phần thưởng của UAV gây nhiễu. Hàm mục tiêu của UAV gây nhiễu được xác định như sau:

$$\begin{cases} \max_x x w_J^\top, \\ \sum_{n=0}^N x_n = 1, x_n \in [0, 1], \forall n \in \{0, \dots, N\}, \\ x P^T \leq P_{\text{avg}} \end{cases} \quad (49)$$

Mục tiêu của UAV bao gồm tối đa hoá thiệt hại của đường truyền, nhưng đồng thời cũng điều chỉnh chiến lược tấn công phù hợp với trạng thái hiện tại của UAV.

3.1.2. Mô hình kênh truyền

Khi UAV gây nhiễu không tấn công kênh truyền, hoặc khi tín hiệu nhiễu từ UAV không tác động đến kênh truyền do vật cản, máy phát có thể phát chủ động \hat{d}_t gói tin đến máy thu (sử dụng phương pháp truyền dẫn chủ động qua sóng vô tuyến thông thường), hoặc không hoạt động. Mỗi gói tin truyền thành công cần e_t đơn vị năng lượng. Khi UAV gây nhiễu tấn công và nằm trong phạm vi ảnh hưởng đến kênh truyền, máy phát vẫn có thể hoặc phát gói tin đến máy thu bằng cách điều chỉnh tốc độ phát tương ứng với cường độ nhiễu sử dụng kỹ thuật RA, hoặc thu năng lượng từ sóng nhiễu, hoặc tán xạ ngược tín hiệu nhiễu để truyền dữ liệu đến máy thu. Thông qua các thí nghiệm và phân tích về các hệ thống truyền thông tán xạ ngược, có thể thấy rằng với sóng nhiễu với cường độ càng lớn, càng nhiều gói tin có thể tán xạ ngược đến máy thu, và cũng càng nhiều năng lượng có thể thu được từ sóng nhiễu nếu máy phát hoạt động ở chế độ thu năng lượng.

Cụ thể, trong trường hợp máy phát chọn điều chỉnh tốc độ phát dùng kỹ thuật RA, đặt $r = \{r_1, \dots, r_m, \dots, r_M\}$ là tập hợp các tốc độ truyền mà máy thu có thể lựa chọn để truyền khi bị tấn công. Ở mỗi tốc độ r_m , máy phát có thể truyền tối đa \hat{d}_m^t gói tin. Với $m = 1, \dots, M$ khi $\gamma_{m-1} \leq \theta < \gamma_m$ với γ_m là giá trị của SINR, máy thu chỉ có thể giải mã những gói tin được gửi ở tốc độ r_0, r_1, \dots, r_{m-1} , những gói tin gửi ở tốc độ r_m hoặc cao hơn sẽ bị mất, do máy thu không giải mã được.

Trong trường hợp máy phát chọn thu năng lượng từ sóng nhiễu, năng lượng này có thể được lưu trữ để sử dụng cho quá trình truyền chủ động sau này, tương ứng với mỗi mức cường độ nhiễu P_n^J ảnh hưởng đến máy phát khác nhau, máy phát có thể thu được e_n^J đơn vị năng lượng. Kí hiệu $e = \{e_0^J, \dots, e_N^J\}$ là các giá trị năng lượng có thể thu được tương ứng với các mức nhiễu khác nhau của UAV.

Trong trường hợp máy phát chọn tán xạ ngược sóng nhiều để truyền dữ liệu đến máy thu, kí hiệu \hat{d}_n^J là số gói tin tối đa có thể được tán xạ ngược bởi máy phát nếu cường độ nhiễu tương ứng là P_n^J . Lưu ý rằng tốc độ tán xạ ngược dữ liệu được quy định bởi mạch tán xạ ngược và không thay đổi, kí hiệu là b^\dagger . Trong mô hình đề xuất này, giả sử khi máy phát lựa chọn tán xạ ngược sóng nhiều, nó có thể truyền được b^\dagger gói tin, nếu $b^\dagger > \hat{d}_n^J$ thì $(b^\dagger - \hat{d}_n^J)$ gói tin sẽ bị mất trong quá trình tán xạ ngược dữ liệu do mạch tán xạ ngược tán xạ số gói tin cố định là b^\dagger , trong khi cường độ nhiễu hiện tại chỉ cho phép tán xạ tối đa \hat{d}_n^J gói tin. Kí hiệu $\hat{d} = \{\hat{d}_0^J, \dots, \hat{d}_N^J\}$ là vector thể hiện số gói tin có thể được tán xạ ngược tương ứng với cường độ nhiễu.

Kí hiệu D và E tương ứng là kích cỡ bộ đệm dữ liệu và lượng năng lượng tối đa mà máy phát có thể lưu trữ. Quá trình gói tin đến máy phát được giả sử tuân theo phân phối Poisson với tốc độ trung bình λ . Khi bộ đệm dữ liệu của máy phát đầy, gói tin mới đến sẽ bị loại bỏ.

Máy phát chỉ có thể xác định nó có đang bị tấn công gây nhiễu hay không mà không xác định được cụ thể cường độ sóng nhiễu, cũng như chiến lược tấn công của UAV gây nhiễu.

3.2. Xây dựng bài toán chống nhiễu từ UAV

Đề đối phó với cuộc tấn công gây nhiễu từ UAV vốn có tính động và không chắc chắn, khoá luận này xây dựng bài toán tối ưu hoá của hệ thống được đề cập ở trên thành việc tìm chính sách tối ưu cho một quá trình ra quyết định Markov (MDP). Việc mô hình hoá này giúp máy phát có thể ra quyết định tối ưu nhằm tối đa hoá giá trị phần thưởng dài hạn, trong trường hợp này là giá trị thông lượng trung bình của hệ thống truyền thông. MDP được xác định bởi một bộ $\langle \mathcal{S}, \mathcal{A}, r \rangle$ trong đó \mathcal{S} là không gian trạng thái, \mathcal{A} là không gian hành động và r là hàm giá trị phần thưởng tức thời của hệ thống.

3.2.1. Không gian trạng thái

Chúng ta xác định không gian trạng thái của hệ thống trong trường hợp này bao gồm ba trạng thái là trạng thái tấn công của máy gây nhiễu UAV, trạng thái của bộ đệm dữ liệu máy phát và trạng thái của bộ lưu trữ năng lượng của máy phát.

$$\mathcal{S} = \{(j, d, e) : j \in \{0, 1\}; d \in \{0, \dots, D\}; e \in \{0, \dots, E\}\} \quad (50)$$

trong đó, j là trạng thái UAV gây nhiễu, với $j = 0$ nếu như UAV không tấn công hoặc $j = 1$ nếu sóng nhiễu của UAV tấn công kênh truyền, d và e tương ứng là số gói tin trong bộ đệm và số đơn vị năng lượng trong bộ lưu trữ năng lượng của máy phát. Trạng thái của hệ thống được xác định bởi một biến tổng hợp $s = (j, d, e) \in \mathcal{S}$.

