HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Phạm Anh Tuấn

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP TÁCH SÓNG MÙ TRONG HỆ THỐNG MIMO-OSTBC

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Mã số: 8.52.02.08

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(*Theo định hướng ứng dụng*)

HÀ NỘI - NĂM 2026

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Phạm Anh Tuấn

NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP TÁCH SÓNG MÙ TRONG HỆ THỐNG MIMO-OSTBC

CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Mã số: 8.52.02.08

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ KỸ THUẬT

(*Theo định hướng ứng dụng*)

GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN

TS. LÊ MINH TUẤN

TS. ĐINH VĂN KHÔI

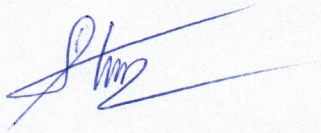
HÀ NỘI - NĂM 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả đề án



Phạm Anh Tuấn

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN i
MỤC LỤC ii
DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT iv
DANH SÁCH HÌNH VẼ v
MỞ ĐẦU 1
Chương 1 - CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ TỔNG QUAN PHƯƠNG PHÁP TÁCH SÓNG MÙ 3
1.1. Mã khối không gian - thời gian STBC và OSTBC 3
1.1.1. Khái niệm, mô hình 3
1.1.2. Phương pháp mã hóa không gian–thời gian dựa trên cấu trúc trực giao 5
1.2. Tách sóng trong hệ thống MIMO-OSTBC 9
1.2.1. Trường hợp máy thu biết chính xác kênh truyền 9
1.2.2. Ước lượng kênh truyền bằng thuật toán LSE 13
1.3. Tổng quan các phương pháp tách sóng mù 15
1.4. Tách sóng mù và bán mù trong OSTBC 17
1.4.1. Mô hình OSTBC cho nhiều khối 18
1.4.2. Tách sóng ML khi biết kênh truyền 18
1.4.3. Tiêu chuẩn ML cho tách sóng mù 18
1.4.4. Vấn đề không nhận dạng và điều kiện chuẩn hóa 19
1.4.5. Thuật toán tách sóng mù tuần hoàn (Blind Cyclic ML) 19
1.4.6. Tách sóng bán mù (Semi-Blind ML Detection) 20
1.5. Kết luận chương 22
Chương 2 - ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP TÁCH SÓNG MÙ CHO HỆ THỐNG MIMO-OSTBC 24
2.1. Một số hạn chế trong các phương pháp tách sóng mù hiện tại 24
2.2. Ý tưởng đề xuất giải pháp mới 25
2.3. Mô hình hệ thống và thuật toán đề xuất 26
2.3.1. Mô hình OSTBC với các chòm sao phức 26
2.3.2. Tách sóng mù với chòm sao phức 27

2.3.3. Sửa đổi chòm sao cho tách sóng mù....28
2.3.4. Thuật toán tách sóng mù đề xuất A-CML....32
2.3.5. Phân tích độ phức tạp tính toán bộ tách sóng A-CML....36
2.4. Kết luận chương....38
Chương 3- MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT....39
3.1. Xây dựng mô phỏng và đánh giá thực nghiệm....39
3.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận....40
3.2.1. Mô phỏng và đánh giá độ phức tạp tính toán....40
3.2.2. Mô phỏng và đánh giá phẩm chất BER hệ thống....41
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ....43
PHỤ LỤC....44
TÀI LIỆU THAM KHẢO....48

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ, CHỮ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
BER	Bit Error Rate	Tỉ lệ lỗi bit
BPSK	Binary Phase Shift Keying	Khóa dịch pha nhị phân
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
DUSTM	Differential Unitary Space Time Modulation	Điều chế không gian thời gian đơn vị vi phân
FLOP	Floating Point Operation	Số lượng phép toán dấu phẩy động
ILS	Iterative Least Squares	Thuật toán lặp bình phương tối thiểu
LSE	Least Square Error	Sai số bình phương tối thiểu
MMSE	Minimum Mean Square Error	Sai số bình phương trung bình cực tiểu
ML	Maximum Likelihood	Cực đại hóa khả năng
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Hệ thống nhiều ăng-ten phát nhiều ăng-ten thu
M-PAM	M-Pulse Amplitude Modulation	Điều chế biên độ xung M mức
M-PSK	M-Phase Shift Keying	Điều chế dịch pha M mức
M-QAM	M-Quadrature Amplitude Modulation	Điều chế biên độ cầu phương M mức
O-STBC	Orthogonal Space Time Block Coding	Mã khối không gian thời gian trực giao
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Khóa dịch pha vuông góc
SD	Symbol Detector	Bộ tách sóng ký hiệu
SDR	Semi Definite Relaxation	Phục hồi bán xác định
SNR	Signal Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên nhiễu
STE	Space Time Encoder	Bộ mã hóa không gian thời gian
STBC	Space Time Block Coding	Kỹ thuật mã khối không gian thời gian
SVD	Singular Value Decomposition	Phân tích giá trị kỳ dị

DANH SÁCH HÌNH VẼ

Hình 1.1. Sơ đồ hệ thống mã hóa STBC 08

Hình 1.2. Cấu trúc của khung truyền dẫn được hình thành từ các mã O-STBC 21

Hình 3.1. Độ phức tạp của các bộ dò A-CML, huấn luyện, bán mù và SD được đề xuất như các hàm của Q khi tách sóng OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (8, 4). Bộ tách A-CML được đề xuất áp dụng với chòm sao 64-QAM đã được sửa đổi, các bộ tách sóng khác sử dụng chòm sao 64-QAM thông thường 53

Hình 3.2. Phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (6, 2), được tách sóng bởi A-CML đề xuất và các bộ tách sóng mù và bán mù hiện có. Các ký hiệu được truyền được lấy từ các chòm sao 16-QAM thông thường và các chòm sao 16-QAM cải tiến với $\alpha = 0,5$, độ dài khung: $Q = 12$. 54

Hình 3.3. Phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (8, 4), được phát hiện bởi A-CML đề xuất và các bộ tách sóng mù và bán bù hiện có. Các ký hiệu truyền được lấy từ các chòm sao 64-QAM thông thường và các chòm sao 64-QAM cải tiến với $\alpha = 0,4$, độ dài khung: $Q = 20$. 56

MỞ ĐẦU

Các hệ thống truyền thông không dây MIMO đạt tốc độ phát triển vượt bậc trong thời gian gần đây đã đặt ra nhu cầu lớn về các kỹ thuật mã hóa tiên tiến để tận dụng tối đa tài nguyên phổ và tăng độ tin cậy truyền dẫn. Kỹ thuật mã hóa không gian-thời gian (Space-Time Block Coding – STBC) được công nhận là một trong những phương pháp hàng đầu, giúp đa dạng không gian và thời gian nhằm chống lại hiện tượng pha-đinh một trong những nội dung lớn của truyền thông không dây. Đặc biệt, các mã STBC trực giao (Orthogonal STBC – OSTBC) được đánh giá cao, bởi ngoài việc mang lại đầy đủ lợi ích về đa dạng, chúng còn cho phép vận dụng các thuật toán tách sóng tuyến tính đơn giản với hiệu năng tối ưu khi phía thu biết chính xác thông tin trạng thái kênh (CSI).

Tuy nhiên, trong thực tế, việc đưa ra ước lượng CSI tại phía điểm thu là điều không dễ dàng. Thông thường, hệ thống phải dành ra một phần tài nguyên để truyền các tín hiệu huấn luyện (pitlot) giúp thu ước lượng kênh. Trong các hệ MIMO tốc độ cao hoặc có nhiều anten phát/thu, số lượng tín hiệu huấn luyện cần thiết để đảm bảo chất lượng ước lượng kênh tăng lên đáng kể, kéo theo hệ quả là làm giảm tốc độ dữ liệu thực sự và hiệu quả phổ của hệ thống. Đặc biệt, trong các điều kiện kênh truyền biến thiên nhanh, hệ thống cần cập nhật CSI một cách liên tục, kéo theo yêu cầu sử dụng số lượng tín hiệu huấn luyện lớn hơn. Vì vậy, để phục hồi tín hiệu truyền mà không cần hoặc cần rất ít thông tin về kênh trở thành một bài toán quan trọng – đó chính là bài toán tách sóng mù (blind detection).

Tách sóng mù không chỉ giúp giảm bớt hao tổn tài nguyên tín hiệu mà còn mở ra khả năng xây dựng các hệ thống MIMO linh hoạt, hiệu quả hơn trong thực tế. Nhiều hướng nghiên cứu về tách sóng mù cho OSTBC đã được đề xuất từ trước. Một số phương pháp tách sóng bằng cách trước hết ước lượng mù kênh truyền (thông qua các kỹ thuật như phân tích giá trị kỳ dị – SVD, khai thác cấu trúc OSTBC) sử dụng các bộ tách sóng cực đại hợp lý (ML) hoặc gần tối ưu để thu hồi ký hiệu truyền. Dù có hiệu quả nhưng những phương pháp này vẫn gặp hạn chế khi không thể áp dụng cho mọi loại OSTBC, đặc biệt là các mã nổi tiếng như Alamouti khi không có sự hỗ trợ từ phía phát.

Vấn đề nhận dạng mù bản chất của OSTBC cũng đã được phân tích sâu rộng. Các nghiên cứu phân loại OSTBC thành các nhóm như có thể xoay, không thể xoay, hoặc không thể xoay chặt chẽ, chỉ ra rằng một số OSTBC – điển hình là mã Alamouti không thể nhận dạng duy nhất được bằng tách sóng mù, luôn tồn tại mơ hồ dấu nếu không có sự hỗ trợ của tín hiệu huấn luyện hoặc tiền mã hóa. Dù có nhiều nỗ lực, nhưng các bộ tách sóng mù vẫn phải sử dụng ít nhất một vài ký hiệu tín hiệu huấn luyện để loại bỏ triệt để mơ hồ dấu hoặc hệ số vô hướng.

Từ những vấn đề đặt ra, tác giả lựa chọn đề án "***Nghiên cứu phương pháp tách sóng mù trong hệ thống MIMO-OSTBC***" nhằm nghiên cứu, đánh giá về các kỹ thuật tách sóng cho hệ thống MIMO-OSTBC. Từ đó, đề án đề xuất kỹ thuật tách sóng hoàn toàn mù với độ phức tạp thấp, hiệu quả về phẩm chất BER cho hệ thống MIMO-OSTBC

Chương 1 - CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ TỔNG QUAN PHƯƠNG PHÁP TÁCH SÓNG MÙ

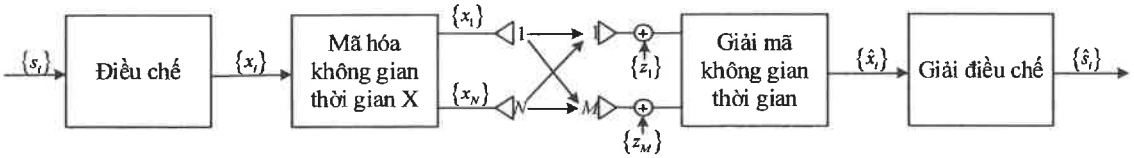
Chương 1 đề án trình bày những vấn đề lý thuyết tổng quan cho bài toán tách sóng mù trong hệ MIMO-OSTBC, trình bày cơ sở hình thành của STBC từ thiết kế trực giao, minh họa bằng mã Alamouti và các mở rộng nhiều ăng-ten; phân tích ảnh hưởng của trực giao tới khả năng tách sóng tuyến tính. Nguyên lý mã hóa không gian-thời gian OSTBC, các phương pháp tách sóng truyền thống và mù, cùng những ưu nhược điểm của từng kỹ thuật. Đây là cơ sở lý thuyết quan trọng giúp nghiên cứu và đề xuất giải pháp tách sóng mù cho hệ thống MIMO-OSTBC.

1.1. Mã khối không gian - thời gian STBC và OSTBC

Đối với hệ thống MIMO, mã hóa không gian - thời gian (STBC) có thể khai thác đa dạng kênh và giảm xác suất lỗi. Mục tiêu của STBC là mã hóa các ký hiệu dữ liệu trải qua cả không gian (trên các ăng-ten phát) và thời gian (qua nhiều khoảng thời gian), sao cho tại phía máy thu có thể giải mã hiệu quả, đồng thời tận dụng đa dạng không gian để chống pha-đinh.

1.1.1. Khái niệm, mô hình

Space–Time Block Coding (STBC) là một kỹ thuật cốt lõi của truyền thông không dây đa ăng-ten, đảm bảo việc phân bố dữ liệu trên nhiều chiều không gian–thời gian nhằm tăng phân tập và cải thiện hiệu quả phổ. Thuộc tính chống pha-đinh mạnh mẽ khiến STBC trở thành giải pháp nền tảng trong hầu hết các cấu trúc MIMO hiện đại.



Hình 1.1: Sơ đồ hệ thống mã hóa STBC

Một cách tổng quát, bộ mã hoá (STE: Space-Time Encoder) của STBC có thể có như một phép ánh xạ của một tập N_s ký hiệu phát phức sang một ma trận phát $\mathbf{X}$ với N_s hàng và N_t cột. Nhìn chung, phép ánh xạ

$$\{s_1, s_2, \ldots, s_{N_s}\} \rightarrow \mathbf{X} \tag{1.1}$$

có thể ở bất kỳ dạng nào như tuyến tính hoặc phi tuyến. Tuy nhiên, do STBC phi tuyến ít được quan tâm, nội dung đồ án tập trung trình bày trình bày vào loại mã STBC tuyến tính. Với mã STBC tuyến tính thì phép ánh xạ (1.1) được trình bày ngắn gọn [8]:

$$\mathbf{X} = \sum_{k=1}^{N_s} \left(\tilde{s}_k \mathbf{A}_k + j \breve{s}_k \mathbf{B}_k \right) \tag{1.2}$$

trong đó $\tilde{s}_k = \Re\{s_k\}$ và $\breve{s}_k = \Im\{s_k\}$ tương ứng biểu diễn phần thực và ảo của s_k, còn $\mathbf{A}_k$ và $\mathbf{B}_k$ là các ma trận cố định cho trước được gọi là các *ma trận phân tán* (dispersion matrix). Ma trận **X** này được truyền tới máy thu thông qua N ăng-ten và N_t khe thời gian. Véc-tơ tín hiệu phát từ ăng-ten n (thông qua N_t khe thời gian) được biểu diễn bởi hàng n của **X** và véc-tơ tín hiệu phát đồng thời qua N ăng-ten tại một khe thời gian t được biểu diễn bằng cột thứ t của $\mathbf{X}$. Như vậy, một phần tử $x_{n,t}$ biểu diễn một ký hiệu phát mã hoá được phát đi từ ăng-ten n tại khe thời gian t. Do N_s ký hiệu truyền trong khoảng thời gian N_t khe thời gian nên tốc độ của mã STBC là:

$$R = \frac{N_s}{N_t} \tag{1.3}$$

Giả sử bộ điều chế được sử dụng có bậc M thì số bít có thể truyền đi trong mỗi ký hiệu phát là $m_b = \log_2 M$. Như vậy, hiệu suất phổ tần của mã STBC có thể tính được như sau:

$$\eta = \frac{r_b}{B} = \frac{r_s m_b R}{r_s} = \frac{m_b N_s}{N_t} \tag{1.4}$$

Với r_b và r_s tương ứng là các tốc độ bit và ký hiệu, B là băng tần.