3.2.2. Không gian hành động

Máy phát có thể thực hiện $(M + 4)$ hành động trong không gian trạng thái \mathcal{A} , bao gồm không hoạt động, truyền dữ liệu chủ động, thu thập năng lượng từ sóng nhiễu, tán xạ ngược sóng nhiễu và điều chỉnh tốc độ phát là một trong M giá trị tốc độ của vector $r = \{r_1, \dots, r_m, \dots, r_M\}$ bằng cách sử dụng kỹ thuật RA khi sóng nhiễu từ UAV ảnh hưởng đến kênh truyền (khi UAV tấn công). Do đó, không gian hành động được xác định là tập $\mathcal{A} = \{a : a \in \{1, \dots, M + 4\}\}$ trong đó:

$$a = \begin{cases} 1, & \text{Không hoạt động,} \\ 2, & \text{Truyền dữ liệu chủ động,} \\ 3, & \text{Thu hoạch năng lượng từ sóng nhiễu,} \\ 4, & \text{Tán xạ ngược dữ liệu trên sóng nhiễu,} \\ 4 + m, & \text{Điều chỉnh tốc độ phát sang} \\ & r_m \text{ với } m \in \{1, \dots, M\}. \end{cases} \quad (51)$$

3.2.3. Phần thưởng tức thời

Trong mô hình này, phần thưởng tức thời sau khi thực hiện hành động a ở trạng thái s là số gói tin được truyền thành công đến máy thu. Do đó hàm giá trị phần thưởng tức thời được biểu diễn như sau:

$$r(s, a) = \begin{cases} d_t, & (j = 0, d > 0, e \geq e_t, a = 2; 0 < d_t \leq \hat{d}_t) \\ d_n^J, & (j = 1, d > 0, a = 4; 0 < d_n^J \leq \hat{d}_n^J) \\ d_m^r, & (j = 1, d > 0, e \geq e_t, a = 4 + m; 0 < d_m^r \leq \hat{d}_m^r) \\ 0, & \text{Trong các trường hợp còn lại.} \end{cases} \quad (52)$$

Khi UAV gây nhiễu không tấn công kênh truyền ($j = 0$), máy phát có dữ liệu trong bộ đệm và có đủ năng lượng trong bộ lưu trữ, lúc này nó có thể chọn phát chủ động gói tin đến máy thu ($a = 2$), số gói tin có thể truyền đến máy thu là d_t gói tin thỏa mãn $0 < d_t \leq \hat{d}_t$ gói tin (trong đó \hat{d}_t là số gói tin tối đa mà máy phát có thể phát chủ động).

Khi máy gây nhiễu tấn công kênh truyền ($j = 1$), máy phát có gói tin trong bộ đệm ($d > 0$), nó có thể tán xạ ngược sóng nhiễu để truyền dữ liệu đến máy thu ($a = 4$), số gói tin tán xạ ngược thành công là d_n^J gói tin trong đó $0 < d_n^J \leq \hat{d}_n^J$. (Trong đó \hat{d}_n^J là số gói tin tối đa mà máy phát có thể tán xạ ngược ở cường độ nhiễu là P_n^J).

Ngoài ra khi máy gây nhiễu tấn công ($j = 1$), máy phát có gói tin trong bộ đệm ($d > 0$) và có đủ năng lượng ($e \geq e_t$), nó còn có thể lựa chọn phát gói tin với tốc độ r_m ($a = 4 + m$), để truyền chủ động gói tin theo kỹ thuật RA, số gói tin truyền thành công đến máy thu là d_m^r trong đó $0 < d_m^r \leq \hat{d}_m^r$. (\hat{d}_m^r là số gói tin tối đa mà máy phát có thể phát thành công nếu máy phát phát với tốc độ r_m).

Trong các trường hợp còn lại, khi máy phát không truyền thành công gói tin đến máy thu thì giá trị phần thưởng tức thời là 0.

3.2.4. Hàm mục tiêu

Mục tiêu của bài toán tối ưu là tìm ra một chính sách tối ưu cho máy phát, được kí hiệu là π^* , nhằm làm tối đa hoá giá trị thông lượng trung bình của hệ thống. Cụ thể π^* là ánh xạ từ một trạng thái nhất định của hệ thống (trạng thái nhiễu, trạng thái bộ đệm dữ liệu và trạng thái năng lượng của máy phát) đến một hành động tối ưu ở trạng thái đó. Công thức hàm mục tiêu được xác định như sau:

$$\max_{\pi} R(\pi) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \mathbb{E}(r_k(s_k, \pi(s_k))) \quad (53)$$

trong đó, $R(\pi)$ là giá trị thông lượng trung bình của máy phát tuân theo π .

$r_k(s_k, \pi(s_k))$ là giá trị phần thưởng tức thời ở thời điểm k sau khi thực hiện hành động a_k ở trạng thái s_k .

$\pi(s_k) = a_k$ là hành động tại thời điểm k tuân theo chính sách π .

Do trong mô hình MDP được xây dựng cho bài toán này, các trạng thái trong không gian trạng thái \mathcal{S} thuộc cùng một lớp liên kết trong chuỗi Markov, nên chuỗi Markov này là chuỗi không thể giảm bớt. Khiến cho với mọi chính sách π , thông lượng trung bình $R(\pi)$ là một giá trị xác định và không phụ thuộc vào trạng thái bắt đầu của chuỗi.

3.3. Áp dụng phương pháp học tăng cường Q-learning và học tăng cường sâu DQN để chống nhiễu

Trong hệ thống được đề xuất ở trên, máy phát không xác định được cụ thể mức độ nhiễu mà UAV gây ra trên kênh truyền, cũng như chiến lược tấn công của UAV để có thể tìm ra được chính sách tối ưu π^* để tối đa hoá thông lượng kênh truyền. Do đó chúng ta sẽ áp dụng các thuật toán học tăng cường để giúp máy phát học được thông tin về chiến lược tấn công của UAV, cường độ của sóng nhiễu và những khả năng liên quan, qua đó tìm ra được chiến lược đối phó với máy gây nhiễu, hay nói cách khác là lựa chọn những hành động đúng trong không gian hành động \mathcal{A} để đạt được thông lượng trung bình cao nhất.

3.3.1. Sử dụng thuật toán học tăng cường Q-learning

Thuật toán Q-learning sử dụng một bảng gọi là bảng Q nhằm lưu giữ giá trị của các cặp trạng thái và hành động tương ứng của máy phát. Dựa trên trạng thái hiện tại, máy phát đưa ra hành động dựa trên chiến lược phòng thủ hiện tại của nó. Sau khi thực hiện

hành động, máy phát quan sát phần thưởng nhận được và trạng thái tiếp theo sau đó tiến hành cập nhật bảng Q, thực hiện việc này lặp đi lặp lại nhiều lần. Bằng cách này, máy phát có thể học cách đưa ra quyết định đúng dựa trên kinh nghiệm của chính nó, qua đó đạt được một chiến lược phòng thủ tối ưu π^* : là một liên kết giữa trạng thái và hành động tương ứng mà máy phát sẽ lựa chọn để tối đa hoá thông lượng, giảm số gói tin bị mất khi bị UAV tấn công.

Kí hiệu $V_\pi(s)$ là giá trị phần thưởng kì vọng mà máy phát sẽ nhận được khi tuân theo chính sách π ở trạng thái $s \in \mathcal{S}$, theo công thức Bellman (17) ta có:

$$V_\pi(s) = \mathbb{E}_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} | s_0 = s \right\} = \mathbb{E}_\pi [r + \gamma V_\pi(s_{t+1}) | s_0 = s] \quad (54)$$

Với $0 \leq \gamma < 1$ là hệ số chiết khấu, đại diện cho sự đánh đổi giữa phần thưởng tức thời và phần thưởng trong tương lai, nếu γ gần giá trị 0, thuật toán sẽ lựa chọn những hành động để tối đa giá trị phần thưởng tức thời, còn nếu γ gần với giá trị 1, máy phát sẽ lựa chọn những hành động để tối đa hoá giá trị phần thưởng tích lũy về lâu dài, hay nói cách khác là tác nhân sẽ nhìn xa trông rộng hơn.