Một ví dụ điển hình của mã STBC là bộ mã do Alamouti [1] đề xuất với ma trận phát

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} \\ x_{2,1} & x_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2^* \\ s_2 & -s_1^* \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

Các ma trận ánh xạ $\mathbf{A}_k$ và $\mathbf{B}_k$ của mã Alamouti STBC có thể biểu diễn như sau [8]

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{1.6}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{1.7}$$

Do $N_s = N_t = 2$ nên tốc độ truyền dẫn của mã Alamouti STBC là $R = 1$.

Nhằm đạt được phân tập tối đa từ (full diversity) từ N ăng-ten phát cung cấp, quá trình thiết kế ma trận mã truyền phải tuân theo cấu trúc trực giao. Điều kiện này đã được trình bày trong [21]

$$\mathbf{X}\mathbf{X}^H = C\sum_{k=1}^{N_s} |s_k|^2 \, \mathbf{I}_N \tag{1.8}$$

Với C là một giá trị không đổi nào đó. Loại mã STBC tạo ra trên cơ sở trực giao này được gọi là mã STBC trực giao (O-STBC: orthogonal STBC). Theo đó trong hệ mã OSTBC, tín hiệu từ mỗi ăng-ten được biểu diễn dưới dạng véc-tơ độc lập và trực giao với tín hiệu từ các ăng-ten khác. Tức là nếu định nghĩa x_n là các véc-tơ (hàng) phát từ ăng-ten n, tương ứng với hàng thứ n của $\mathbf{X}$, thì STBC được biểu diễn bằng:

$$\mathbf{x}_i \mathbf{x}_j^H = \sum_{t=1}^{N_t} x_{i,t} \, x_{j,t}^* = 0, \qquad i, j \in \{1, 2, \ldots, N\} \tag{1.9}$$

Tính chất trực giao của mã STBC này cho phép đạt được bậc phân tập toàn phần, đồng thời cho phép máy thu tách riêng các thành phần tín hiệu phát từ các ăng-ten phát, và vì vậy đơn giản hoá bộ tách tín hiệu thông qua tách sóng hợp lẽ tối ưu dựa trên các phép xử lý tuyến tính trên tín hiệu thu.

1.1.2. Phương pháp mã hóa không gian–thời gian dựa trên cấu trúc trực giao

1.1.2.1. Bộ mã O-STBC áp dụng cho tín hiệu đầu vào là tập giá trị thực

Một ví dụ của tín hiệu thực là tập tín hiệu sử dụng phương pháp điều chế biên độ xung PAM, trong đó biên độ của mỗi xung được điều chỉnh theo giá trị của ký hiệu điều chế. Với mục tiêu đạt độ phân tập cực đại, các mã STBC trên tín hiệu thực được thực hiện sao cho đảm bảo quan hệ trực giao biểu diễn ở công thức (1.5).

$$\mathbf{X}_N \mathbf{X}_N^T = C\sum_{k=1}^{N_s} |s_k|^2 \, \mathbf{I}_N \tag{1.10}$$

Dựa định lý Hurtwitz-Radon về thiết kế trực giao, Tarokh, Jafarkhani và

Calderbank [21] đã chứng minh được rằng các bộ mã vuông $(N = N_t)$ có thể đạt được đồng thời cả bậc phân tập toàn phần và tốc độ toàn phần cho tập tín hiệu thực chỉ tồn tại với số ăng-ten phát $N = 2, 4, 8$. Ma trận truyền dẫn của các bộ mã này là [21]:

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ s_2 & s_1 \end{bmatrix}. \tag{1.11}$$

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 \\ s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 \end{bmatrix}. \tag{1.12}$$

$$\mathbf{X}_8 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & -s_5 & -s_6 & -s_7 & -s_8 \\ s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 & s_6 & s_5 & s_8 & -s_7 \\ s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 & -s_7 & s_8 & s_5 & s_6 \\ s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 & -s_8 & -s_7 & s_6 & s_5 \\ s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ -s_6 & -s_5 & s_8 & s_7 & s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_7 & -s_8 & -s_5 & s_6 & -s_4 & s_3 & s_1 & s_2 \\ s_8 & s_7 & -s_6 & -s_5 & s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 \end{bmatrix}. \tag{1.13}$$

Trong các bộ mã $\mathbf{X}_2, \mathbf{X}_4, \mathbf{X}_8$ số lượng khe thời gian cần thiết trùng với số ký hiệu được phát, vì thế tốc độ mã đạt mức tối đa $R = 1$. Các mã này cũng giữ nguyên tính trực giao nhờ cách tạo lập ma trận mã đặc trưng của OSTBC

$$\mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^{\mathrm{H}} = \sum_{k=1}^{N_s} |s_k|^2, \tag{1.14}$$

$$\mathbf{x}_i \mathbf{x}_j^{\mathrm{H}} = 0, \; i \neq j \tag{1.15}$$

Tổng quát hoá định lý Hurtwitz-Radon cho trường hợp ma trận không vuông, Tarokh, Jafarkhani và Calderbank [21] đã tìm được các ma trận phát $\mathbf{X}_n$ cho bất kỳ số ăng-ten phát N nào. Các ví dụ ma trận phát cho $N \leq 8$ được trình bày dưới đây [21]

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 \end{bmatrix}. \tag{1.16}$$

$$\mathbf{X}_5 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & -s_5 & -s_6 & -s_7 & -s_8 \\ s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 & -s_6 & s_5 & s_8 & -s_7 \\ s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 & -s_7 & -s_8 & s_5 & s_6 \\ s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 & -s_8 & s_7 & -s_6 & s_5 \\ s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

$$\mathbf{X}_6 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & -s_5 & -s_6 & -s_7 & -s_8 \\ s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 & -s_6 & s_5 & s_8 & -s_7 \\ s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 & -s_7 & -s_8 & s_5 & s_6 \\ s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 & -s_8 & s_7 & -s_6 & s_5 \\ s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_6 & -s_5 & -s_8 & -s_7 & s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \end{bmatrix}. \quad (1.18)$$

$$\mathbf{X}_7 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & -s_5 & -s_6 & -s_7 & -s_8 \\ s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 & -s_6 & s_5 & s_8 & -s_7 \\ s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 & -s_7 & -s_8 & s_5 & s_6 \\ s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 & -s_8 & s_7 & -s_6 & s_5 \\ s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_6 & -s_5 & -s_8 & -s_7 & s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_7 & -s_8 & -s_5 & s_6 & -s_4 & s_3 & s_1 & s_2 \end{bmatrix}. \quad (1.19)$$

So sánh (1.16) với (1.12), (1.17) ÷ (1.19) với (1.13) thì bộ mã $\boldsymbol{X}_3$ được thực hiên trên bộ mã vuông X_4 bằng cách lấy 3 hàng đầu tiên. Tương tự, các bộ mã $\boldsymbol{X}_4, \boldsymbol{X}_5, \boldsymbol{X}_6$ tương ứng được xây dựng từ 5, 6, và 7 hàng đầu tiên của bộ mã vuông X_8. Thực tế ta có thể xây dựng được các bộ mã cho các hệ thống với N' ăng-ten phát từ bộ mã vuông $\boldsymbol{X}_N$ bằng cách lấy N' hàng bất kỳ từ X_N [8]. Cũng giống như các bộ mã STBC trực giao vuông các bộ mã không vuông này sử dụng N_t khe thời gian để truyền đi N_s ký hiệu phát. Vì vậy, các bộ mã này cũng có tốc độ toàn phần, tức là $R = 1$, đồng thời cũng cho phép thu được độ phân tập toàn phần N

1.1.2.2. Bộ mã O-STBC áp dụng cho tín hiệu đầu vào là tập giá trị phức

Các chòm tín hiệu phức, chẳng hạn như M-QAM hay M-PSK, được ứng dụng phổ biến trong các hệ thống thông tin vô tuyến số. Để khai thác tối đa phân tập khi hệ thống có N ăng-ten phát, các mã O-STBC áp dụng cho tín hiệu phức cũng phải tuân thủ điều kiện trực giao nêu trong (1.8).

$$\mathbf{X}_N \mathbf{X}_N^H = C \sum_{k=1}^{N_s} |s_k|^2 \, \mathbf{I}_N. \tag{1.20}$$

Bộ mã Alamouti STBC với ma trận phát (1.5)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2^* \\ s_2 & -s_1^* \end{bmatrix}. \tag{1.21}$$

đây là điển hình cho một mã phức cho 2 ăng-ten phát. Đây cũng là bộ mã O-STBC phức duy nhất có thể đạt được cả tốc độ và độ phân tập toàn phần [21]. Với các hệ thống có nhiều hơn 2 ăng-ten phát thì có thể xây dựng được các bộ mã phức cho bất kỳ số ăng-ten N nào với tốc độ $R = 1/2$ [21]. Một số ví dụ về các bộ mã phức tốc độ 1/2 cho $N = 3,4$ là

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \end{bmatrix}. \tag{1.22}$$

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 & s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix}. \tag{1.23}$$

Tổng quát, có thể xây dựng các bộ mã O-STBC phức tốc độ $R = 1/2$ bằng cách xây dựng một bộ mã O-STBC phức có cấu trúc tương tự như một bộ mã O-STBC thực có tốc độ toàn phần rồi nối với ma trận liên hợp phức của nó.

Với tốc độ lớn hơn 1/2 có một số mã STBC trực giao phức với tốc độ $R = 3/4$ cho các hệ thống 3 và 4 ăng-ten phát được phát triển trên cơ sở lý thuyết thiết kế "thoả hiệp" (admicable design) như sau [21]:

$$\mathbf{X}_3^{3/4} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} \\ s_2 & s_1^* & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{s_3^*}{\sqrt{2}} \\ \frac{s_3}{\sqrt{2}} & \frac{s_3}{\sqrt{2}} & \frac{-s_1 - s_1^* + s_2 - s_2^*}{2} & \frac{s_1 - s_1^* + s_2 + s_2^*}{2} \end{bmatrix}. \tag{1.24}$$

$$\mathbf{X}_4^{3/4} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} \\ s_2 & s_1^* & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{s_3^*}{\sqrt{2}} \\ \frac{s_3}{\sqrt{2}} & \frac{s_3}{\sqrt{2}} & \frac{-s_1 - s_1^* - s_2 - s_2^*}{2} & \frac{s_1 - s_1^* - s_2 + s_2^*}{2} \\ \frac{s_3}{\sqrt{2}} & -\frac{s_3}{\sqrt{2}} & \frac{s_1 - s_1^* - s_2 + s_2^*}{2} & \frac{-s_1 - s_1^* + s_2 + s_2^*}{2} \end{bmatrix}. \quad (1.25)$$

Một số mã có tốc độ 3/4 khác dùng cho các hệ thống 3 và 4 ăng-ten phát được cho bởi các biểu thức sau [8], [23]:

$$\mathbf{X}_3 = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & -s_2^* & s_3^* \\ 0 & s_1 & -s_3 & -s_2 \\ s_2 & s_3^* & s_1^* & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.26)$$

$$\mathbf{X}_4 = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & -s_2^* & s_3^* \\ 0 & s_1 & -s_3 & -s_2 \\ s_2 & s_3^* & s_1^* & 0 \\ -s_3 & s_2^* & 0 & s_1^* \end{bmatrix}. \quad (1.27)$$

Các mã này đơn giản hơn các mã trong (1.24) và (1.25) ở chỗ nó không đòi hỏi phải thực hiện các phép cộng và nhân.

1.2. Tách sóng trong hệ thống MIMO-OSTBC

1.2.1. Trường hợp máy thu biết chính xác kênh truyền

1.2.1.1 Tách sóng O-STBC cho tập tín hiệu thực

Khi tín hiệu s_k là tín hiệu thực, các ma trận mã O-STBC được trình bày:

$$\mathbf{X} = \sum_{k=1}^{N_s} s_k \mathbf{A}_k \quad (1.28)$$

$\mathbf{A}_k$ là các ma trận phân tán thỏa mãn các điều kiện sau:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{A}_k^T = \mathbf{I}_{N,} \quad (1.29)$$

$$\mathbf{A}_k \mathbf{A}_n^T = -\mathbf{A}_n \mathbf{A}_k^T, k \neq n \quad (1.30)$$

Với $k = 1, 2, \ldots, N_s, n = 1, 2, \ldots, N_s,$

Giả thiết kênh pha đinh chậm, tức là hệ số kênh truyền $h_{m,n}$ không thay đổi trong khoảng N_t khe thời gian phát ma trận (mỗi ma trận một mã), ta có

$$h_{m,n}(t) = h_{m,n}, \quad t = 1,2,\ldots,N_t \tag{1.31}$$

và khối tín hiệu thu được ứng với từ mã đã truyền có thể được biểu diễn theo công thức:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{HX} + \mathbf{Z}, \tag{1.32}$$

$\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ là kênh truyền MIMO, $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{M \times N_s}$ là ma trận tín hiệu thu; $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{M \times N_s}$ là tạp âm cộng Gauss được giả thiết là tạp âm trắng cả trong miền không gian và miền thời gian với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ^2.

Do X chỉ bao gồm các giá trị thực, ta có thể biểu diễn lại (1.32) bằng:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{HX} + \mathbf{Z} \tag{1.33}$$

Với $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \Re\{\mathbf{Y}\} \\ \Im\{\mathbf{Y}\} \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \Re\{\mathbf{H}\} \\ \Im\{\mathbf{H}\} \end{bmatrix}$, $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \Re\{\mathbf{Z}\} \\ \Im\{\mathbf{Z}\} \end{bmatrix}$.

Khi máy thu biết chính xác kênh truyền $\mathbf{H}$ hay $\mathbf{H}$, nó thực hiện giải mã tối ưu véc-tơ thông tin s như sau:

$$\bar{\mathbf{s}} = \arg\min_{\mathbf{s} \in \mathcal{A}} \left\| \mathbf{Y} - \mathbf{HX} \right\|_F^2 \tag{1.34}$$

Trong đó $\| \mathbf{A} \|_F$ ký hiệu độ lớn Frobenius (Frobenius norm) của ma trận A.

Dựa vào tính chất trực giao của ma trận X, ta có thể biến đổi đối số trong vế phải của (9.34) như sau:

$$\begin{aligned} \left\| \mathbf{Y} - \mathbf{HX} \right\|_F^2 &= \left\| \mathbf{Y} \right\|_F^2 - 2\Re\{\mathrm{trace}(\mathbf{Y}^T \mathbf{HX})\} + \left\| \mathbf{HX} \right\|_F^2 \cdot \} \\ &= \| \mathbf{Y} \|_F^2 - 2\sum_{k=1}^{N_s} \mathrm{trace}(\mathbf{Y}^T \mathbf{HA}_k) s_k + \mathrm{trace}(\| \mathbf{s} \|_2^2 \mathbf{H} \mathbf{I}_N \mathbf{H}^T) \\ &= \sum_{k=1}^{N_s} \left[-2\mathrm{trace}(\mathbf{Y}^T \mathbf{HA}_k) s_k + |s_k|^2 \| \mathbf{H} \|_F^2 \right] + \mathrm{const.} \\ &= \| \mathbf{H} \|_F^2 \sum_{k=1}^{N_s} (s_k - \tilde{s}_k)^2 + \mathrm{const.} \end{aligned} \tag{1.35}$$

Trong đó

$$\tilde{s}_k = \frac{\mathrm{trace}\left(\tilde{\mathbf{Y}}^T \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{A}_k \right)}{\| \tilde{\mathbf{H}} \|_F^2}. \tag{1.36}$$

là biến thống kê quyết định (decision statistic) tương ứng với ký hiệu s_k, trace(**A**) ký hiệu vết của ma trận **A** được tính bằng tổng tất cả các phần tử nằm trên đường chéo chính của **A**.

Từ (1.35), ta biểu diễn lại luật quyết định tối ưu (1.34) như sau:

$$\bar{s} = \arg\min_{s\in A} \sum_{k=1}^{N_s} (s_k - \tilde{s}_k)^2. \tag{1.37}$$

Biểu thức (1.37) chứng tỏ rằng metric tối ưu được tách thành tổng của N_s thành phần, trong đó mỗi thành phần phụ thuộc duy nhất vào một ký hiệu thực s_k. Do đó, việc giải mã ký hiệu s_k không phụ thuộc vào ký hiệu $s_n, k \neq n,$, theo luật sau:

$$\bar{s} = \arg\min_{s_k \in A} (s_k - \tilde{s}_k)^2. \tag{1.38}$$

1.2.1.2 Tách sóng O-STBC cho tập tín hiệu phức

Khi tín hiệu s_k là tín hiệu phức, các ma trận mã O-STBC có thể được biểu thị như trong công thức (1.2), với các ma trận phân tán thỏa mãn các điều kiện sau [8]:

$$\mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_k = C\mathbf{I}_N, \qquad \mathbf{B}_k^H \mathbf{B}_k = C\mathbf{I}_N, \text{với } C \text{ là hằng số bất kỳ} \tag{1.39}$$

$$\mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_n = -\mathbf{A}_n^H \mathbf{A}_k, \qquad \mathbf{B}_k^H \mathbf{B}_n = -\mathbf{B}_n^H \mathbf{B}_k, \qquad k \neq n, \tag{1.40}$$

$$\mathbf{A}_n^H \mathbf{B}_k = \mathbf{B}_k^H \mathbf{A}_n. \tag{1.41}$$

trong đó $k = 1, 2, \ldots, K, \qquad n = 1, 2, \ldots, K.$

Tương tự trường hợp tín hiệu thực, giả thiết rằng kênh truyền **H** không thay đổi trong thời gian truyền một từ mã, ta có thể biểu thị ma trận tín hiệu thu được như sau trong (1.32).

Khi máy thu biết chính xác kênh truyền **H**, nó thực hiện giải mã tối ưu véctơ thông tin ***s*** như sau:

$$\bar{\mathbf{s}} = \arg\min_{\mathbf{s}\in A} \left\| \mathbf{Y} - \mathbf{HX} \right\|_F^2 \tag{1.42}$$

Khi các ma trận phân tán $\mathbf{A}_k$ and $\mathbf{B}_k$ thỏa mãn các điều kiện (1.39) - (1.41), thì ma trận matrix **X** thỏa mãn điều kiện (1.8). Do đó, ta có thể biến đổi đối số trong vế phải của (1.42) như trong biểu thức sau:

$$\| \mathbf{Y} - \mathbf{HX} \|_F^2 = \| \mathbf{Y} \|_F^2 - 2\Re\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{HX})\} + \| \mathbf{HX} \|_F^2$$

$$
\begin{aligned}
&= \| \mathbf{Y} \|_F^2 - 2\sum_{k=1}^{N_s} \Re\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{A}_k)\}\Re(s_k) \\
&+2\sum_{k=1}^{N_s} \Im\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{B}_k)\}\Im(s_k) + trace(C \| s \|_2^2 \mathbf{H}\mathbf{I}_N\mathbf{H}^H) \\
&= \sum_{k=1}^{N_s} \begin{bmatrix} -2\Re\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{A}_k)\}\Re(s_k) \\ +2\Im\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{B}_k)\}\Im(s_k) + C|s_k|^2 \| \mathbf{H} \|_F^2 \end{bmatrix} + \text{const.} \\
&= C \| \mathbf{H} \|_F^2 \sum_{k=1}^{N_s} |s_k - \tilde{s}_k|^2 + \text{const.} \qquad (1.43)
\end{aligned}
$$

Trong đó

$$\tilde{s}_k = \frac{\Re\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{A}_k)\} - j\Im\{trace(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{B}_k)\}}{C \| \mathbf{H} \|_F^2}. \qquad (1.44)$$

là biến ngẫu nhiên quyết định (decision statistic) tương ứng với ký hiệu s_k.

Từ công thức (1.43), ta có thể viết lại luật quyết định tối ưu (1.42) như sau:

$$\bar{\mathbf{s}} = \arg\min_{\mathbf{s}\in\mathcal{A}} \sum_{k=1}^{N_s} |s_k - \tilde{s}_k|^2 . \qquad (1.45)$$

Từ biểu thức (1.45) ta thấy rằng chỉ số đo (metric) tối ưu được tách thành tổng của N_s thành phần, trong đó mỗi thành phần phụ thuộc duy nhất vào một ký hiệu phức s_k. Do đó, ký hiệu s_k được giải mã độc lập với ký hiệu s_n, k ≠ n, theo luật sau:

$$\bar{s}_k = \arg\min_{s_k\in\mathcal{A}} |s_k - \tilde{s}_k|^2 . \qquad (1.46)$$

đối với tín hiệu QAM, chúng ta có thể thực hiện tách một cách độc lập phần thực và phần ảo của mỗi ký hiệu phức s_k như sau:

$$\bar{s}_k^I = \arg\min_{s_k^I\in\mathcal{N}} |s_k^I - \tilde{s}_k^I|^2 . \qquad (1.47)$$

$$\bar{s}_k^Q = \arg\min_{s_k^Q\in\mathcal{N}} |s_k^Q - \tilde{s}_k^Q|^2 . \qquad (1.48)$$

trong đó, $\mathcal{N}$ là tập các số nguyên để xây dựng nên tín hiệu M-QAM,

$$\tilde{s}_k^I = \frac{\Re\left\{\text{trace}\left(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{A}_k\right)\right\}}{C\| \mathbf{H} \|_F^2}, \qquad (1.49)$$

$$\tilde{s}_k^Q = \frac{-\Im\{\text{trace}(\mathbf{Y}^H \mathbf{H}\mathbf{B}_k)\}}{C \| \mathbf{H} \|_F^2}. \qquad (1.50)$$

Công thức (1.46) có thể được sử dụng để giải mã cho các mã O-STBC với các ký hiệu được điều chế PSK. Tuy nhiên, do các tín hiệu PSK là các tín hiệu có biên độ không đổi (constant modulus), nên để khôi phục lại tín hiệu s_k ta chỉ cần thành phần pha của $\tilde{s}_k$. Biên độ của $\tilde{s}_k$ không tác động tới sự khôi phục s_k. Vì vậy, thành phần mẫu số trong (1.44) có thể được bỏ qua và ký hiệu PSK s_k được giải mã tối ưu dựa trên công thức:

$$\bar{s}_k = \text{argmin}_{s_k \in \mathcal{A}} \left| s_k - \tilde{s}_k^p \right|^2 \tag{1.51}$$

Với

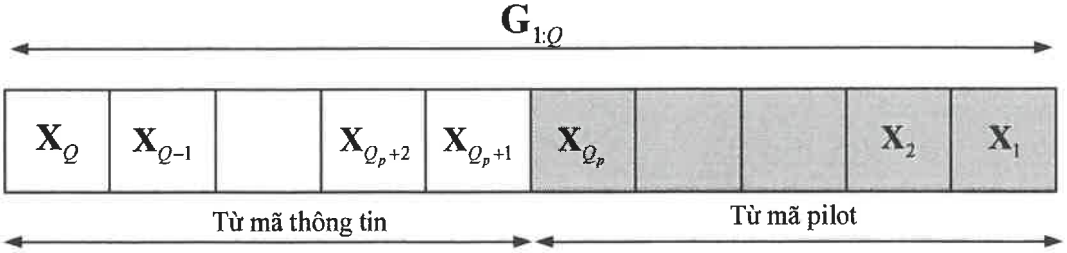
$$\tilde{s}_k^p = \Re\left\{\text{trace}(\mathbf{Y}^H \mathbf{H} \mathbf{A}_k^T)\right\} - j\Im\left\{\text{trace}(\mathbf{Y}^H \mathbf{H} \mathbf{B}_k^T)\right\} \tag{1.52}$$

là biến thống kê quyết định tương ứng với ký hiệu s_k.

Ta có thể thấy tính chất trực giao của các mã O-STBC đã biến bài toán giải mã tối ưu phức tạp trong (1.34) và (1.42) thành các bài toán giải mã tối ưu cho từng ký hiệu riêng biệt như biểu thị trong các công thức (1.38). (1.46) và (1.51), do đó đơn giản hóa một cách đáng kể quá trình giải mã.

1.2.2. Ước lượng kênh truyền bằng thuật toán LSE

Giả thiết máy thu biết chính xác kênh truyền là một giả thiết lý tưởng. Trong thực tế để có được thông tin về kênh truyền, máy thu sẽ phải thực hiện việc ước lượng kênh (channel estimation). Tuy nhiên, do tác động của tạp âm, kênh thu được do ước lượng không phải là kênh truyền chính xác, dẫn tới sự suy giảm phẩm chất BER của hệ thống.



Hình 1.2: Cấu trúc của khung truyền dẫn được hình thành từ các mã O-STBC

Với giả thiết kênh truyền là cận tĩnh, tức là nó không thay đổi trên toàn bộ một khung tín hiệu $\mathbf{G}_{1:Q}$ bao gồm Q ma trận mã liên tiếp, để thực hiện việc ước lượng kênh,

ta sử dụng Q_p ma trận mã đầu tiên khung. Q_p ma trận mã này được cả máy phát và máy thu biết rõ và được gọi là các ma trận mã pilot (xem Hình 1.2). Từ các mã pilot, ta có thể ước lượng được kênh truyền một cách khá dễ dàng nhờ các thuật toán sai số bình phương tối thiểu (LSE) hoặc sai số bình phương trung bình cực tiểu (MMSE: Minimum Mean Square Error). Mặc dù mang lại kết quả ước lượng chính xác hơn, phương pháp MMSE đòi hỏi phải biết trước công suất tạp âm tại máy thu, và do đó có độ phức tạp lớn hơn so với phương pháp LSE. Tiếp theo, chúng ta sẽ tìm hiểu cụ thể phương pháp LSE cho trường hợp tín hiệu phát đi là các tín hiệu phức.

Theo bố cục khung tín hiệu được thể hiện trên Hình 1.2, ta có thể viết tín hiệu thu được ứng với toàn bộ khung tín hiệu $\mathbf{G}_{1:Q}$ như sau:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{G}_{1:Q} + \mathbf{Z} \tag{1.53}$$

trong đó $\mathbf{G}_{1:Q} = [\mathbf{X}_1 ; \mathbf{X}_2 ; \ldots ; \mathbf{X}_Q]$ là khung tín hiệu phát đi; $\mathbf{x}_n, n = 1, \ldots, Q$ là từ mã thứ n; $\mathbf{H}$ là ma trận kênh MIMO với kích thước $M \times N$; $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_p ; \mathbf{Y}_d] = [\mathbf{Y}_1 ; \mathbf{Y}_2 ; \ldots ; \mathbf{Y}_Q]$ là khung tín hiệu thu được có kích thước $M \times N_t Q$; $\mathbf{Y}_p$ là khung tín hiệu con ứng với toàn bộ Q_p từ mã pilot còn $\mathbf{Y}_d$ là khung tín hiệu con ứng với $Q - Q_p$ từ mã thông tin; và $\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1 ; \mathbf{Z}_2 ; \ldots ; \mathbf{Z}_Q]$ là ma trận có kích thước $M \times N_t Q$ chứa các mẫu tạp âm tại các ăng-ten thu.

Theo phương pháp LSE, kênh truyền $\mathbf{H}$ được ước lượng dựa trên biểu thức sau:

$$\mathbf{H}_{LSE} = \arg\min_{\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}} \left\| \mathbf{Y}_p - \mathbf{H}\mathbf{G}_{1:Q_p} \right\|_F^2 \tag{1.54}$$

Nghiệm của phương trình trên chính là ước lượng LSE của kênh truyền $\mathbf{H}$ được cho bởi biểu thức sau [5], [9]:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{LSE} &= \mathbf{Y}_p \mathbf{G}_{1:Q_p}^H \left(\mathbf{G}_{1:Q_p} \mathbf{G}_{1:Q_p}^H \right)^{-1} \\ &= \left[\sum_{n=1}^{Q_p} \mathbf{Y}_n \mathbf{X}_n^H \right] \left[\sum_{n=1}^{Q_p} \mathbf{X}_n \mathbf{X}_n^H \right]^{-1} \end{aligned} \tag{1.55}$$

Do các ma trận $\mathbf{X}_n$ thỏa mãn điều kiện (1.8), ta có:

$$\mathbf{H}_{LSE} = \sum_{n=1}^{Q_p} \mathbf{Y}_n \mathbf{X}_n^H \left[\sum_{n=1}^{Q_p} C \| \mathbf{s} \|_2^2 \mathbf{I}_N \right]^{-1}$$
$$= \frac{\sum_{n=1}^{Q_p} \mathbf{Y}_n \mathbf{X}_n^H}{C \sum_{n=1}^{Q_p} \| \mathbf{s} \|_2^2} \tag{1.56}$$

Nếu các ký hiệu phát đi được chọn từ biểu đồ phân phối điểm tín hiệu (chòm sao tín hiệu) M-PSK, tức là $A = e^{jmM\,2\pi}$ với $m = 0,1,\ldots,M-1,$, thì $\| \mathbf{s}_1 \|_2^2 = \| \mathbf{s}_2 \|_2^2 = \cdots = \| \mathbf{s}_{Q_p} \|_2^2 = N_s$. Lúc này, biểu thức (1.56) được rút gọn thành:

$$\mathbf{H}_{LSE} = \frac{1}{CN_s Q_p} \sum_{n=1}^{Q_p} \mathbf{Y}_n \mathbf{X}_n^H \tag{1.57}$$

Nếu ta coi $\mathbf{H}_{LSE}$ là chính xác, ta có thể áp dụng chúng vào các biểu thức (1.46) và (1.51) để khôi phục lại các tín hiệu đã được phát đi.

1.3. Tổng quan các phương pháp tách sóng mù

Một phương pháp để phát hiện mù các mã OSTBC là trước hết phải ước lượng mù các ma trận kênh. Sau đó, các ma trận kênh đã được ước lượng này được sử dụng trong một bộ phát hiện, có thể là bộ phát hiện ML kết hợp (coherent ML detector) hoặc một phương pháp thay thế không tối ưu, để hồi phục các ký hiệu dữ liệu đã truyền [24], [2]. Trong [24]và [4], các ước lượng kênh mù được lấy từ không gian nhiễu thông qua phân tích giá trị riêng (SVD) của ma trận tín hiệu thu. Bằng cách khai thác các đặc tính cụ thể của OSTBC, các tác giả trong [17] đã phát triển một phương pháp ước lượng mù ma trận kênh MIMO ở dạng đóng. Tuy nhiên, phương pháp trong [17] không áp dụng được cho một số OSTBC, bao gồm mã Alamouti OSTB, OSTBC thực hoặc OSTBC phức tốc độ 1/2 cho bốn ăng-ten truyền, do hiện tượng không định danh kênh (channel nonidentifiability) trừ khi có sử dụng bộ tiền mã (precoder) tại phía phát.