Tìm ra chính sách tối ưu π^* là mục tiêu của thuật toán này, hàm giá trị tối ưu và hàm giá trị hành động tối ưu được định nghĩa như sau (24), (25):

$$V^*(s) = \max_a \mathbb{E}[r(s, a, s') + \gamma V^*(s')] \quad (55)$$

$$Q^*(s, a) = \mathbb{E}[r(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') | s_t = s, a_t = a] \quad (56)$$

Hàm giá trị tối ưu có mối quan hệ với hàm giá trị hành động tối ưu như sau:

$$V^*(s) = \max_{a \in \mathcal{A}} Q^*(s, a) \quad (57)$$

Thuật toán Q-learning là thuật toán TD với cơ chế lựa chọn hành động tiếp theo không theo chính sách hiện tại mà lựa chọn hành động có giá trị $Q(s, a)$ cao nhất. Bằng việc thực hiện phép lặp và cập nhật giá trị hàm $Q(s, a)$ liên tiếp, hàm $Q(s, a)$ sẽ hội tụ đến một chiến lược tối ưu π^* . Hàm $Q(s, a)$ được cập nhật như sau:

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t [r_t(s_t, a_t, s_{t+1}) + \gamma \max_{a_{t+1}} Q_t(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q_t(s_t, a_t)] \quad (58)$$

Biểu thức $\delta = r_t(s_t, a_t, s_{t+1}) + \gamma \max_{a_{t+1}} Q_t(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q_t(s_t, a_t)$ là giá trị thể hiện sự sai khác giữa giá trị hàm Q được dự đoán và giá trị hàm Q hiện tại. Hệ số α_t gọi là tốc độ học, định nghĩa tác động của giá trị mới lên giá trị hiện tại. Để đảm bảo thuật toán Q-learning hội tụ, tìm được chính sách tối ưu, tốc độ học α_t thoả mãn những điều kiện sau:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \alpha_t(s, a) = \infty, \text{ và } \sum_{t=0}^{\infty} \alpha_t^2(s, a) < \infty \quad (59)$$

Algorithm 4 Thuật toán chống nhiễu dựa trên lập bảng Q-learning

- 1: **Initialize** $Q_0(s, a) = 0 \forall s, a$, learning rate α and discount factor γ
 - 2: **for** $t = 1$ to T **do**
 - 3: From current state s_t , choose action a_t based on ϵ -greedy and execute, obtain the immediate reward r_t and new state s_{t+1} . Select an action a_{t+1} based on the state s_{t+1} and then update the table entry for $Q(s_t, a_t)$ as follows:
$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t[r_t(s_t, a_t, s_{t+1}) + \gamma \max_{a_{t+1}} Q_t(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q_t(s_t, a_t)]$$
 - 4: Replace $s_t \leftarrow s_{t+1}$
 - 5: **end for**
 - 6: **Output:** $\pi^*(s) = \arg \max_a Q^*(s, a)$
-

Hành động a được lựa chọn theo chiến lược ϵ -greedy như sau:

$$a = \begin{cases} \arg \max Q(s, a) & \text{với xác suất } 1 - \epsilon, \\ \text{ngẫu nhiên} & \text{với xác suất } \epsilon. \end{cases}$$

Giá trị ϵ cần giảm dần theo thời gian nhưng đồng thời cũng không được giảm quá nhanh để tác nhân có thể khám phá được những hành động mới tốt hơn.

3.3.2. Phương pháp học tăng cường sâu DQN

Vấn đề của thuật toán Q-learning là tốc độ hội tụ thấp, đồng thời không khả thi với bài toán dữ liệu nhiều chiều. Ngoài ra với thuật toán lập bảng Q-learning, khi có số lượng lớn các hành động và trạng thái, thuật toán gặp vấn đề bộ nhớ khi kích thước bảng Q lớn, do không gian trạng thái \mathcal{S} và không gian hành động \mathcal{A} lớn, số lượng cặp trạng thái - hành động (s, a) cũng sẽ rất lớn, điều này dẫn đến bảng Q cần phải lưu trữ một lượng dữ liệu khổng lồ. Tốc độ cập nhật bảng Q và tốc độ hội tụ cũng sẽ chậm hơn rất nhiều.

Ở đây em đề xuất một thuật toán tìm ra chiến lược phòng thủ tối ưu cho máy phát dựa trên học sâu sử dụng mạng thần kinh nhân tạo. Thuật toán học sâu DQN được đề xuất bởi Google Deepmind sử dụng mạng thần kinh sâu để ước tính giá trị xấp xỉ của hàm giá trị hành động tối ưu $Q^*(s, a)$. Thuật toán sử dụng một số cơ chế sau:

- Cơ chế lưu trữ, phát lại trải nghiệm: Thuật toán sử dụng một bộ nhớ phát lại D , là bể dữ liệu để lưu các kinh nghiệm của quá trình chuyển đổi trạng thái (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) thay vì ngay lập tức đào tạo mạng thần kinh sử dụng các cặp trạng thái hành động diễn ra trong quá trình trải nghiệm. Tiến hành lấy ngẫu nhiên từ bể dữ liệu, sau đó đưa vào mạng thần kinh sâu để đào tạo. Cách làm này giúp thuật toán học hiệu quả những kinh nghiệm cũ nhiều lần và loại bỏ mối tương quan trong các mẫu.

- Sử dụng một mạng \hat{Q} mục tiêu: Trong thuật toán DQN, ta sử dụng hai mạng thần kinh sâu có kiến trúc giống hệt nhau, một mạng \hat{Q} mục tiêu và một mạng Q chính. Việc sử dụng mạng \hat{Q} mục tiêu giúp cải thiện tính ổn định trong quá trình học. Cụ thể, mạng \hat{Q} mục tiêu giảm thiểu sự dao động mạnh mẽ của giá trị $Q(s, a)$ bằng cách cập nhật ít thường xuyên hơn so với mạng Q chính. Điều này giúp giảm hiện tượng ước lượng quá mức và tránh làm mất ổn định quá trình học, nhờ đó quá trình hội tụ trở nên ổn định và nhanh chóng hơn.

Algorithm 5 Thuật toán chống nhiễu sử dụng DQN.

- 1: Initialize replay memory D
 - 2: Initialize the Q -network Q with random weights θ .
 - 3: Initialize the target Q -network \hat{Q} with weight $\theta' = \theta$.
 - 4: **for** $t = 1$ to T **do**
 - 5: With probability ϵ select a random action a_t , otherwise select $a_t = \arg \max Q^*(s_t, a_t, \theta)$
 - 6: Perform action a_t and observe reward r_t and next state s_{t+1}
 - 7: Store transition (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) in the replay memory D
 - 8: Sample random mini-batch of transitions (s_j, a_j, r_j, s_{j+1}) from D
 - 9: $y_j = r_j + \gamma \max_{a_{j+1}} \hat{Q}(s_{j+1}, a_{j+1}, \theta')$
 - 10: Perform a gradient descent step on $(y_j - Q(s_j, a_j, \theta))^2$.
 - 11: Every C steps reset $\hat{Q} = Q$
 - 12: **end for**
-

Trong thuật toán DQN ở trên quá trình đào tạo bao gồm T tập. Trong mỗi tập, ở trạng thái hiện tại, tác nhân lựa chọn một hành động dựa trên chiến lược tham lam ϵ . Ban đầu, hành động được lựa chọn theo một chính sách ngẫu nhiên, sau khi học được kinh nghiệm từ phần thưởng nhận được, tác nhân dần xác định một chính sách cố định mà ở đó thu được nhiều phần thưởng nhất. Cụ thể thì ban đầu giá trị ϵ là một số gần với 1, sau đó giảm dần xuống một giá trị nhỏ dựa trên một hệ số suy giảm nhất định. Điều này giúp tác nhân tự do khám phá những hành động tiềm năng từ lúc bắt đầu, càng về sau, khi giá trị ϵ giảm, tác nhân sẽ chọn những hành động có giá trị Q lớn nhất, nhằm khai thác những kiến thức đã học được để tối đa hóa phần thưởng. Điều này giúp thuật toán học hỏi một cách hiệu quả, vừa đảm bảo sự ổn định trong quá trình huấn luyện, vừa đảm bảo khả năng khai thác khám phá để tối ưu chiến lược về dài hạn. Hành động a được lựa chọn cũng tuân theo chính sách ϵ tham lam, trong đó giá trị ϵ giảm dần theo thời gian như mô tả ở trên:

$$a = \begin{cases} \arg \max Q(s, a) & \text{với xác suất } 1 - \epsilon, \\ \text{ngẫu nhiên} & \text{với xác suất } \epsilon. \end{cases}$$

Sau đó, tác nhân tiến hành thực hiện hành động, quan sát trạng thái kế tiếp và nhận về phần thưởng. Quá trình chuyển đổi này được lưu trong bộ nhớ phát lại D để cho quá trình đào tạo về sau.

Trong quá trình học tập, một số mẫu được lấy ngẫu nhiên từ bộ nhớ phát lại D và được đưa vào mạng thần kinh. Thuật toán cập nhật tham số mạng bằng giảm thiểu hàm mất mát sai số bình phương trung bình sử dụng SGD:

$$L_i(\theta_i) = \mathbb{E}_{(s,a,r,s') \sim U(D)} \left[\left(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta'_i) - Q(s, a; \theta_i) \right)^2 \right] \quad (60)$$

trong đó, θ_i là tham số của mạng chính Q ở tập đào tạo thứ i và θ'_i là tham số của mạng mục tiêu \hat{Q} .

Hàm độ dốc của hàm mất mát trong thuật toán DQN:

$$\Delta_{\theta_i} L(\theta_i) = \mathbb{E}_{(s,a,r,s')} [(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta'_i) - Q(s, a; \theta_i)) \Delta_{\theta_i} Q(s, a; \theta_i)] \quad (61)$$

Sau C bước, thuật toán cập nhật tham số mạng mục tiêu θ'_i với tham số của mạng chính θ_i .

Sau khi quá trình đào tạo kết thúc, tham số từ mạng chính Q được sử dụng để giúp máy phát đưa ra quyết định để tối ưu hoá thông lượng.

Chương 4.

Thiết lập mô phỏng và đánh giá hiệu năng

Trong chương này, khoá luận trình bày thông số cài đặt chi tiết của thuật toán học tăng cường Q-learning và học tăng cường sâu DQN, thực hiện mô phỏng bài toán tối ưu như đã trình bày ở trên và tiến hành so sánh hiệu năng trong trường hợp áp dụng phương pháp được đề xuất sử dụng DQN và phương pháp chống nhiễu ”tham lam” (greedy) không sử dụng học tăng cường.

4.1. Thông số cài đặt thử nghiệm

4.1.1. Thông số hệ thống

Trong hệ thống đang được xem xét, máy phát có thể lưu trữ tối đa $D = 10$ gói tin trong hàng đợi dữ liệu, tối đa $E = 10$ đơn vị năng lượng trong bộ lưu trữ năng lượng. Dữ liệu đến máy phát giả định tuân theo phân phối Poisson với tốc độ trung bình $\lambda = 3$ gói tin. Khi UAV gây nhiễu không tấn công, máy phát có thể truyền chủ động tối đa $\hat{d}_t = 4$ gói tin đến máy thu. Mỗi gói tin truyền đi cần $e_t = 1$ đơn vị năng lượng. Do sự thay đổi vị trí của UAV như đã nói ở trên, công suất gây nhiễu của UAV cũng thay đổi, giả định tín hiệu nhiễu từ UAV ảnh hưởng đến đường truyền không dây đang xét gồm bốn mức $P_J = \{0W, 5W, 10W, 15W\}$ với $P_{\max} = 15W$. Do lượng năng lượng thu hoạch được cũng như số gói tin tán xạ ngược thành công tăng lên khi tín hiệu nhiễu mạnh hơn, đặt $e = \{0, 1, 2, 3\}$ là số đơn vị năng lượng mà máy phát có thể thu được và $\hat{d} = \{0, 1, 2, 3\}$ là số gói tin mà máy phát có thể tán xạ ngược đến máy thu tương ứng với mức công suất nhiễu ảnh hưởng tới đường truyền. Ngoài ra, khi UAV tấn công gây nhiễu và máy phát sử dụng kỹ thuật RA, nó có thể truyền $d_m^r = \{2, 1, 0\}$ gói tin tương ứng với cường độ tín hiệu nhiễu từ UAV $P_n^J = \{5W, 10W, 15W\}$. Nếu không đề cập cụ thể về cường độ nhiễu trung bình trong từng thử nghiệm, mặc định công suất nhiễu trung bình trong thử nghiệm là $P_{\text{avg}} = 7W$.

4.1.2. Thông số cài đặt thuật toán Q-learning và DQN

4.1.2.1. Thuật toán Q-learning

Trong mô phỏng tìm ra chiến lược tối ưu cho mô hình hệ thống ở trên sử dụng thuật toán Q-learning, ta đặt các thông số như sau: tốc độ học $\alpha = 0.1$, hệ số chiết khấu $\gamma = 0.9$. Ngoài ra còn áp dụng chiến lược ϵ tham lam với $\epsilon = 1$, giá trị ϵ giảm dần xuống giá trị $\epsilon_{\min} = 0.01$, với tốc độ giảm giá trị $\epsilon_{\text{decay}} = 0.01$. Số lần lặp $T = 10^6$.

4.1.2.2. Thuật toán DQN

Trong mô phỏng thuật toán DQN, kiến trúc của mạng mục tiêu \hat{Q} và mạng chính Q là như nhau: mô hình sử dụng kiến trúc DQN chuẩn, gồm ba lớp ẩn với 512, 256, và 64 neuron, mỗi lớp sử dụng hàm kích hoạt tanh. Lớp đầu ra có $M + 4$ neuron tương ứng với kích cỡ không gian hành động của hệ thống và sử dụng hàm kích hoạt linear để xuất ra giá trị Q cho từng hành động. Giá trị ban đầu của ϵ trong chiến lược ϵ tham lam là $\epsilon = 1$, $\epsilon_{\min} = 0.01$, hệ số suy giảm giá trị ϵ là $\epsilon_{\text{decay}} = 0.9999$. Tốc độ học (learning rate) là $\alpha = 0.0001$. Kích cỡ của bộ nhớ phát lại là $D = 10000$, số mẫu được lấy ngẫu nhiên ở mỗi lần đào tạo mạng từ bộ nhớ phát lại (mini-batch) là 32 mẫu, mạng mục tiêu \hat{Q} được cập nhật tham số với tần suất là sau 5000 bước huấn luyện.

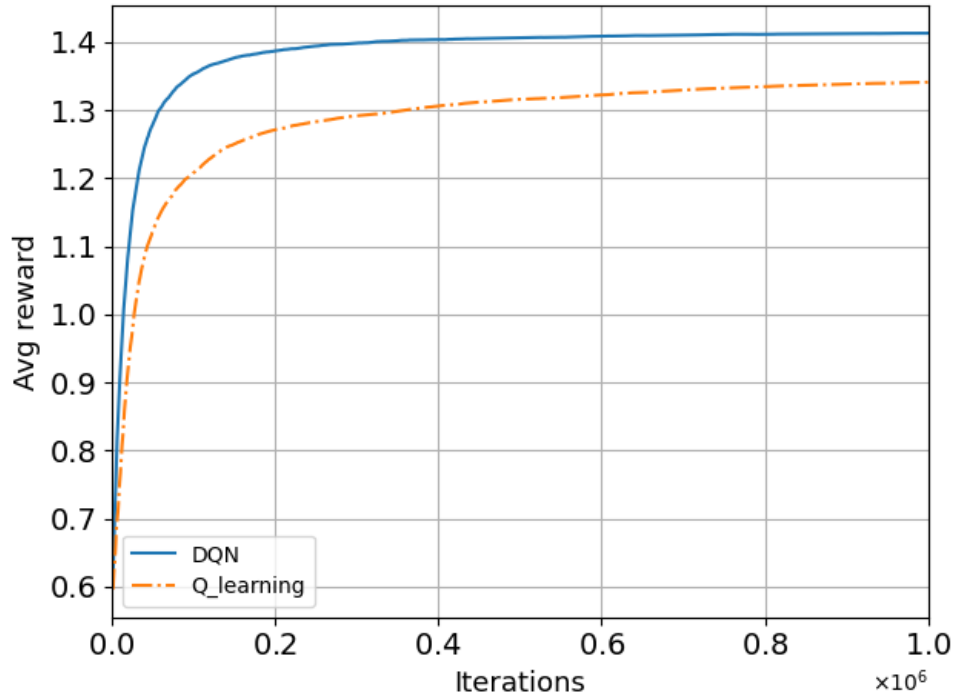
4.2. Kết quả mô phỏng

4.2.1. So sánh sự hội tụ của hai thuật toán học tăng cường Q và DQN

Trong Hình 4.1, chúng ta thực hiện so sánh quá trình học để tiến đến trạng thái hội tụ của hai phương pháp DQN và Q-learning trong bài toán chống nhiễu với các thông số môi trường như trên. Ta có thể thấy tốc độ hội tụ của thuật toán DQN là nhanh hơn so với thuật toán Q-learning. Thậm chí sau 10^6 lần lặp, thuật toán Q-learning vẫn chưa đạt đến trạng thái hội tụ tối ưu. Điều này là do DQN với việc sử dụng mạng thần kinh sâu, kết hợp với việc học hỏi lại từ kinh nghiệm nhiều lần khiến nó có thể học chiến lược gây nhiễu hiệu quả hơn, qua đó đưa ra quyết định tối ưu hơn.