Một hướng tiếp cận khác trong phát hiện mù là đồng thời cân bằng kênh và khôi phục các ký hiệu dữ liệu mà không cần ước lượng tường minh ma trận kênh. Trong [18] và [9], các thuật toán phát hiện mù và bán mù được triển khai bằng cách cực tiểu hóa

metric ML theo ma trận kênh và các ký hiệu truyền trong một quy trình lặp, dẫn đến phương pháp gọi là ML tuần hoàn (cyclic ML). Thuật toán cyclic ML có độ phức tạp tính toán thấp. Tuy nhiên, trong trường hợp phát hiện mù, nó hầu như không hội tụ về nghiệm tối ưu toàn cục do việc khởi tạo kém. Trong [12], [3] các bộ dò mù và bán mù khác dựa trên nới lỏng bán xác định (SDR) và bộ giải hình cầu (SD) đã được đề xuất cho các mã OSTBC. Kết quả cho thấy các bộ giải này vượt trội đáng kể so với cyclic ML về tỷ lệ lỗi bit (BER). Tuy nhiên, bộ dò dựa trên SDR chỉ áp dụng được cho các chòm sao điều chế BPSK và QPSK. Mặc dù SD có thể hoạt động với bất kỳ chòm sao PSK nào, nhưng nó không thể cung cấp nghiệm tối ưu đối với các chòm sao điều chế QAM [3]. Một hạn chế khác của bộ dò dựa trên SDR và bộ giải SD là tải tính toán của chúng cao hơn nhiều so với cyclic ML, đặc biệt khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) ở mức thấp hoặc trung bình. Trong [16], một phương pháp phát hiện mù cho các mã STBC có tốc độ đầy đủ (full-rate STBCs) dựa trên lập trình tuyến tính (LP) đã được trình bày. Bằng cách khai thác cấu trúc ngầm định của các mã STBC với các chòm sao điều chế QAM Các tác giả trong [16] đã có thể biểu diễn bài toán dưới dạng một bài toán lập trình tuyến tính và giải nó một cách hiệu quả. Kết quả trong [16] cho thấy các bộ dò dựa trên LP có thể hoạt động với các mã STBC có tốc độ đầy đủ, ví dụ như mã Alamouti và mã không gian thời gian gần trực giao, đồng thời hội tụ tới nghiệm tối ưu toàn cục. Tuy nhiên, chúng yêu cầu độ dài khung lớn tức là hơn hàng trăm mã từ trên mỗi khung để đạt được BER thấp. Hơn nữa, chúng không thể phát hiện mù các STBC sử dụng các chòm sao điều chế PSK. Trong [22], các thuật toán mù khác, được gọi là bình phương tối thiểu lặp (ILS) và ILS cải tiến (E-ILS), đã được giới thiệu mà không yêu cầu bất kỳ ký hiệu pilot nào.

Một vấn đề cơ bản mà tất cả các bộ dò mù phải đối mặt là khả năng định danh (identifiability) của OSTBC—một đặc tính cố hữu trong phát hiện mù các mã OSTBC. Các nghiên cứu [12] ,[14] chỉ ra rằng các OSTBC có thể được phân thành ba nhóm chính: OSTBC có thể quay được (rotatable OSTBCs), OSTBC không quay được (non-rotatable OSTBCs), và OSTBC hoàn toàn không quay được (strictly non-rotatable OSTBCs). Trong số đó, các OSTBC rotatable chịu ảnh hưởng của hiện tượng mơ hồ ký

hiệu (symbol ambiguity), vì bộ thu mù không thể nhận dạng duy nhất chúng ngoài trừ một dấu (uniquely up to a sign – U2S). Một ví dụ điển hình của nhóm này là OSTBC với hai anten phát, tức mã Alamouti nổi tiếng [12].

Các OSTBC không quay được cho phép đạt được định danh duy nhất (U2S) một cách chắc chắn khi độ dài khung đủ lớn. Ngược lại, các OSTBC strictly non-rotatable cho phép bộ thu mù chắc chắn đạt được khả năng nhận dạng ký hiệu một cách duy nhất mà không cần bất kỳ giả định nào về dữ liệu. Ví dụ tiêu biểu của nhóm strictly non-rotatable là các OSTBC thực (real OSTBC) truyền số lượng ký hiệu lẻ. Đáng chú ý, các tác giả trong [12] đã xây dựng một lớp con của strictly non-rotatable OSTBC, gọi là OSTBC không giao thoa dưới không gian (nonintersecting subspace – NIS OSTBCs), cho phép nhận dạng ký hiệu mù duy nhất với mọi kênh khác không, nhưng phải đánh đổi bằng việc giảm tốc độ truyền.

1.4. Tách sóng mù và bán mù trong OSTBC

Trong các hệ thống MIMO–OSTBC, bộ thu ML truyền thống giả định rằng thông tin trạng thái kênh (CSI) được biết chính xác tại phía thu. Điều này cho phép tách sóng độc lập theo từng ký hiệu nhờ tính trực giao của các ma trận mã, từ đó đạt hiệu năng BER tối ưu. Tuy nhiên, trong hầu hết các hệ thống thực tế, việc thu thập CSI đòi hỏi chèn các tín hiệu huấn luyện (pilot) vào khung truyền dẫn, gây làm giảm hiệu suất phổ và phụ thuộc mạnh vào tốc độ biến thiên kênh. Khi kênh truyền thay đổi nhanh hoặc khi số lượng ăng-ten lớn, lượng pilot cần thiết để đảm bảo chất lượng ước lượng kênh tăng mạnh, dẫn đến hiệu năng hệ thống suy giảm đáng kể.

Để khắc phục hạn chế này, tách sóng mù (blind detection) và bán mù (semi-blind detection) được xem là những hướng tiếp cận quan trọng, cho phép khôi phục dữ liệu mà không cần hoặc chỉ cần một phần nhỏ thông tin kênh. Hai kỹ thuật này khai thác đặc tính thống kê của tín hiệu cũng như cấu trúc trực giao của OSTBC để đồng thời ước lượng dữ liệu và kênh truyền, giúp giảm chi phí huấn luyện mà vẫn duy trì hiệu năng giải mã cao.

1.4.1. Mô hình OSTBC cho nhiều khối

Xét hệ thống OSTBC với n_T ăng-ten phát và n_R ăng-ten thu. Một từ mã OSTBC có dạng:

$$\mathbf{X}_q = \sum_{k=1}^{N_s} s_{k,q}\mathbf{A}_k, \qquad q = 1,...,M \tag{1.58}$$

trong đó:

$s_{k,q}$ là ký hiệu thứ k trong khối thứ q,

$\mathbf{A}_k$ là ma trận phân tán OSTBC thỏa mãn tính chất trực giao:

$$A_k A_k^H = I_{N,} A_k A_n^H = -A_n A_k^H, k \neq n \tag{1.59}$$

M là số khối liên tiếp mà kênh truyền được giả sử không thay đổi.

Tín hiệu thu tại khối q được mô tả:

$$\mathbf{Y}_q = \mathbf{H}\mathbf{X}_q + \mathbf{Z}_q \tag{1.60}$$

trong đó $H \in \mathbb{C}^{M\times N}$ là ma trận kênh và $\mathbf{Z}_q$ là nhiễu AWGN.

1.4.2. Tách sóng ML khi biết kênh truyền

Khi ma trận kênh $\mathbf{H}$ được biết chính xác, luật quyết định ML cho từng ký hiệu $s_{k,q}$ được suy ra từ các tính chất trực giao của OSTBC:

$$\hat{s}_{k,q} = \arg\min_{s\in\Omega}(\tilde{s}_{k,q} - s)^2, \tag{1.62}$$

với statistic:

$$\tilde{s}_{k,q} = \frac{\mathrm{tr}(\mathbf{H}^H\mathbf{Y}_q\mathbf{A}_k)}{\| \mathbf{H} \|_F^2}. \tag{1.63}$$

Đây là bộ tách sóng ML "Clairvoyant", được xem như chuẩn tham chiếu trong toàn bộ các phương pháp giải mã.

1.4.3. Tiêu chuẩn ML cho tách sóng mù

Khi kênh $\mathbf{H}$ không biết, bài toán tách sóng trở thành bài toán ML kết hợp giữa ước lượng $\mathbf{H}$ và ước lượng các ký hiệu $s_{k,q}$. Với giả thiết nhiễu Gaussian độc lập theo thời gian và không gian, tiêu chuẩn ML cho toàn bộ M khối là:

$$J(\mathbf{H},\{s_{k,q}\}) = \sum_{q=1}^{M} \| \mathbf{Y}_q - \mathbf{H}\mathbf{X}_q \|_F^2. \tag{1.64}$$

Đây là một bài toán tối ưu song tuyến (bilinear) phi lồi do $\mathbf{H}$ và $s_{k,q}$ cùng xuất hiện trong tích $\mathbf{HX}_q$. Vì vậy, không thể tìm được nghiệm đóng trực tiếp.

1.4.4. Vấn đề không nhận dạng và điều kiện chuẩn hóa

Một điểm quan trọng trong tách sóng mù là bài toán không nhận dạng duy nhất. Quan sát rằng nếu tồn tại $\alpha \neq 0$ sao cho:

$$s_{k,q} \to \alpha s_{k,q}, \qquad \mathbf{H} \to \frac{\mathbf{H}}{\alpha}, \tag{1.65}$$

thì mọi biểu thức trong tiêu chuẩn ML không thay đổi. Do đó, cặp nghiệm $(\mathbf{H}, \{s_{k,q}\})$ và $\left(\frac{\mathbf{H}}{\alpha}, \{\alpha s_{k,q}\}\right)$ là tương đương.

Để loại bỏ mơ hồ này, một điều kiện chuẩn hóa được áp dụng: $s_{\{1,1\}} = 1$

Giả thiết này không làm mất tính tổng quát nhưng đảm bảo nghiệm của bài toán là duy nhất về mặt vô hướng.

1.4.5. Thuật toán tách sóng mù tuần hoàn (Blind Cyclic ML)

Do bài toán ML mù không thể giải trực tiếp, một phương pháp hiệu quả là áp dụng thuật toán tối ưu hóa lặp xen kẽ gồm hai bước:

- Tách ký hiệu khi biết kênh tạm thời;
- Cập nhật kênh khi biết ký hiệu tạm thời.

1.4.5.1. Khởi tạo kênh

Đề án đề xuất sử dụng phân tích SVD trên ma trận dữ liệu ghép $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1, \ldots, \mathbf{Y}_M]$, để thu được ước lượng ban đầu $\mathbf{H}^{(0)}$, thường dựa trên singular vector ứng với giá trị kỳ dị lớn nhất. Mặc dù chưa chính xác, bước này giúp thuật toán hội tụ nhanh hơn.

1.4.5.2. Bước 1 – Tách ký hiệu với kênh $\mathbf{H}^{(i)}$

Với ước lượng kênh hiện tại $\mathbf{H}^{(i)}$, statistic ML được tính:

$$\tilde{s}_{k,q}^{(i)} = \frac{\mathrm{tr}\left((\mathbf{H}^{(i)})^H \mathbf{Y}_q \mathbf{A}_k\right)}{\| \mathbf{H}^{(i)} \|_F^2}, \tag{1.66}$$

và việc tách ký hiệu thực hiện bởi:

$$\hat{s}_{k,q}^{(i)} = arg\,min_{s \in \Omega} \left(\tilde{s}_{k,q}^{(i)} - s\right)^2. \tag{1.67}$$

1.4.3.3. Bước 2 – Cập nhật kênh từ các ký hiệu đã tách

Với $\hat{s}_{k,q}^{(i)}$, ma trận mã ước lượng:

$$\mathbf{X}_q^{(i)} = \sum_{k=1}^{N_s} \hat{s}_{k,q}^{(i)} \mathbf{A}_k. \tag{1.68}$$

Bài toán LSE theo kênh được viết:

$$\mathbf{H}^{(i+1)} = \left(\sum_{q=1}^{M} \mathbf{Y}_q (\mathbf{X}_q^{(i)})^H \right) \left(\sum_{q=1}^{M} \mathbf{X}_q^{(i)} (\mathbf{X}_q^{(i)})^H \right)^{-1}. \tag{1.68}$$

Nhờ tính trực giao OSTBC, ma trận nghịch đảo có dạng tỉ lệ với đơn vị, qua đó giảm đáng kể khối lượng tính toán.

Thuật toán dừng khi tập các ký hiệu ước lượng không thay đổi trong hai vòng lặp liên tiếp. Thông thường chỉ cần 2–5 vòng lặp để hội tụ trong điều kiện SNR trung bình trở lên.

1.4.6. Tách sóng bán mù (Semi-Blind ML Detection)

Tách sóng bán mù cải thiện hiệu năng của tách sóng mù bằng cách sử dụng một từ mã huấn luyện duy nhất để khởi tạo kênh chính xác hơn, sau đó áp dụng các bước lặp giống thuật toán mù.

1.4.6.1 Ước lượng kênh từ khối pilot

Với khối pilot $\mathbf{X}_1$ đã biết:

$$\mathbf{H}^{(0)} = \mathbf{Y}_1 \mathbf{X}_1^H \left(\mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^H \right)^{-1}, \tag{1.70}$$

và do tính trực giao của OSTBC:

$$\mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^H = \left(\sum_{k=1}^{N_s} |s_{k,1}|^2 \right) \mathbf{I}, \tag{1.71}$$

nên:

$$\mathbf{H}^{(0)} = \frac{\mathbf{Y}_1 \mathbf{X}_1^H}{\sum_k |s_{k,1}|^2}. \tag{1.72}$$

1.4.6.2 Vòng lặp bán mù

Sau khi thu được ước lượng kênh ban đầu $\mathbf{H}^{(0)}$ từ khối pilot, các khối dữ liệu còn lại $q = 2, \ldots, M$ sẽ được giải mã theo vòng lặp tối ưu hóa xen kẽ (alternating optimization). Vòng lặp này gồm hai bước chính: Bước 1: Tách ký hiệu với kênh hiện thời; Bước 2:

Cập nhật kênh từ các ký hiệu đã giải mã. Hai bước này được lặp lại cho tới khi hội tụ.

* Bước 1 – Tách ký hiệu của các khối dữ liệu

Với ước lượng kênh tại vòng lặp thứ i là $\mathbf{H}^{(i)}$ statistic ML cho khối q và ký hiệu thứ k được tính theo:

$$\tilde{s}_{k,q}^{(i)} = \frac{\mathrm{tr}\left(\left(\mathbf{H}^{(i)}\right)^H \mathbf{Y}_q \mathbf{A}_k\right)}{\left\|\mathbf{H}^{(i)}\right\|_F^2}. \tag{1.73}$$

Statistic này có dạng tương tự bộ giải ML clairvoyant nhưng sử dụng kênh ước lượng thay cho kênh thật. Sau đó, ký hiệu được ước lượng bằng cách chiếu statistic lên tập chòm sao:

$$\hat{s}_{k,q}^{(i)} = \arg\min_{s\in\Omega}\left(\tilde{s}_{k,q}^{(i)} - s\right)^2. \tag{1.74}$$

Nhờ tính trực giao của OSTBC, mỗi ký hiệu $s_{k,q}$ được giải mã độc lập với các ký hiệu khác, do đó độ phức tạp giải mã thấp và tốc độ hội tụ thường nhanh hơn so với hệ STBC tổng quát.

Bước 2 – Cập nhật ma trận kênh theo LSE

Khi các ký hiệu của toàn bộ các khối dữ liệu (trừ khối pilot) đã được ước lượng, ta xây dựng lại ma trận mã của từng khối:

$$\mathbf{X}_q^{(i)} = \sum_{k=1}^{N_s} \hat{s}_{k,q}^{(i)} \mathbf{A}_k. \quad q = 2,\ldots,M \tag{1.75}$$

Kênh mới được cập nhật bằng cách giải bài toán bình phương tối thiểu:

$$\mathbf{H}^{(i+1)} = \arg\min_{\mathbf{H}} \sum_{q=1}^{M} \left\|\mathbf{Y}_q - \mathbf{H}\mathbf{X}_q^{(i)}\right\|_F^2. \tag{1.76}$$

Giải theo LSE:

$$\mathbf{H}^{(i+1)} = \left(\sum_{q=1}^{M} \mathbf{Y}_q \left(\mathbf{X}_q^{(i)}\right)^H\right)\left(\sum_{q=1}^{M} \mathbf{X}_q^{(i)} \left(\mathbf{X}_q^{(i)}\right)^H\right)^{-1}. \tag{1.77}$$

Trong đó, khối pilot $\mathbf{X}_1$ dùng để tăng độ ổn định khi cập nhật kênh. Nhờ cấu trúc trực giao của OSTBC, ma trận $\mathbf{X}_q^{(i)}$, $\left(\mathbf{X}_q^{(i)}\right)^H$ gần như là bội của đơn vị, giúp việc tính nghịch đảo đơn giản và tốc độ cập nhật kênh nhanh.

* Bước 3 – Lặp đến khi hội tụ

Hai bước trên được thực hiện lặp lại theo chỉ số i= 0, 1, 2... Quá trình lặp dừng khi thỏa mãn một trong các tiêu chí:

Các ký hiệu tách được của hai vòng lặp liên tiếp không thay đổi: $\hat{s}_{k,q}^{(i+1)} = \hat{s}_{k,q}^{(i)}, \forall k, q.$

Hoặc số vòng lặp đạt ngưỡng tối đa N_{iter} (thường 5–15 vòng).

Trong các kịch bản SNR trung bình và cao, vòng lặp bán mù thường hội tụ rất nhanh nhờ việc khởi tạo kênh chính xác từ khối pilot. Điều này giúp giảm đáng kể sai lệch ước lượng kênh so với bộ tách mù hoàn toàn, đồng thời cải thiện BER rõ rệt.

Như vậy ta có thể thấy thuật toán bán mù là sự kết hợp giữa: Ước lượng kênh dựa trên pilot độ chính xác cao, khai thác cấu trúc trực giao OSTBC (giảm độ phức tạp), Tối ưu hóa xen kẽ giữa tách ký hiệu và cập nhật kênh (tăng độ hội tụ).

Nhờ vậy, bộ tách bán mù thường có BER gần với bộ thu ML clairvoyant nhưng chỉ phải tốn một lượng nhỏ tốc độ dữ liệu $1/M$, trong khi vẫn duy trì độ phức tạp tính toán ở mức chấp nhận được.

Tốc độ dữ liệu hiệu dụng: $R = 1 - \frac{1}{M}$, rất gần tốc độ tối đa $R = 1$ khi M đủ lớn. Bù lại, hiệu năng BER tiệm cận bộ thu có CSI hoàn hảo và vượt trội so với tách sóng mù hoàn toàn.

1.5. Kết luận chương

Chương 1 của đề án đã trình bày một cách hệ thống các cơ sở lý thuyết và tổng quan nghiên cứu liên quan đến bài toán tách sóng trong hệ thống MIMO sử dụng mã khối không gian–thời gian trực giao (OSTBC). Trước hết, chương đã làm rõ nguyên lý mã hóa không gian–thời gian STBC, đặc biệt là các mã OSTBC dựa trên cấu trúc trực giao, qua đó chỉ ra khả năng khai thác phân tập toàn phần và ưu điểm nổi bật trong việc đơn giản hóa bộ tách sóng khi thông tin trạng thái kênh được biết tại phía thu.

Tiếp theo, các phương pháp tách sóng OSTBC trong trường hợp biết kênh và trường hợp ước lượng kênh bằng thuật toán bình phương tối thiểu đã được phân tích chi tiết cho cả tín hiệu thực và tín hiệu phức. Kết quả cho thấy tính trực giao của OSTBC cho phép phân rã bài toán giải mã ML thành các bài toán giải mã độc lập theo từng ký hiệu, từ đó giảm đáng kể độ phức tạp tính toán mà vẫn đảm bảo hiệu năng tối ưu.

Trên cơ sở đó, chương đã tổng quan các phương pháp tách sóng mù và bán mù cho OSTBC, bao gồm các tiếp cận dựa trên ước lượng mù kênh, ML tuần hoàn, SDR, SD, LP cũng như các thuật toán ILS và E-ILS. Phân tích đã chỉ ra những vấn đề mang tính bản chất của tách sóng mù OSTBC, như hiện tượng không nhận dạng duy nhất, mơ hồ vô hướng và pha, sự phụ thuộc vào độ dài khung, cũng như các hạn chế về độ phức tạp và khả năng áp dụng đối với các chòm sao điều chế bậc cao như QAM.

Những kết quả phân tích trong Chương 1 cho thấy rằng, mặc dù tách sóng mù cho hệ thống MIMO–OSTBC là một hướng tiếp cận đầy tiềm năng nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng phổ và giảm phụ thuộc vào tín hiệu huấn luyện, các phương pháp hiện có vẫn chưa đáp ứng đồng thời các yêu cầu về tính mù hoàn toàn, độ phức tạp thấp và hiệu năng cao trong các kịch bản thực tế. Do đó, cần thiết phải nghiên cứu và đề xuất một giải pháp tách sóng mù mới, khai thác sâu hơn cấu trúc trực giao của OSTBC, đồng thời khắc phục các mơ hồ tín hiệu và mở rộng khả năng áp dụng cho các kiểu điều chế QAM.

Xuất phát từ những vấn đề đặt ra trên, **Chương 2 của đề án sẽ tập trung đề xuất giải pháp tách sóng mù hoàn toàn cho hệ thống MIMO–OSTBC**, với mục tiêu loại bỏ nhu cầu sử dụng tín hiệu huấn luyện, giảm độ phức tạp tính toán và cải thiện hiệu năng hệ thống, làm cơ sở cho các đánh giá và kiểm chứng bằng mô phỏng trong chương 3 của đề án.

Chương 2 - ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP TÁCH SÓNG MÙ CHO HỆ THỐNG MIMO-OSTBC

Dựa trên cơ sở tổng hợp các phân tích lý thuyết ở Chương 1, Chương 2 hướng tới đề xuất một giải pháp tách sóng mù hoàn toàn (fully blind) cho hệ thống MIMO–OSTBC, dựa trên thuật toán Cyclic Maximum Likelihood (Cyclic-ML) được cải tiến, nhằm loại bỏ các mơ hồ tín hiệu mà không cần tín hiệu huấn luyện. Hai yếu tố then chốt cấu thành nền tảng của phương pháp đề xuất gồm:

Thứ nhất, áp dụng biến đổi chòm điều chế (constellation transformation) trên QAM để xây dựng các tập tín hiệu có tính chất chu kỳ và bất biến pha, giúp loại bỏ mơ hồ pha và tỷ lệ vốn tồn tại trong các thuật toán ML truyền thống.

Thứ hai, tích hợp cơ chế ước lượng kênh lặp (iterative channel refinement) giữa các bước tách dữ liệu và cập nhật kênh, giúp hội tụ nhanh hơn và tăng độ ổn định so với phương pháp ILS hoặc EM thông thường.

2.1. Một số hạn chế trong các phương pháp tách sóng mù hiện tại

Tách sóng mù, với vai trò là một phương án quan trọng, góp phần cải thiện đáng kể hiệu suất sử dụng phổ trong các hệ thống MIMO. Tuy nhiên, các phương pháp tách sóng mù cũng phải đối mặt với nhiều thách thức như độ phức tạp hoặc khả năng áp dụng với các kiểu điều chế tín hiệu. Trong các nguồn tham khảo [13], [15], [10], các tác giả đã đưa ra các bộ tách sóng mù và bán mù khác nhau dựa trên sự phục hồi bán xác định (SDR) và bộ giải mã hình cầu (SD) đã được đề xuất cho OSTBC. Kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy các bộ tách sóng mù hoặc bán mù mang lại cải thiện đáng kể về tỷ lệ lỗi bit (BER) khi so sánh với kỹ thuật tách sóng ML tuần hoàn. Mặc dù vậy, một bất cập lớn của các kỹ thuật tách sóng mù và bán mù này đó là sự giới hạn trong việc áp dụng đối với các kiểu điều chế, hay chỉ phù hợp với một số kiểu điều chế nhất định. Cụ thể, bộ tách sóng dựa trên SDR chỉ áp dụng cho các chòm sao Khóa dịch pha nhị phân (BPSK) và Khóa dịch pha vuông góc (QPSK) cho các bài toán tách sóng của mình. Bên cạnh đó, bộ tách SD có thể hoạt động với bất kỳ chòm sao dịch pha (PSK) nào, nhưng nó không đưa ra các phương án tối ưu hoặc ứng dụng cho các chòm sao điều chế biên

độ vuông góc (QAM) [3]. Ngoài ra, các thuật toán này có cấu trúc xử lí phức tạp khá cao cũng là một hạn chế. Những nhược điểm này khiến các kỹ thuật tách sóng mù hoặc bán mù đã đề xuất khó đáp ứng được với các hệ thống có thể áp dụng nhiều kiểu điều chế khác nhau, hoặc yêu cầu độ phức tạp thấp.

2.2. Ý tưởng đề xuất giải pháp mới

Trong đề án này, tác giả xem xét, đề xuất giải pháp tách sóng hoàn toàn mù trong hệ thống MIMO-OSTBC không sử dụng bất kỳ tín hiệu huấn luyện nào, nhằm tránh ảnh hưởng đến hiệu suất sử dụng phổ. Chúng ta thấy rằng, các từ mã OSTBC được thiết kế cho một số lượng lớn ăng-ten phát (N_t), hệ thống có tốc độ truyền bị giới hạn bởi $\frac{\bar{n}_T/2+1}{n_T}$ đối với các giá trị N_t chẵn [11]. Do đó, việc sử dụng các tín hiệu huấn luyện trong hệ thống này làm giảm đáng kể tốc độ truyền, điều này khiến các hệ thống trên kém hấp dẫn hơn đối với các ứng dụng thực tế.

Trong đề án này tác giả đề xuất việc sửa đổi các chòm sao tín hiệu điều chế biên độ vuông góc (QAM) được truyền đi để giảm thiểu sự mơ hồ về ký hiệu. Bên cạnh đó, chúng tôi phát triển bộ tách sóng A-CML để khôi phục các các từ mã OSTBC với các ký hiệu được lấy ra từ các chòm sao đã sửa đổi. Bằng cách tận dụng các chòm sao đã sửa đổi này và lấy trung bình các ma trận tín hiệu thu được, có thể thu được một ước tính kênh ban đầu mới, cho phép bộ tách sóng được đề xuất đồng thời ước lượng trạng thái kênh và khôi phục các tín hiệu phát mà không cần bất kỳ tín hiệu huấn luyện dẫn nào. Điều này cho phép bộ tách sóng đề xuất cải thiện đáng kể hiệu suất sử dụng phổ.

Bộ tách sóng mù A-CML đề xuất hoạt động theo hai pha: Trong pha đầu tiên, bộ tách sóng A-CML tạo ra một ước lượng kênh ban đầu bằng cách lấy trung bình các ma trận tín hiệu thu được trên một khung các từ mã Q. Trong pha thứ hai, sử dụng các kết quả ước lượng kênh ban đầu để khôi phục các ký hiệu đã truyền và ước lượng lại ma trận kênh theo kiểu tuần hoàn, tương tự như phương pháp tách song ML tuần hoàn được đề xuất trong [18].

2.3. Mô hình hệ thống và thuật toán đề xuất

2.3.1. Mô hình OSTBC với các chòm sao phức

Xem xét tập ký hiệu phức $\{s_1, s_2, \ldots, s_{N_a}\}$ được truyền đi trong hệ thống MIMO với n_T ăng-ten phát và n_R ăng-ten thu. $s_k, k = 1, \ldots, N_s$ có thể được lấy ra từ chòm sao QAM với M điểm tín hiệu, hay $s_k \in \Omega$. Chòm sao Ω được chuẩn hoá với năng lượng ký hiệu trung bình bằng $E_s = 1$. Phía phát tạo ra một mã OSTBC $\mathbf{S} = \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k \Re s_k + 2\mathbf{B}_k \Im s_k$ từ các ma trận $\{\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k\}$ có kích thước $n_T \times N_t$ là các ma trận phân tán và truyền s qua kênh MIMO phẳng tần số, gần như tĩnh tại các thời điểm 1, 2,…, N_t

Đối với các bộ mã OSTBCs phức, các ma trận phân tán $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k$ phải đáp ứng các điều kiện sau [20]:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{A}_k^H = C\mathbf{I}_{n_T}, \mathbf{B}_k \mathbf{B}_k^H = C\mathbf{I}_{n_T}, \quad \mathbf{A}_l \mathbf{A}_k^H = -\mathbf{A}_k \mathbf{A}_l^H, \mathbf{B}_l \mathbf{B}_k^H = -\mathbf{B}_k \mathbf{B}_l^H \tag{2.1}$$

$$\mathbf{A}_l \mathbf{B}_k^H = \mathbf{B}_k \mathbf{A}_l^H, \text{ với } k \neq l \tag{2.2}$$

trong đó, C là hằng số.

Theo các tính chất trên, ma trận:

$$\mathbf{S} = \sum_{k=1}^{N_s} \left(\mathbf{A}_k \Re(s_k) + j\mathbf{B}_k \Im(s_k) \right) \in \mathbb{C}^{n_T \times N_t} \tag{2.3}$$

có giá trị phức và thỏa mãn điều kiện:

$$\mathbf{S}\mathbf{S}^H = C \| \mathbf{s} \|^2 \mathbf{I}_{n_T} \tag{2.4}$$

Giả sử ma trận kênh $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{n_R \times n_T}$ không đổi trong quá trình truyền một từ mã. Khi đó, ma trận tín hiệu thu được có thể được viết dưới dạng:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{S} + \mathbf{V} = \mathbf{H}\left(\sum_{k=1}^{N_s} \left(\mathbf{A}_k \Re(s_k) + j\mathbf{B}_k \Im(s_k) \right) \right) + \mathbf{V}, \tag{2.5}$$

trong đó $\mathbf{V}$ biểu thị ma trận nhiễu Gauss trắng cộng (AWGN), các phần tử của ma trận này có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng σ_n^2.