4.2.2. So sánh với chiến lược phòng thủ "greedy" không sử dụng DRL

Ở đây, chúng ta thực hiện so sánh giữa việc sử dụng phương án DQN được đề xuất và chiến lược phòng thủ cố định "greedy" được mô tả như sau: (i) Khi UAV gây nhiễu không tấn công kênh truyền, máy phát sẽ phát chủ động gói tin đến máy thu, (ii) Khi UAV gây nhiễu tấn công kênh truyền, máy phát sẽ tận dụng sóng nhiễu từ UAV để thu năng lượng hoặc tán xạ ngược đan xen nhau theo một chu kì cố định - máy phát sẽ tiến hành thu năng lượng từ sóng nhiễu sau mỗi chu kì $T_{\text{harvest}} = 5$ đơn vị thời gian, thời gian còn lại máy phát sẽ tiến hành tán xạ ngược sóng nhiễu để truyền dữ liệu đến máy thu. Ta gọi chiến lược này là chiến lược phòng thủ cố định "greedy" do nó có xu hướng tham lam khi bị tấn công bằng cách ưu tiên việc tán xạ ngược gói tin khi xảy ra nhiễu. Với phương án sử dụng DQN được đề xuất, em thực hiện 4×10^4 lần lặp để tìm ra chiến lược tối ưu cho máy phát và sau đó so sánh hiệu quả với chiến lược tham lam đã nêu ở trên. Ba thông số được sử dụng để so sánh là thông lượng trung bình, số gói tin mất mát trung bình và PDR (4).



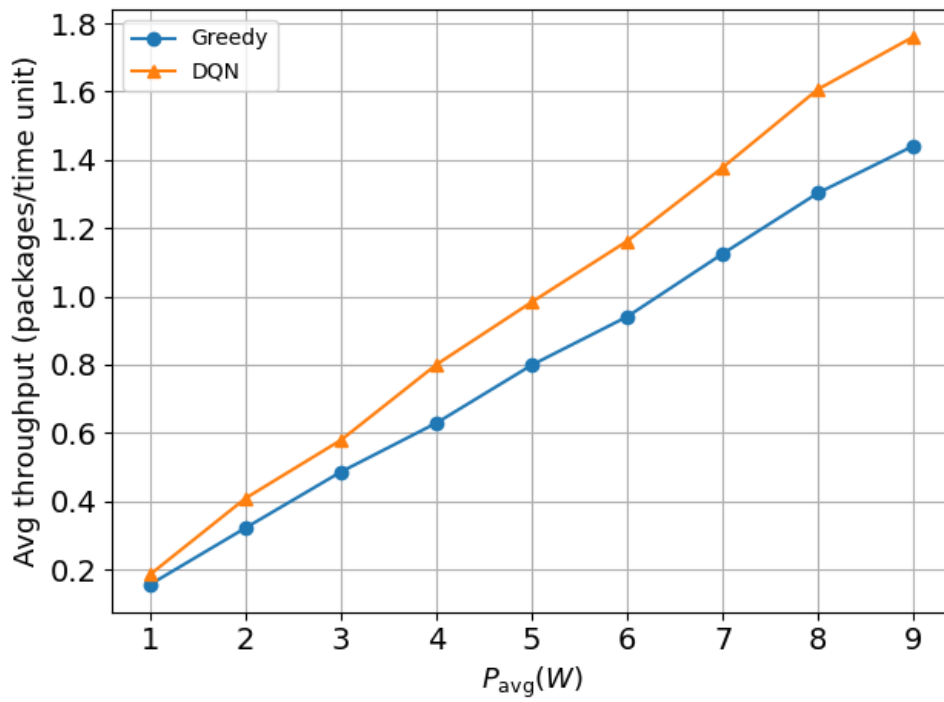
Hình 4.1. Tỷ lệ hội tụ giữa DQN và Q learning.

4.2.2.1. Đánh giá hiệu quả khi thay đổi công suất nhiễu

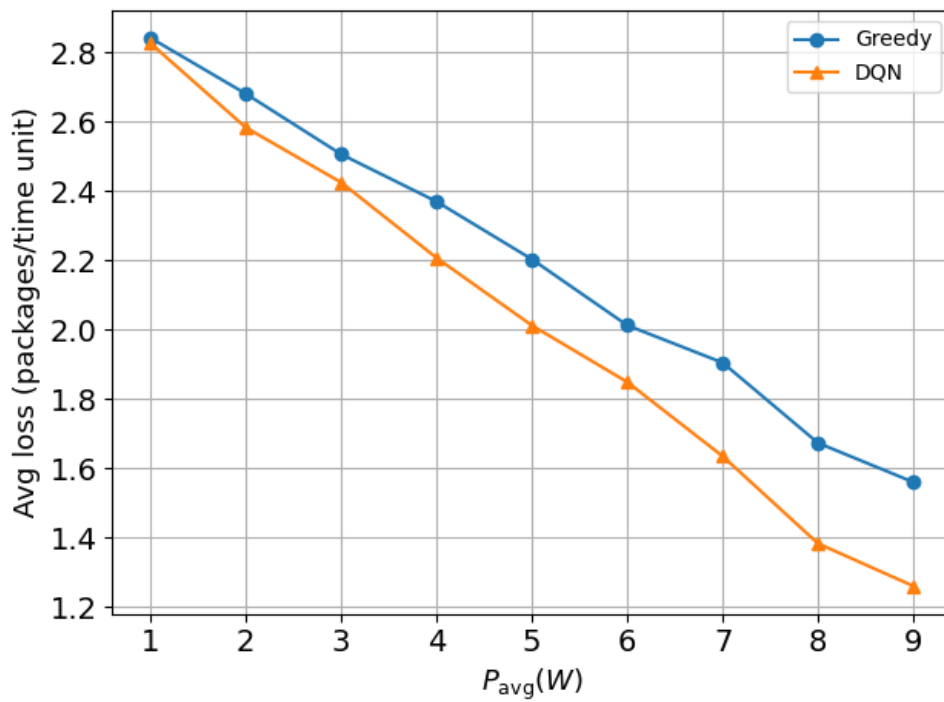
Trong Hình 4.2, Hình 4.3, Hình 4.4, thực hiện mô phỏng thay đổi công suất nhiễu trung bình của UAV gây nhiễu, dễ nhận thấy khi công suất gây nhiễu trung bình tăng lên, tức là máy gây nhiễu tấn công kênh truyền với mức năng lượng lớn cùng tần suất tấn công cao hơn dẫn đến khả năng tán xạ ngược sóng nhiễu và khả năng thu năng lượng từ sóng nhiễu cũng tăng lên ở cả 2 phương án khi công suất nhiễu trung bình tăng lên. Điều này đã làm cải thiện hiệu năng của hệ thống (thông lượng tăng, số gói tin mất mát giảm và tỉ lệ truyền thành công cao hơn). Tuy nhiên với phương án đề xuất sử dụng học tăng cường sâu, đã giúp máy thu thích ứng được với sự khó đoán định của môi trường nhiễu, cũng như thích ứng với chiến lược tấn công dẫn đến tốc độ cải thiện hiệu năng hệ thống của phương án đề xuất là cao hơn so với phương án sử dụng chiến lược “tham lam” cố định ở trên. Khi công suất trung bình của máy gây nhiễu thấp, dễ nhận thấy 2 phương án có hiệu suất khá tương đồng do lúc này máy phát gần như không có cơ hội tận dụng sóng nhiễu bằng cách thu năng lượng hay tán xạ ngược để truyền gói tin, tuy nhiên khi công suất nhiễu trung bình càng tăng lên, sự hiệu quả của phương án đề xuất càng thấy rõ.