Giả sử $\mathbf{H}$ được được biết tại phía máy thu, bộ tách sóng ML sẽ giải mã $\{s_k\}, k = 1, 2, \ldots, N_s$, (trên các chòm sao) để tối thiểu theo biểu thức sau:

$$\|\mathbf{Y}-\mathbf{HS}\|^2=\left\|\mathbf{Y}-\mathbf{H}\left(\sum_{k=1}^{N_s}\left(\mathbf{A}_k\Re(s_k)+j\mathbf{B}_k\Im(s_k)\right)\right)\right\|^2. \quad (2.6$$

Nhờ các tính chất của $\{\mathbf{A}_k,\mathbf{B}_k\}$ trong biểu thức (2.1), chúng ta thu được các chòm sao tín hiệu QAM/PSK như sau [18]:

$$\hat{s}_k=\arg\min_{s_k\in\Omega}\left|\tilde{s}_k-s_k\right|^2, \quad (2.7)$$

trong đó: $\tilde{s}_k=\dfrac{\Re\left(\mathrm{tr}(\mathbf{Y}^H\mathbf{H}\mathbf{A}_k)\right)-j\Im\left(\mathrm{tr}(\mathbf{Y}^H\mathbf{H}\mathbf{B}_k)\right)}{C\|\mathbf{H}\|^2}$, $k=1,\ldots,N_s$.

2.3.2. Tách sóng mù với chòm sao phức

Xem xét lại kịch bản hệ thống với **H** được giả định là hằng số trên một khung gồm Q từ mã OSTBC phức $(Q>1)$. Theo (2.5), biểu thức hệ thống phức cho từ mã thứ q, $q=1,..,Q$ được cho bởi:

$$\mathbf{Y}_q=\mathbf{HS}_q+\mathbf{V}_q \quad (2.8)$$

Giả sử $\mathbf{V}_k$ và $\mathbf{V}_q$ (với $q\neq p$) độc lập với nhau, thì tách sóng mù ML cho hệ thống phức hợp được đưa ra bởi [20]:

$$\{\mathbf{H},\hat{s}_{k,q}\}=\arg\min_{\mathbf{H},s_{k,q}\in\Omega}\sum_{q=1}^{Q}\left\|\mathbf{Y}_q-\mathbf{HS}_q\right\|^2, \quad (2.9)$$

trong đó **H** chưa biết và $s_{k,q}$ được ước lượng $s_{k,p}$ biểu thị ký hiệu thứ $k=1,\ldots,N_s$, trong từ mã thứ q $(q=1,\ldots,Q)$; và:

$$\mathbf{S}_q=\sum_{k=1}^{N_s}\mathbf{A}_k\Re(s_{k,q})+j\mathbf{B}_k\Im(s_{k,q}). \quad (2.10)$$

Trong bối cảnh của OSTBC, quá trình giải quyết vấn đề tách sóng mù trong (2.9), dù tối ưu hay không có thể được đơn giản hóa bằng cách khai thác cấu trúc phân tán tuyến tính và trực giao của các từ mã OSTBC. Một số thuật toán để xử lý (2.9), bao gồm phương pháp ML tuần hoàn [9 ; 18], phương pháp dạng đóng [2], sự phục hồi bán xác định (SDR) và tách sóng cầu [13], [10], [3]. Tuy vậy, điểm mấu chốt cần lưu ý là SDR chỉ áp dụng cho kiểu điều chế BPSK và QPSK, trong khi tách sóng cầu hoạt động tốt nhất với các chòm sao PSK. Một điểm quan trọng là vì độ phức tạp tính toán cao, SDR và giải mã hình cầu thường không thực tế đối với các hệ thống MIMO.

Đối với phương pháp ML tuần hoàn, ước lượng kênh ban đầu của $\mathbf{H}$, tức là $\mathbf{H}$ thu được bằng cách sử dụng một từ mã thí điểm hoặc phương phân tích giá trị đơn nhất (SVD). Sau đó, bộ tách sóng sử dụng $\mathbf{H}$ để khôi phục các ký hiệu đã truyền $\hat{s}_{k,q}$ với $k=1,\ldots,N_s$ và $(q=1,\ldots,Q)$. Sử dụng (7) với $\mathbf{H}=\mathbf{H}$, sau đó, các ký hiệu truyền đã khôi phục $\{\hat{s}_{k,q}\}$ được sử dụng để ước lượng lại kênh như sau [18]:

$$\mathbf{H}=\frac{\sum_{q=1}^{Q}\mathbf{Y}_q\mathbf{S}_q^H}{C\sum_{q=1}^{Q}\left\|\hat{s}_q\right\|^2}, \tag{2.11}$$

trong đó $\mathbf{S}_q=\left[\hat{s}_{1,q}\ \ \hat{s}_{2,q}\ \cdots\ \hat{s}_{N_s,q}\right]^T$, và $\mathbf{S}_q$ được tạo ra dựa trên (2.3) với $s_{k,q}=\tilde{s}_{k,q}$. Quá trình tách tín hiệu và ước tính kênh luân phiên được lặp lại cho đến khi tiêu chí dừng được thỏa mãn. Cần lưu ý rằng, do việc sử dụng một số lượng nhỏ tín hiệu huấn luyện như đã giả định trong [18], cần phải tinh chỉnh lặp lại các ước lượng kênh để cải thiện độ chính xác của việc tách sóng OSTBC. Khi có sẵn một số lượng lớn tín hiệu huấn luyện, thông tin kênh chính xác có thể được thu thập mà không cần phải tinh chỉnh lặp lại.

2.3.3. Sửa đổi chòm sao cho tách sóng mù

Từ biểu thức (2.9) ta có thể xác định $\left(\mathbf{H},\mathbf{S}_q\right)$ và $\left(-\mathbf{H},-\mathbf{S}_q\right)$ bằng phương pháp ML. Hơn nữa, đối với các từ mã OSTBCs có thể xoay như Alamouti OSTBC hoặc OSTBC thực có tỉ lệ bằng 1 với $n_T=4$ [12], luôn tồn tại một ma trận $\mathbf{Q},(\mathbf{Q}\neq\pm\mathbf{I},\mathbf{Q}^H\mathbf{Q}=\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H=\mathbf{I})$ sao cho $\left(\mathbf{H},\mathbf{S}_q\right)$, $\left(\mathbf{H}\mathbf{Q}^H,\mathbf{Q}\mathbf{S}_q\right)$ và $\left(\mathbf{H}\mathbf{Q},\mathbf{Q}^H\mathbf{S}_q\right)$ đều là các nghiệm của (2.9). Kết quả nghiên cứu trong [12] đã chỉ ra rằng việc xoay ma trận Q phải thoả mãn các điều kiện sau:

$$\left\{\pm\mathbf{A}_2\mathbf{A}_1^H,\pm\mathbf{A}_3\mathbf{A}_1^H,\ldots,\pm\mathbf{A}_{N_s}\mathbf{A}_1^H,\pm j\mathbf{B}_1\mathbf{A}_1^H,\pm j\mathbf{B}_2\mathbf{A}_1^H,\ldots,\pm j\mathbf{B}_{N_s}\mathbf{A}_1^H\right\}$$

Một ví dụ với OSTBC Alamouti với kiểu điều chế 16-QAM, hay $\Omega=\{s_k\mid k=1,2,\ldots,16\}$, trong đó các giá trị thực và ảo của s_k được lấy từ tập $\left\{\pm\frac{1}{\sqrt{10}},\pm\frac{3}{\sqrt{10}}\right\}$.

Chúng ta định nghĩa $\mathbf{Q} = j\mathbf{B}_2\mathbf{A}_1^H = \begin{bmatrix} 0 & j \\ j & 0 \end{bmatrix}$, do đó:

$$\mathbf{Q}\frac{1}{\sqrt{10}}\begin{bmatrix} -3-j & 1-j \\ -1-j & -3+j \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{10}}\begin{bmatrix} 1-j & -1-j^3 \\ 1-j^3 & 1+j \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Biểu thức (2.12) đã chỉ ra rằng, cả hai véc tơ tín hiệu $\mathbf{s} = \frac{1}{\sqrt{10}}[-3-j, -1-j]^T$ và $\tilde{\mathbf{s}} = \frac{1}{\sqrt{10}}[1-j, 1-j^3]^T, \tilde{\mathbf{s}} \neq \pm\mathbf{s}$ đều có thể là nghiệm của bài toán tách sóng mù (2.9).

Có thể thấy rằng, để tách sóng OSTBC hoàn toàn mù mà không cần tín hiệu huấn luyện cần phải giải quyết vấn đề khả năng xoay của OSTBC và sự mơ hồ của tín hiệu. Trong [3], các tác giả đã đưa ra các sơ đồ tách sóng chùm kép và chồng chập. Tuy nhiên, phương pháp chùm kép làm giảm tốc độ truyền dẫn do sử dụng bậc điều chế thấp hơn. Hơn nữa, nó gây ra tổn thất 4 dB so với bộ tách sóng dựa trên các tín hiệu huấn luyện ở BER=10^{-3}. Để giải quyết những tồn tại đã đề cập ở trên, đề án đề xuất sửa đổi các chòm sao thông thường và đưa ra những điều kiện thiết yếu để có thể loại bỏ sự mơ hồ của tín hiệu mà không gây ra tổn thất lớn về phẩm chất BER hệ thống.

Thay vì sử dụng các chòm sao thông thường để truyền tín hiệu, đề án đề xuất sử dụng các chòm sao M-QAM đã được cải tiến, được xây dựng dựa trên các chòm sao thông thường, như sau:

$$\Omega_m = \left\{ \frac{s_k + \alpha}{\gamma_m} : s_k \in \Omega, k = 1, \ldots, M \right\}, \quad (2.13)$$

trong đó, α là một số thực và $\gamma_m = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}|s_k + \alpha|^2} = \sqrt{\alpha^2 + 1}$ là hệ số chuẩn hóa để đảm bảo rằng năng lượng ký hiệu trung bình của Ω_m bằng 1.

2.3.3.1. Đường bao trên theo $|\alpha|$

Khi một chòm sao mới được xây dựng dựa trên (2.13), có thể dễ dàng xác minh được rằng khoảng cách giữa các điểm tín hiệu lân cận giảm khi α lớn hơn, do đó làm giảm hiệu suất hệ thống về BER. Trong điều kiện bất lợi nhất, α nên được chọn sao cho hiệu suất hệ thống tương đương với DUSTM [7]. Nói cách khác, độ suy giảm hiệu suất BER của Ω_m phải nằm trong khoảng 3 dB (so với SNR) so với Ω. Do đó, giới hạn trên

của |α| được xác định như trong sau:

Mệnh đề 1: Giả sử Ω là một chòm sao QAM thông thường với năng lượng ký hiệu trung bình và Ω_m là chòm sao biến đổi tương ứng được định nghĩa trong (2.13). Một mã OSTBC với các ký hiệu được rút ra từ Ω_m sẽ bị suy hao trong phạm vi 3dB về SNR so với chính nó với các ký hiệu được rút ra từ Ω cho cùng một bậc điều chế nếu α được chọn là $|\alpha| \leq 1$.

Chứng minh: Xét hai điểm tín hiệu lân cận $s_k, s_l \in \Omega$. Khoảng cách Euclidean giữa hai điểm này bằng $d(s_k, s_l) = |s_k - s_l|$. Sử dụng (2.13), ta có:

$$\begin{aligned} \breve{s}_k &= \frac{s_k + \alpha}{\gamma_m} = \frac{s_k + \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}, \\ \breve{s}_l &= \frac{s_l + \alpha}{\gamma_m} = \frac{s_l + \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}. \end{aligned} \tag{2.14}$$

Dễ nhận thấy rằng $\breve{s}_k$ và $\breve{s}_l$ cũng là hai điểm tín hiệu lân cận trong Ω_m có khoảng cách Euclid được định nghĩa là $d(\breve{s}_k, \breve{s}_l) = |\breve{s}_k - \breve{s}_l|$.

Từ (2.14), ta suy ra:

$$d(\breve{s}_k, \breve{s}_l) = \frac{|s_k - s_l|}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} = \frac{d(s_k, s_l)}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}. \tag{2.15}$$

Phương trình (2.15) cho thấy khoảng cách giữa hai điểm tín hiệu lân cận theo Ω_m giảm đi một hệ số $\sqrt{\alpha^2 + 1}$ so với theo Ω. Do đó, để đảm bảo suy hao trong phạm vi 3dB, chúng ta phải có:

$$d(\breve{s}_k, \breve{s}_l) \leq \frac{d(s_k, s_l)}{\sqrt{2}} \text{ hoặc } \alpha^2 + 1 \leq 2, \tag{2.16}$$

tương đương với:

$$|\alpha| \leq 1. \tag{2.17}$$

2.3.3.2. Đường dưới theo $|\alpha|$

Giả sử hệ thống sử dụng các chòm sao đã sửa đổi để tạo ra một khung gồm Q từ mã OSTBC phức, $\mathbf{S}_q, q = 1, \ldots, Q$, và truyền tín hiệu đến máy thu. Tại máy thu, ma trận

tín hiệu thu được lại được cho bởi (2.8). Lấy trung bình của Q ma trận tín hiệu thu được, ta có:

$$\mathbf{E}_Y = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\mathbf{Y}_q \tag{2.18}$$

$$= \mathbf{H}\left(\frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\mathbf{S}_q\right) + \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\mathbf{V}_q. \tag{2.19}$$

Chúng ta định nghĩa:

$$\mathbf{E}_S = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\mathbf{S}_q, \tag{2.20}$$

$$\mathbf{E}_V = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\mathbf{V}_q. \tag{2.21}$$

Biểu thứ (2.19) có thể được viết lại như sau:

$$\mathbf{E}_Y = \mathbf{H}\mathbf{E}_S + \mathbf{E}_V. \tag{2.22}$$

Thay (2.10) vào (2.20), và xét đến cấu trúc của các điểm tín hiệu trong các chòm sao đã sửa đổi, ta có:

$$\mathbf{E}_S = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\left(\sum_{k=1}^{N_s}\mathbf{A}_k\frac{\Re(s_{k,q})+\alpha}{\gamma_m} + j\mathbf{B}_k\frac{\Im(s_{k,q})}{\gamma_m}\right)$$

$$= \sum_{k=1}^{N_s}\mathbf{A}_k\zeta_{R,k} + j\mathbf{B}_k\zeta_{I,k}, \tag{2.23}$$

Ở đây $s_{k,q} \in \Omega$ và:

$$\zeta_{R,k} = \frac{\alpha}{\gamma_m} + \frac{1}{\gamma_m Q}\sum_{q=1}^{Q}\Re(s_{k,q}), \tag{2.24}$$

$$\zeta_{I,k} = \frac{1}{\gamma_m Q}\sum_{q=1}^{Q}\Im(s_{k,q}). \tag{2.25}$$

Với giả định rằng $\Re(s_{k,q})$ và $\Im(s_{k,q})$ là các biến ngẫu nhiên độc lập và có phân phối như nhau, có độ dài khung Q đủ lớn, $\zeta_{R,k}$ có thể được chứng minh tuân theo phân phối chuẩn với trung bình $\mu_\zeta = \frac{\alpha}{\gamma_m}$ và phương sai $\sigma_\zeta^2 = \frac{1}{2Q\gamma_m^2}$, tức là $\zeta_{R,k} \sim \mathcal{N}(\mu_\zeta, \sigma_\zeta^2)$ (trong Phụ lục A).