4.2.2.2. Đánh giá hiệu quả khi thay đổi số gói tin có thể phát chủ động \hat{d}_t

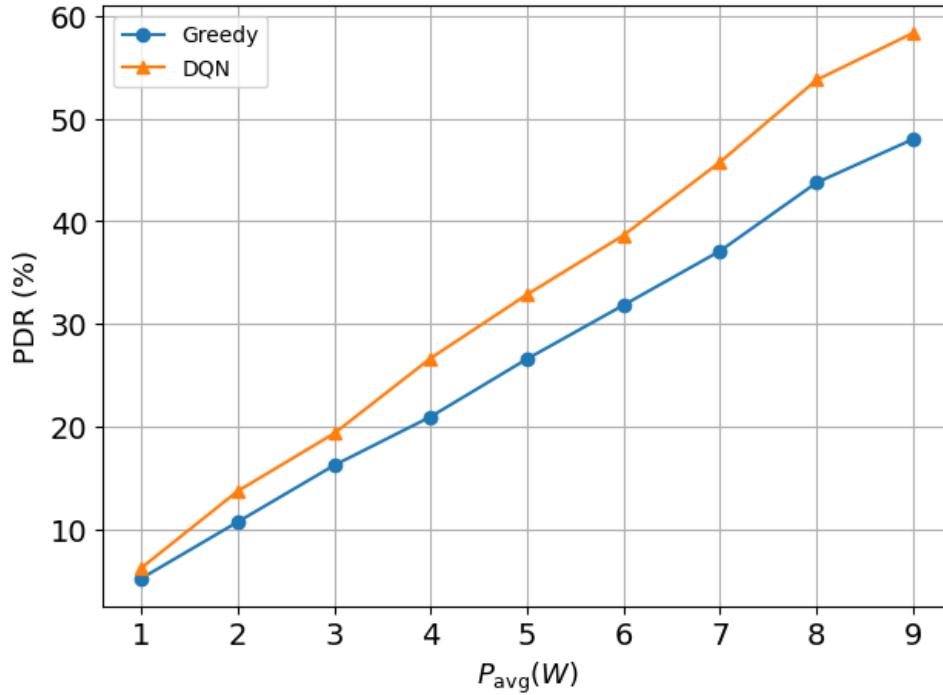
Thử nghiệm được thực hiện với công suất nhiễu $P_{\text{avg}} = 7W$, trong thử nghiệm ở Hình 4.5, Hình 4.6, Hình 4.7 này ta thực hiện thay đổi số gói tin tối đa mà máy phát có



Hình 4.2. So sánh thông lượng trung bình giữa DQN và Greedy P_{avg} thay đổi.



Hình 4.3. So sánh số gói tin mất mát giữa DQN và Greedy P_{avg} thay đổi.



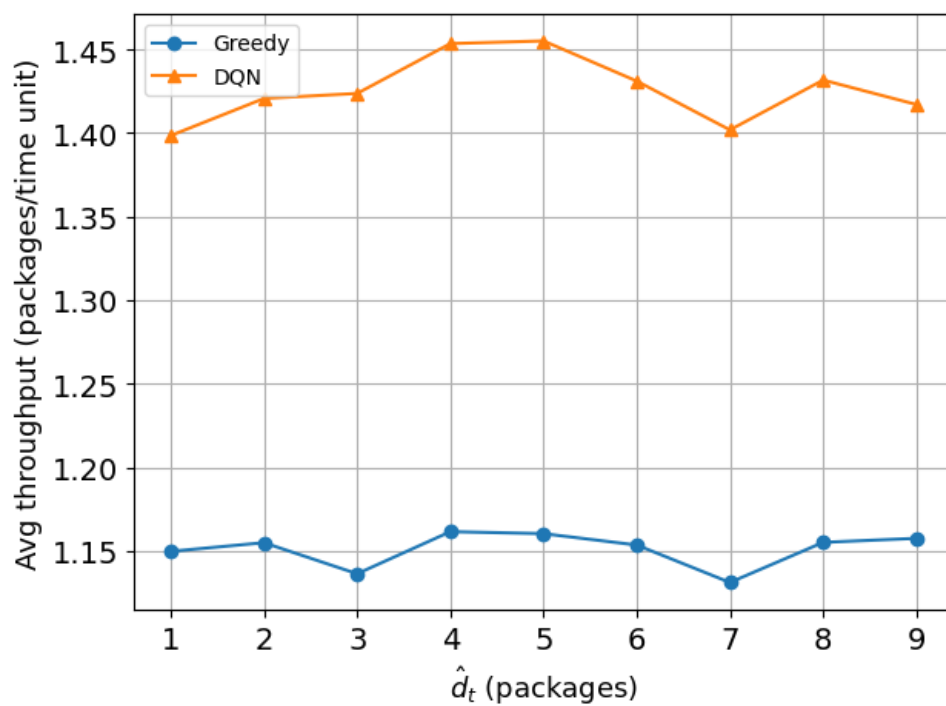
Hình 4.4. So sánh PDR giữa DQN và Greedy P_{avg} thay đổi.

thể phát chủ động đến máy thu. Dễ dàng nhận thấy phương pháp được đề xuất sử dụng DQN vẫn có hiệu năng tốt hơn so với chiến lược phòng thủ ”greedy”.

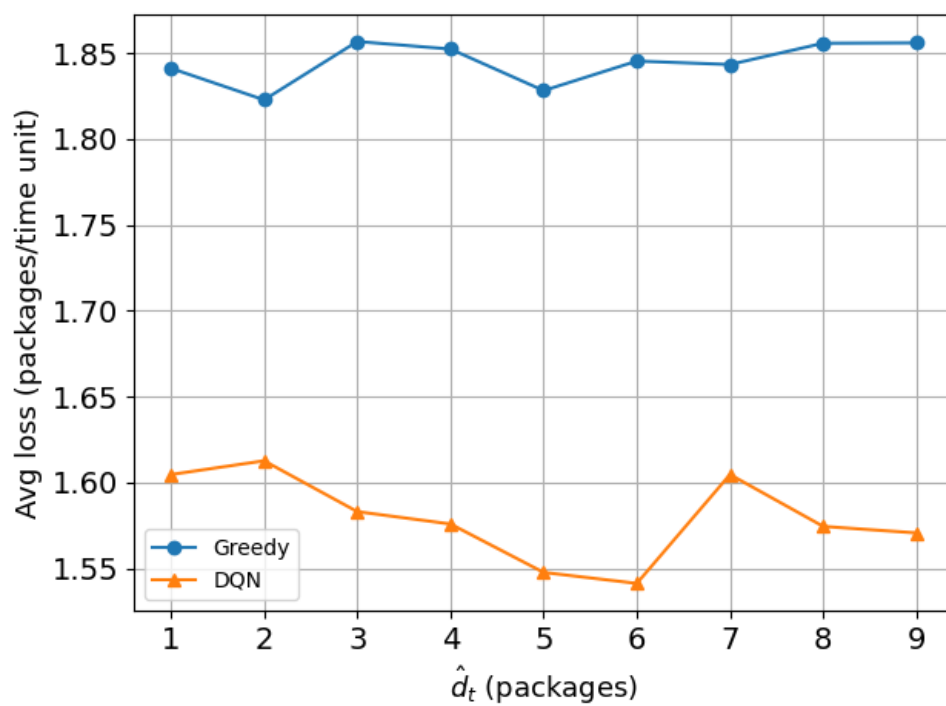
4.2.2.3. Đánh giá hiệu quả khi thay đổi chu kỳ thu năng lượng $T_{harvest}$ của máy thu trong phương án sử dụng chiến lược phòng thủ cố định ”greedy”

Trong mô phỏng Hình 4.8, Hình 4.9, Hình 4.10, ta thay đổi giá trị $T_{harvest}$ - chu kỳ thu năng lượng của phương án phòng thủ ”greedy”. $T_{harvest}$ càng lớn, máy phát càng ít thu năng lượng hơn và ngược lại. Công suất nhiễu trung bình trong mô phỏng này $P_{avg} = 7W$ - là một trường hợp UAV tấn công kênh truyền khá thường xuyên, dẫn đến máy phát không có nhiều cơ hội phát gói tin thông qua phát chủ động mà chủ yếu truyền tin thông qua kỹ thuật tán xạ ngược. Do đó nếu giá trị $T_{harvest}$ nhỏ, tức là tần suất máy phát thu năng lượng nhiều hơn, trong khi không có cơ hội phát chủ động do UAV tấn công kênh truyền với xác suất cao, ta thấy hiệu năng của hệ thống đạt kết quả thấp. Khi $T_{harvest}$ tăng lên, tức là tần suất thu năng lượng nhỏ lại, lúc này máy phát tán xạ ngược gói tin đến máy thu nhiều hơn, dẫn đến hiệu năng hệ thống tăng nhanh. Tuy nhiên khi chu kỳ thu năng lượng tăng đến giá trị 5 đơn vị thời gian thì hiệu quả của hệ thống với chiến lược ”greedy” gần như không thay đổi nhiều, do lúc này máy phát chủ yếu lựa chọn tán xạ ngược thay vì thu năng lượng để chờ cơ hội phát chủ động, dẫn đến hiệu quả tán xạ ngược đã đạt gần giá trị tối ưu, hệ thống đạt hiệu năng ổn định.

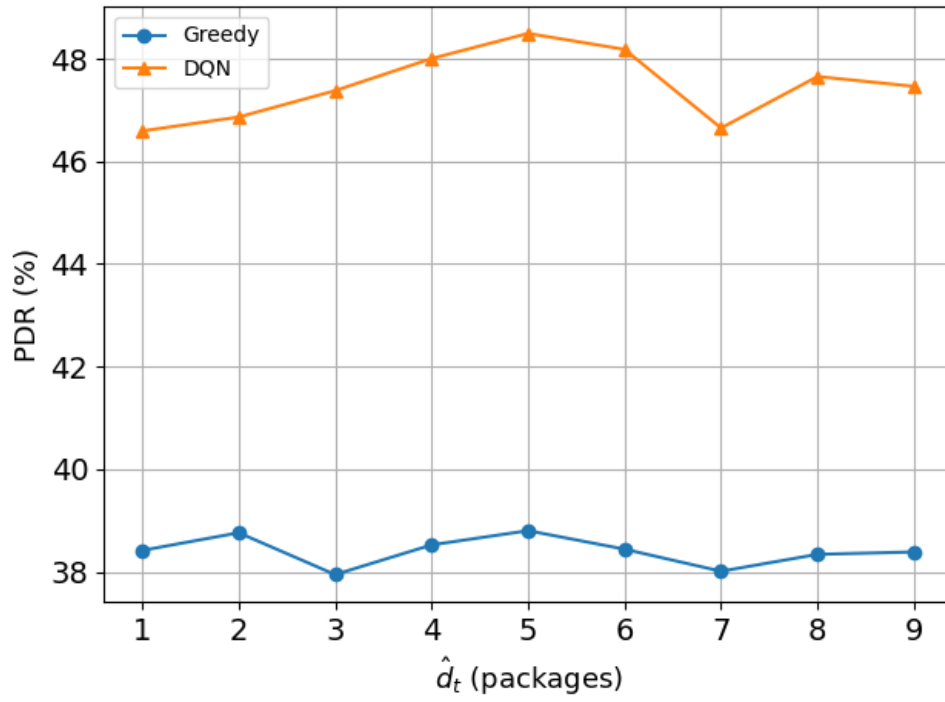
Tuy nhiên so với phương án đề xuất sử dụng DQN, ta vẫn nhận thấy phương án đề xuất đạt hiệu năng tốt hơn.



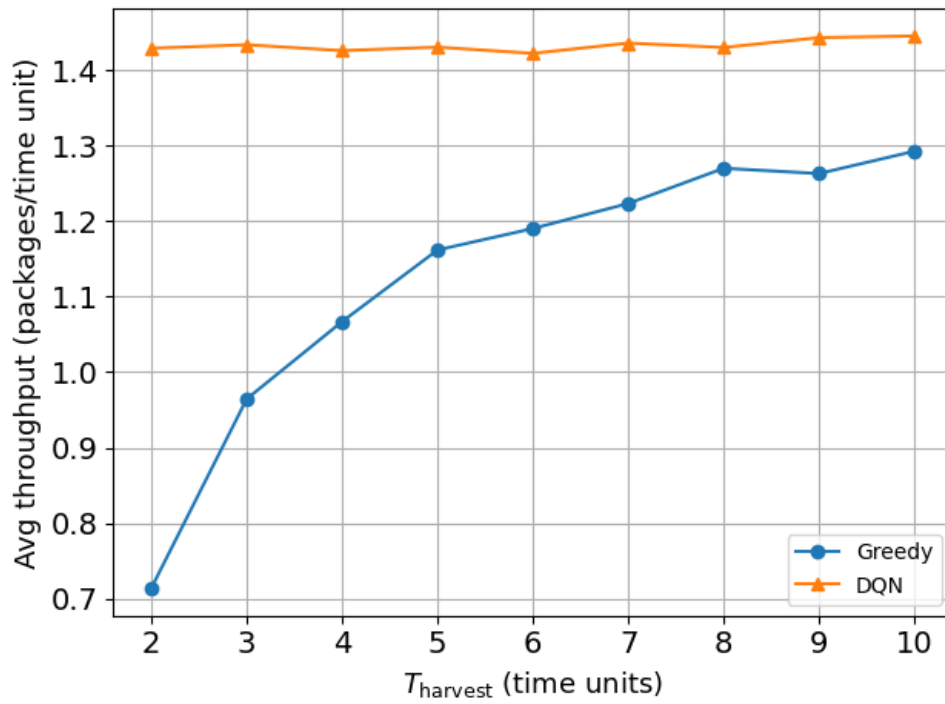
Hình 4.5. So sánh thông lượng trung bình giữa DQN và Greedy \hat{d}_t thay đổi.



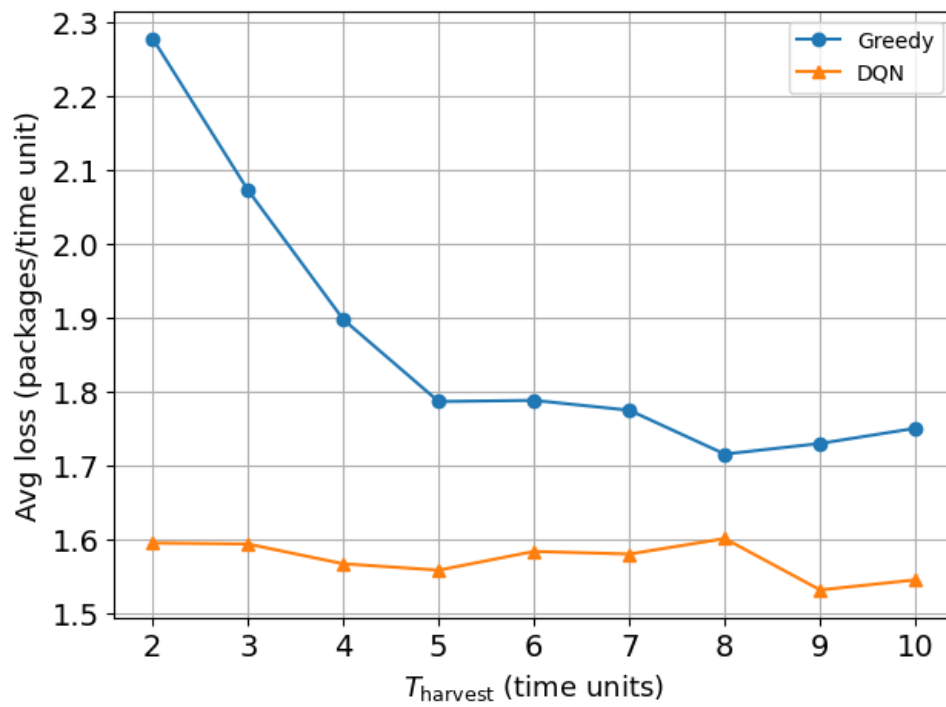
Hình 4.6. So sánh số gói tin mất mát giữa DQN và Greedy \hat{d}_t thay đổi.