Biểu thức (2.23) chỉ ra rằng $\mathbf{E}_s$ là một từ mã OSTBC với các ký hiệu được truyền $\zeta_{R,k} + j\zeta_{I,k}$. Do đó, nếu $\zeta_{R,k} > 0$ hoặc $\zeta_{R,k} < 0$, tức là $|\zeta_{R,k}| > 0$, với xác suất bằng 1, ta luôn có $\mathbf{E}_S \neq -\mathbf{E}_S$ và $\mathbf{E}_S \neq \mathbf{Q}\mathbf{E}_S$ với mọi ma trận $\mathbf{Q}$ thỏa mãn $\mathbf{Q} \neq \pm\mathbf{I}$ và $\mathbf{Q}^H\mathbf{Q} = \mathbf{Q}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I}$. Điều này ngụ ý rằng vấn đề mơ hồ tín hiệu đã được giải quyết hoàn toàn.

Từ biểu thức (2.22), ma trận kênh $\mathbf{H}$ và ma trận tín hiệu $\mathbf{E}_s$ có thể được phục hồi hoàn toàn mù như sau:

$$\{\mathbf{H},\mathbf{E}_S\} = \arg\min_{\mathbf{H},\mathbf{E}_S} \|\mathbf{E}_Y - \mathbf{H}\mathbf{E}_S\|^2 . \quad (2.26)$$

Nếu thu được nghiệm $\{\mathbf{H},\mathbf{E}_S\}$ và $|\zeta_{R,k}| > 0$ với xác suất bằng 1, thì không có khả năng $(-\mathbf{H},-\mathbf{E}_S),(\mathbf{H}\mathbf{Q}^H,\mathbf{Q}\mathbf{E}_S)$ hoặc $(\mathbf{H}\mathbf{Q}, \mathbf{Q}^H\mathbf{E}_S)$ cũng có thể là nghiệm của bài toán tách mù trong (2.26). Nghĩa là $\{\mathbf{H},\mathbf{E}_S\}$ là nghiệm duy nhất.

Với $\zeta_{R,k} \sim \mathcal{N}(\mu_\zeta,\sigma_\zeta^2)$, do đó, điều kiện $|\zeta_{R,k}| > 0$ với xác suất bằng 1 có thể được thỏa mãn khi và chỉ khi $|\alpha| = \infty$. Điều này mâu thuẫn với *Mệnh đề 1*, trong đó $|\alpha| \leq 1$. Để giải quyết mâu thuẫn này, điều kiện $|\zeta_{R,k}| > 0$ với xác suất bằng 1 phải được nới lỏng, từ đó dẫn đến giới hạn dưới của $|\alpha|$ như được định nghĩa trong *Mệnh đề 2*.

Mệnh đề 2: Giả sử κ_p là điểm cắt cho mức độ tin cậy p, trong đó $0 \leq p \leq 1$, α cần được chọn sao cho $|\alpha| > \alpha_L$ và $\alpha_L = \dfrac{\kappa_p}{\sqrt{2Q}}$ là giới hạn dưới của $|\alpha|$, để tạo ra $|\zeta_{R,k}| > 0$ với với mức độ tin cậy p, được chứng minh tại Phụ lục B.

2.3.4. Thuật toán tách sóng mù đề xuất A-CML

Trong tiểu mục này, chúng tôi đề xuất một bộ tách sóng mới, được gọi là bộ tách sóng ML tuần hoàn trung bình (A-CML), sử dụng các chòm sao đã sửa đổi, một phương pháp ước lượng kênh mới và cơ chế ML tuần hoàn để tách sóng mù các ký hiệu được truyền đi và ước lượng kênh mà không sử dụng bất kỳ tín hiệu huấn luyện nào.

2.3.4.1. Kỹ thuật ước lượng kênh mới

Từ (2.23) và (2.24) ta có thể viết:

$$\mathbf{E}_S = \mathbf{\Gamma} + \overline{\mathbf{E}}_S, \tag{2.27}$$

trong đó:

$$\mathbf{\Gamma} = \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k \frac{\alpha}{\gamma_m} = \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k \frac{\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2}}, \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned} \overline{\mathbf{E}}_S &= \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k \left(\zeta_{R,k} - \frac{\alpha}{\gamma_m} \right) + j\mathbf{B}_k \zeta_{I,k} \\ &= \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k z_{R,k} + j\mathbf{B}_k z_{I,k}, \end{aligned} \tag{2.29}$$

$z_{R,k}$ và $z_{I,k}$ được chứng minh trong Phụ lục A.

Từ (2.28) và (2.29) có thể thấy rằng Γ là một OSTBC thực được xây dựng dựa trên tập hợp các ma trận phân tán $\{\mathbf{A}_k\}$ và $N_s \times 1$ véc tơ tín hiệu $\boldsymbol{\alpha} = \frac{1}{\gamma_m}[\alpha\ \alpha \ldots \alpha]^T$, trong khi $\overline{\mathbf{E}}_S$ là một OSTBC phức được xây dựng bằng cách sử dụng $\{\mathbf{A}_k\}$, $\{\mathbf{B}_k\}$ $z_{R,k}$ và $z_{I,k}$, với $k = 1,\ldots,N_s,$.

Từ (2.22) và (2.27), suy ra rằng:

$$\mathbf{E}_Y = \mathbf{H}\mathbf{\Gamma} + \mathbf{H}\overline{\mathbf{E}}_S + \mathbf{E}_V. \tag{2.30}$$

Nhân cả hai vế của (2.30) với $\mathbf{E}_S^H = (\mathbf{\Gamma} + \overline{\mathbf{E}}_S)^H$ ta được:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_Y\mathbf{E}_S^H &= (\mathbf{H}\mathbf{\Gamma} + \mathbf{H}\overline{\mathbf{E}}_S + \mathbf{E}_V)(\mathbf{\Gamma} + \overline{\mathbf{E}}_S)^H \\ &= \mathbf{H}\left(\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}^H + \overline{\mathbf{E}}_S\overline{\mathbf{E}}_S^H\right) + \mathbf{N}_{ES}, \end{aligned} \tag{2.31}$$

Trong đó, $\mathbf{N}_{ES} = \mathbf{H}\left(\mathbf{\Gamma}\overline{\mathbf{E}}_S^H + \overline{\mathbf{E}}_S\mathbf{\Gamma}^H\right) + \mathbf{E}_V(\mathbf{\Gamma} + \overline{\mathbf{E}}_S)^H$ được coi là ma trận nhiễu. Có thể dễ dàng xác minh rằng:

$$\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Gamma}^H = CN_s\left(\frac{\alpha}{\gamma_m}\right)^2 \mathbf{I}_{n_T}, \tag{2.32}$$

Và:

$$\overline{\mathbf{E}}_S\overline{\mathbf{E}}_S^H = C\left(\sum_{k=1}^{N_s}(z_{R,k}^2 + z_{I,k}^2)\right)\mathbf{I}_{n_T}. \tag{2.33}$$

Đối với OSTBC có N_s lớn, ví dụ $N_s \geq 4$, biểu thức (2.33) có thể được tính gần đúng như sau:

$$\overline{\mathbf{E}}_S \overline{\mathbf{E}}_S^H \approx 2CN_s \left[\frac{1}{2N_s} \sum_{k=1}^{2N_s} z_{R,k}^2 \right] \mathbf{I}_{n_T} .$$

$$\approx 2CN_s E\{z_{R,k}^2\} \mathbf{I}_{n_T} = \frac{CN_s}{Q\gamma_m^2} \mathbf{I}_{n_T} . \quad (2.34)$$

Do $\overline{\mathbf{E}}_S$ chưa biết, nên máy thu cũng chưa biết $\mathbf{E}_S$. Mặt khác, dựa trên (1.28), (1.32) và (1.34), máy thu ban đầu có thể tính $\overline{\mathbf{E}}_S$ như sau:

$$\overline{\mathbf{E}}_S = \left(\sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k \right) \frac{1}{\gamma_m \sqrt{Q}} . \quad X`$$

Với giả định rằng SNR là đáng kể và độ dài khung Q đủ lớn, $\mathbf{N}_{ES}$ trong (2.31) có thể được bỏ qua. Do đó, ước tính kênh mới có thể được thu được như sau:

$$\mathbf{H} = \frac{Q\gamma_m^2}{CN_s(\alpha\sqrt{Q}+1)^2} \mathbf{E}_Y \mathbf{E}_S^H . \quad (2.36)$$

Trong đó:

$$\mathbf{E}_S = \mathbf{\Gamma} + \overline{\mathbf{E}}_S = \sum_{k=1}^{N_s} \mathbf{A}_k \left(\frac{\alpha}{\gamma_m} + \frac{1}{\gamma_m \sqrt{Q}} \right) . \quad (2.37)$$

Biểu thức (2.36) chứng minh rõ ràng rằng, bằng cách sửa đổi các chòm sao truyền như trong (2.13), máy thu có thể dễ dàng thu được ước lượng kênh mà không cần bất kỳ tín hiệu huấn luyện nào.

2.3.4.2. Thuật toán tách sóng A-CML

Do hệ thống sử dụng chòm sao Ω_m đã được sửa đổi, nên bộ tách sóng A-CML được đề xuất hoạt động như sau:

Trước hết, thuật toán tính toán giá trị trung bình của Q ma trận tín hiệu thu được như trong (2.18). Thứ hai, thuật toán sử dụng ma trận $\mathbf{E}_S$ trong (2.37) để tạo ra ước tính kênh ban đầu như trong (2.36). Thứ ba, bằng cách giả định $\mathbf{H}$ là ma trận kênh chính xác, thuật toán thực hiện tách các ký hiệu được truyền đi của các từ mã thứ q như sau:

$$\hat{s}_{k,q} = \arg\min_{s_k \in \Omega_m} \left| \tilde{s}_{k,q} - s_k \right|^2 . \quad (2.38)$$

trong đó $\tilde{s}_{k,q} = \frac{\Re\left(\mathrm{tr}\left(\mathbf{Y}_q^H \mathbf{H}\mathbf{A}_k\right)\right) - j\Im\left(\mathrm{tr}\left(\mathbf{Y}_q^H \mathbf{H}\mathbf{B}_k\right)\right)}{C\left\|\mathbf{H}\right\|^2}$. Thứ tư, thuật toán sử dụng các ký hiệu đã tách $\hat{s}_{k,q}$, với $k = 1,\ldots,N_s$, $q = 1,\ldots,Q$ để ước lượng lại kênh bằng theo biểu thức (2.11). Trong các bước tiếp theo, bộ tách A-CML được đề xuất sẽ khôi phục lại các ký hiệu $\hat{S}_{k,q}$ theo biểu thức (2.38) và ước lượng lại kênh dựa trên biểu thức (2.11) cho đến khi các vectơ tín hiệu đã khôi phục không thay đổi hoặc cho đến khi hoàn thành N_i lần lặp.

Thuật toán này có thể khái lược như sau:

Tạo các tham số đầu vào $\alpha, N_i, \{\mathbf{Y}_q\}_{q=1}^{Q}, \{\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k\}_{k=1}^{N_s}$, chòm tín hiệu truyền được điều chỉnh Ω_m với M điểm tín hiệu, số vòng lặp tối đa N_i.

Đảm bảo: Các ký hiệu đã truyền được phát hiện $\hat{s}_{k,q}$ với $k = 1,\ldots,N_s$ và $q = 1,\ldots,Q$.

1: Tạo vòng lặp
2: Tạo ma trận $\mathbf{E}_S$ theo (2.37).
3: Tính ma trận tín hiệu trung bình $\mathbf{E}_Y$ theo (2.18).
4: Tính kênh ban đầu $\mathbf{H}$ theo (2.36).
5: Gán $\breve{s}_{k,q} := 0$ với $k = 1,\ldots,N_s$ và $q = 1,\ldots,Q$
6: Khởi tạo vòng lặp đầu tiên $(i := 1)$.
7. **while** $i \le N_i$ **do**
8. Sử dụng $\hat{\mathbf{H}}$ để tách $\hat{S}_{k,q}$ theo (2.38).
9. **if** $\hat{s}_{k,q} = \breve{s}_{k,q}$ với mọi (*k*, *q*) **then**
10. break.
11. else
12. Gán $\breve{s}_{k,q} := \hat{s}_{k,q}$.
13. Cập nhật việc ước lượng $\hat{\mathbf{H}}$ như biểu thức (2.11).
14. Vòng lặp tiếp theo $(i := i + 1)$.
15. end if
16: end while
17: **Output**: $\hat{s}_{k,q}$ với $k = 1,\ldots,N_s$ và $q = 1,\ldots,Q$.

2.3.5. Phân tích độ phức tạp tính toán bộ tách sóng A-CML

Độ phức tạp tính toán của các thuật toán được tính bằng số lượng dấu phẩy động (FLOP: Floating Point Operation). Quy ước rằng, mỗi phép cộng, trừ, nhân, chia 2 số thực tương đương 1 flop. Mỗi phép nhân và phép chia phức tương đương với 6 và 11 flops [6].

2.3.5.1. Phân tích độ phức tạp tính toán bộ tách sóng A-CML

Dựa trên các giả định trên, độ phức tạp của A-CML có thể được đánh giá như sau:

$$\begin{aligned} C_A &= C_{1,A} + C_{2,A} \\ &= \left[2n_R N_s Q + 4n_R n_T N_s\right] + 8N_s N_t Q(N_s n_R + N_t^2 + n_t^2 n_T) \\ &\quad - N_t\left[N_s Q\left(2(N_t^2 + N_t n_T + n_t^2)\right) + 4N_t + 2n_R + 5M + 2\right] \\ &\quad + Q\left(8n_R n_T N_t + 4N_s - 1\right) + 2 \text{ flops.} \end{aligned} \tag{2.39}$$

Trong đó $C_{1,A}$ và $C_{2,A}$ lần lượt là độ phức tạp của phép khởi tạo và vòng lặp while. Bằng cách loại bỏ các số hạng bậc thấp, độ phức tạp của A-CML xấp xỉ bằng:

$$C_A \approx 2N_t N_s Q\left[N_t n_T(4n_R - 1) + (N_t^2 + n_R^2)(4n_T - 1)\right] \text{ flops} \tag{2.40}$$

Đối với bộ tách sóng A-CML được đề xuất, do không sử dụng tín hiệu huấn luyện, điều này có nghĩa là số bit thông tin trên mỗi khung hình bằng với $QN_s \log_2(M)$. Do đó, độ phức tạp trên mỗi bit thông tin của bộ tách sóng A-CML được cho bởi:

$$\begin{aligned} C_{A,b} &= \frac{C_A}{QN_s \log_2(M)} \\ &\approx \frac{2N_t\left[N_t n_T(4n_R - 1) + (N_t^2 + n_R^2)(4n_T - 1)\right]}{\log_2(M)} \text{ flops.} \end{aligned} \tag{2.41}$$

2.3.5.2. Phân tích độ phức tạp tính toán bộ tách sóng huấn luyện

Đối với bộ tách sóng huấn luyện, một từ mã OSTBC trong một khung Q từ mã OSTBC được sử dụng làm mẫu cho việc ước lượng kênh. Do đó, số bit thông tin trên mỗi khung là $(Q-1)N_s \log_2(M)$. Do đó, độ phức tạp trên mỗi bit của bộ tách sóng huấn luyện được cho bởi:

$$C_{Tr,b} = \frac{C_{Tr}}{(Q-1)N_s \log_2(M)} \approx \frac{8Qn_T\left(N_t n_R + N_t^2 + n_R^2\right)}{(Q-1)\log_2(M)} \text{ flops.} \quad (2.42)$$