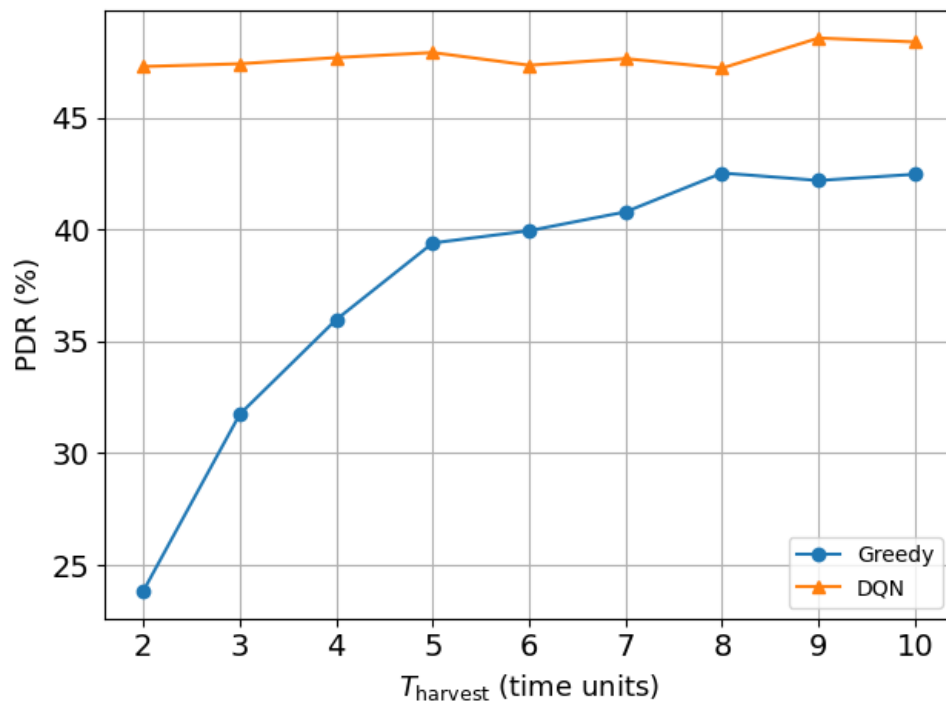
Hình 4.7. So sánh PDR giữa DQN và Greedy \hat{d}_t thay đổi.



Hình 4.8. So sánh thông lượng trung bình giữa DQN và Greedy T_{harvest} thay đổi.



Hình 4.9. So sánh số gói tin mất mát giữa DQN và Greedy T_{harvest} thay đổi.



Hình 4.10. So sánh PDR giữa DQN và Greedy T_{harvest} thay đổi.

4.2.2.4. Kết luận mô phỏng so sánh DQN và chiến lược greedy

Nhận thấy rằng, trong tất cả các mô phỏng đã thực hiện ở trên, phương án đề xuất sử dụng DQN mang lại hiệu năng của hệ thống tốt hơn so với chiến lược phòng thủ cố định "greedy" không sử dụng học tăng cường. Rõ ràng với khả năng học được chiến lược tấn công của UAV và đưa ra hành động chính xác, phù hợp với từng trạng thái môi trường, nhằm tối đa hoá thông lượng kênh truyền, phương án được đề xuất sử dụng DQN thích nghi và tận dụng cuộc tấn công gây nhiễu từ UAV tốt hơn so với một chiến lược phòng thủ cố định từ trước, không sử dụng học tăng cường - ở đây cụ thể là chiến lược "greedy" như đã trình bày ở trên.

Kết luận

Trong khoá luận này, một phương pháp chống nhiễu cho hệ thống truyền thông không dây sử dụng DQN đã được đề xuất, để chống lại cuộc tấn công từ thiết bị gây nhiễu gắn trên UAV. Máy phát trong trường hợp này có thể tận dụng sóng nhiễu từ thiết bị tấn công để thu năng lượng phục vụ hoạt động truyền gói tin chủ động khi không bị tấn công, hoặc điều chỉnh tốc độ phát thích hợp, hoặc tận dụng sóng nhiễu để tán xạ ngược gói tin đến máy thu. Dựa trên việc xây dựng mô hình hệ thống truyền thông này như một bài toán tối ưu sử dụng mô hình MDP, khoá luận đã sử dụng các thuật toán học tăng cường như Q-learning và DQN để giúp máy phát tìm ra được chiến lược phòng thủ tối ưu trước cuộc tấn công gây nhiễu, qua đó tối đa hoá thông lượng trung bình của hệ thống, giảm số gói tin bị mất mát trên đường truyền. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng, với việc sử dụng các thuật toán học tăng cường, thông lượng của hệ thống cũng như số gói tin mất mát và tỉ lệ truyền gói tin thành công đều tăng lên rõ rệt so với việc sử dụng một chiến lược chống nhiễu cố định. Qua đó giúp hệ thống không những có khả năng chống lại, mà còn tận dụng được cuộc tấn công gây nhiễu để thực hiện nhiệm vụ truyền thông tin của mình và giảm thiểu thiệt hại của cuộc tấn công gây nhiễu.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hoang, D.T. and Van Huynh, N. and Nguyen, D.N. and Hossain, E. and Niyato, D., *Deep Reinforcement Learning for Wireless Communications and Networking: Theory, Applications and Implementation*, Wiley, 2023, pp. 37-163.
- [2] Liu, Vincent and Parks, Aaron and Talla, Vamsi and Gollakota, Shyamnath and Wetherall, David and Smith, Joshua R., "Ambient backscatter: wireless communication out of thin air", *Association for Computing Machinery*, 2013, pp. 39-50.
- [3] Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., "Human-level control through deep reinforcement learning", *Nature*, vol. 518, 2015, pp. 529-533.
- [4] N. Gao, Z. Qin, X. Jing, Q. Ni and S. Jin, "Anti-Intelligent UAV Jamming Strategy via Deep Q-Networks", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, 2020, pp. 569-581.
- [5] Pirayesh, Hossein and Zeng, Huacheng, "Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, 2022, pp. 767-809.
- [6] Sutton, R.S. and Barto, A.G., *Reinforcement Learning, second edition: An Introduction*, MIT Press, 2018, pp. 37-163.
- [7] Satish Vadlamani, Burak Eksioglu, Hugh Medal, Apurba Nandi, "Jamming attacks on wireless networks: A taxonomic survey", *International Journal of Production Economics*, vol. 172, 2016, pp. 76-94.
- [8] Van Huynh, Nguyen and Nguyen, Diep N. and Hoang, Dinh Thai and Dutkiewicz, Eryk, "'Jam Me If You Can.'" Defeating Jammer With Deep Dueling Neural Network Architecture and Ambient Backscattering Augmented Communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, 2019, pp. 2603-2620.
- [9] Xu, Wenyan and Trappe, Wade and Zhang, Yanyong and Wood, Timothy, "The feasibility of launching and detecting jamming attacks in wireless networks", *Association for Computing Machinery*, 2005, pp. 46-57.