2.3.5.3. Phân tích độ phức tạp tính toán bộ tách sóng bán mù

Tương tự như bộ phát tách sóng huấn luyện, số bit thông tin trên mỗi khung của bộ tách sóng bán mù là $(Q-1)N_s \log_2(M)$. Do đó, độ phức tạp trên mỗi bit của bộ tách bán mù được cho bởi:

$$C_{\text{Semi},b} = \frac{C_{\text{Semi}}}{(Q-1)N_s \log_2(M)} \approx \frac{2N_t Q\left[N_t n_T(4n_R - 1) + (N_t^2 + n_R^2)(4n_T - 1)\right]}{(Q-1)\log_2(M)} \text{ flops.} \quad (2.43)$$

2.3.5.4. Phân tích độ phức tạp tính toán bộ tách sóng SD

Giả sử rằng, bộ tách SD hoạt động trong điều kiện tốt nhất, độ phức tạp tổng thể của nó bao gồm độ phức tạp của giai đoạn tiền xử lý C_1 và độ phức tạp của giai đoạn tìm kiếm trường hợp tốt nhất $(C_{SD,\text{best}})$, được biểu thị bằng:

$$\begin{aligned} C_{SD} &= C_1 + C_{SD,\text{best}} \\ &\approx \left(\frac{8}{3}Q^3N_s^3 + 4Q^2N_s^2(4n_R N_t^2 + 8n_R^2 N_t + 1) + 8N_s^2 N_t^2 n_T\right) + (2QN_s - 2L_p + 2)^2 \\ &\approx \left(\frac{8}{3}Q^3N_s^3 + 4Q^2N_s^2(4n_R N_t^2 + 8n_R^2 N_t + 2) + 8N_s^2 N_t^2 n_T\right) \text{flops} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Không giống như các bộ tách sóng huấn luyện hoặc bán mù, bộ tách sóng SD có thể hoạt động chỉ với một hoặc hai tín hiệu huấn luyện thay vì toàn bộ một từ mã OSTBC cho tín hiệu huấn luyện. Tương tự như trường hợp của tách sóng A-CML được đề xuất, chúng ta có thể giả định rằng không cần từ mã tín hiệu huấn luyện cho bộ tách sóng SD. Do đó, số bit thông tin trên mỗi khung được biểu thị bằng $QN_s \log_2(M)$. Do đó, độ phức tạp trên mỗi bit thông tin của bộ dò dựa trên SD được biểu thị bằng:

$$C_{SD,b} = \frac{C_{SD}}{QN_s \log_2(M)} \approx \frac{\left(\frac{8}{3}Q^3N_s^3 + 4Q^2N_s^2(4n_RN_t^2 + 8n_R^2N_t + 2) + 8N_s^2N_t^2n_T\right)}{QN_s \log_2(M)} \text{ flops.} \quad (2.45)$$

2.4. Kết luận chương

Trong chương 2, chúng tôi đã trình bày quá trình phân tích, đánh giá và đề xuất giải pháp tách sóng mù mới cho hệ thống MIMO–OSTBC. Mặt khác, ở chương này, đồ án đã phân tích rõ những điểm còn tồn tại của các phương pháp tách sóng mù tiêu chuẩn trước đây, bao gồm: tính phi lồi và đa nghiệm của bài toán tối ưu song tuyến, hiện tượng mơ hồ pha, tỷ lệ trong ước lượng dữ liệu và kênh; độ phức tạp lớn khi mở rộng sang các kiểu điều chế bậc cao hoặc số lượng ăng-ten thu/phát tăng lên. Những yếu tố này khiến hiệu năng BER của các thuật toán hiện tại khó tiệm cận giới hạn của bộ thu có CSI, đặc biệt trong môi trường pha-đinh nhanh và khi không thể sử dụng tín hiệu huấn luyện cho việc ước lượng kênh truyền.

Trên nền tảng đó, Chương 2 đã đề xuất thuật toán tách sóng mù hoàn toàn dựa trên tiêu chuẩn Averaged Cyclic Maximum Likelihood (A-CML) - một hướng tiếp cận mới kết hợp giữa cấu trúc trực giao của OSTBC và tính chu kỳ của chòm sao điều chế QAM. Các kết quả phân tích về lý thuyết trên đây là nền tảng cốt lõi cho quá trình thực hiện các mô phỏng và đánh giá trong Chương 3.

Chương 3- MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT

Chương 3 Trình bày quá trình xây dựng mô phỏng và đánh giá thực nghiệm cho phương án đề xuất. Chương mô tả việc thiết kế mô phỏng hệ thống trên Matlab, các kịch bản thử nghiệm với nhiều cấu hình khác nhau, và so sánh hiệu năng bộ tách sóng mù với các phương pháp truyền thống. Tiếp theo, chương phân tích lý thuyết hiệu năng, đánh giá ngưỡng BER, khoảng cách chòm tín hiệu và đối chiếu với các kết quả trước đây. Phần kết quả mô phỏng sẽ thảo luận về hiệu quả, độ phức tạp, ưu nhược điểm của phương pháp, đồng thời đưa ra khả năng ứng dụng và mở rộng trong thực tế.

3.1. Xây dựng mô phỏng và đánh giá thực nghiệm

3.1.1. Mục tiêu và phạm vi mô phỏng

Mục tiêu chính của phần mô phỏng là kiểm chứng tính đúng đắn và hiệu quả của bộ tách sóng mù thích nghi A-CML được đề xuất, thông qua việc so sánh với các bộ tách sóng truyền thống như tách sóng huấn luyện, bán mù và SD trong các kịch bản hệ thống MIMO sử dụng mã khối không gian – thời gian trực giao (OSTBC). Các chỉ tiêu đánh giá chính bao gồm: độ phức tạp tính toán, phẩm chất BER, hiệu quả sử dụng phổ và khả năng mở rộng khi số anten và bậc điều chế tăng lên.

Phạm vi mô phỏng tập trung vào các hệ thống MIMO cỡ trung bình và lớn, cụ thể là các cấu hình (6,2) và (8,4), vốn có ý nghĩa thực tiễn trong các hệ thống thông tin không dây thế hệ mới như LTE-A và 5G. Việc lựa chọn các cấu hình này cho phép đánh giá rõ ràng ưu thế của phương pháp mù trong bối cảnh số lượng anten phát lớn hơn anten thu.

3.1.2. Mô hình hệ thống và giả thiết

Hệ thống MIMO được xét gồm Nt anten phát và Nr anten thu, hoạt động trên kênh fading Rayleigh phẳng, bất biến trong suốt một khung truyền và thay đổi độc lập giữa các khung. Nhiễu tại đầu thu được giả thiết là nhiễu Gauss trắng cộng (AWGN) với phương sai σ^2.

Tín hiệu phát được mã hóa bằng OSTBC tỷ lệ 1/2, cho phép khai thác độ lợi phân tập không gian – thời gian trong khi vẫn đảm bảo cấu trúc trực giao, thuận lợi cho việc

tách sóng. Các ký hiệu điều chế được lấy từ chòm sao 16-QAM và 64-QAM, trong đó đối với bộ tách sóng A-CML, chòm sao được cải tiến thông qua tham số điều chỉnh α nhằm phá vỡ tính đối xứng và hỗ trợ quá trình tách sóng mù.

3.1.3. Thiết kế mô phỏng trên Matlab

Toàn bộ quá trình mô phỏng được thực hiện trên môi trường Matlab với các bước chính sau:

1. Sinh chuỗi bit ngẫu nhiên và ánh xạ sang các ký hiệu QAM.
2. Áp dụng mã hóa OSTBC tương ứng với số anten phát.
3. Truyền tín hiệu qua kênh fading Rayleigh và cộng nhiễu AWGN.
4. Thực hiện tách sóng tại đầu thu bằng các thuật toán khác nhau: A-CML, huấn luyện, bán mù và SD.
5. Giải mã OSTBC, giải điều chế và tính toán BER.
6. Lặp lại quá trình trên với số lượng khung lớn để đảm bảo độ tin cậy thống kê.

Các tham số mô phỏng như SNR, độ dài khung Q, số lần lặp thuật toán và bậc điều chế được thay đổi linh hoạt để khảo sát ảnh hưởng của từng yếu tố đến hiệu năng hệ thống.

3.1.4. Kịch bản đánh giá độ phức tạp tính toán

Độ phức tạp tính toán được đo bằng số phép toán dấu phẩy động (flops) trung bình trên mỗi bit thông tin. Kịch bản mô phỏng xem xét sự phụ thuộc của độ phức tạp vào độ dài khung Q, trong khi các tham số khác được giữ cố định. Điều này phản ánh khả năng mở rộng của thuật toán khi hệ thống yêu cầu độ trễ thấp và khung truyền dài.

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ tách sóng A-CML có độ phức tạp gần tương đương bộ tách sóng bán mù và cao hơn bộ tách sóng huấn luyện, nhưng thấp hơn rất nhiều so với bộ tách sóng SD. Đặc biệt, độ phức tạp của A-CML gần như không phụ thuộc vào Q, cho thấy tính ổn định và phù hợp cho các hệ thống truyền dẫn gói dài.

Tại kịch bản mô phỏng độ phức tạp tính toán, đề án tiến hành mô phỏng độ phức tạp trên mỗi bit thông tin so với độ dài khung Q của các bộ tách sóng A-CML đề xuất,

các bộ tách sóng huấn luyện, bán mù và SD với các bộ m OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (8, 4) cụ thể $n_T = 6$, $n_T = 8$, ký hiệu phức và $N_T = 16$ chu kỳ ký hiệu [20].

Với kịch bản mô phỏng đánh giá tỉ lệ lỗi bít (BER), đề án mô phỏng phẩm chất BER của bộ tách sóng A-CML đã đề xuất trong chương trước và so sánh với các bộ tách sóng như: Bộ tách sóng ML trong điều kiện trạng thái kênh truyền hoàn hảo, cũng như các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù [18]. Do không có khả năng tách sóng các ký hiệu điều chế QAM và độ phức tạp cao, phẩm chất BER của bộ tách sóng SD không được đánh giá trong phần tiếp theo. Kỹ thuật điều chế được vận dụng trong các kịch bản mô phỏng là 16-QAM và 64-QAM. Bộ tách sóng A-CML đề xuất sử dụng các chòm sao đã sửa đổi mà không sử dụng bất kỳ ký hiệu huấn luyện nào, trong khi các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù đều sử dụng các chòm sao QAM thông thường với một từ mã OSTBC huấn luyện trên mỗi khung. Mã OSTBC tỷ lệ 1/2 cho $n_T = 6$ và $n_T = 8$, bao gồm $N_s = 8$ ký hiệu phức và $N_t = 16$ chu kỳ ký hiệu, như được trình bày trong [19], được xem xét. Năng lượng ký hiệu trung bình của các chòm sao phát được chuẩn hóa bằng một. Đối với cả bộ tách sóng A-CML đề xuất và bộ tách sóng bán mù, $N_i = 15$ lần lặp được áp dụng. Tuy nhiên, thuật toán sẽ kết thúc khi hoàn thành 15 lần lặp hoặc khi hai khung được khôi phục liên tiếp giống hệt nhau. Tất cả các so sánh phẩm chất BER được thực hiện tại $\mathrm{BER} = 10^{-5}$.

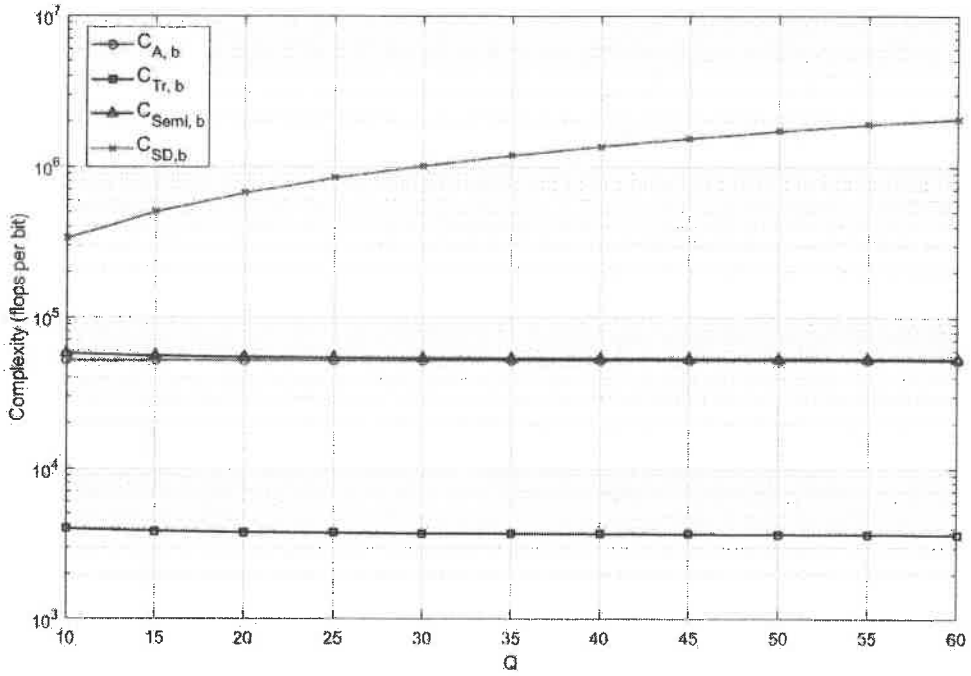
3.2. Kết quả mô phỏng và thảo luận

3.2.1. Mô phỏng và đánh giá độ phức tạp tính toán

Kết quả mô phỏng độ phức tạp tính toán được trình bày trong Hình 3.1 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các bộ tách sóng. Bộ tách sóng huấn luyện có độ phức tạp thấp nhất do cấu trúc đơn giản và dựa trên thông tin CSI ước lượng từ tín hiệu huấn luyện. Tuy nhiên, ưu điểm này phải đánh đổi bằng chi phí huấn luyện và suy giảm hiệu quả phổ.

Ngược lại, bộ tách sóng SD đạt hiệu năng gần ML nhưng có độ phức tạp tăng nhanh theo Q và bậc điều chế, khiến nó không khả thi cho các hệ thống MIMO lớn. Bộ

tách sóng A-CML đạt được sự cân bằng tốt giữa độ phức tạp và hiệu năng, phù hợp với mục tiêu thiết kế của luận văn.



Hình 3.1. Độ phức tạp của các bộ dò A-CML, huấn luyện, bán mù và SD được đề xuất như các hàm của Q khi tách sóng OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (8, 4). Bộ tách A-CML được đề xuất áp dụng với chòm sao 64-QAM đã được sửa đổi, các bộ tách sóng khác sử dụng chòm sao 64-QAM thông thường.

Hình 3.1 thể hiện kết quả mô phỏng độ phức tạp tính toán cho các thuật toán đã mô tả trong kịch bản Mục 3.1. Kết quả mô phỏng trong hình Hình 3.1 cho thấy rằng, bộ tách sóng huấn luyện thể hiện độ phức tạp thấp nhất, bộ tách sóng A-CML đề xuất có độ phức tạp tính toán tương tự bộ tách sóng bán mù. Độ phức tạp của bộ tách sóng SD có độ phức tạp lớn nhất và tăng đáng kể khi Q tăng. Điều này hoàn toàn trái ngược với ba bộ dò còn lại, với độ phức tạp gần như không đổi. Ví dụ, tại $Q = 20$, $C_{SD,b} \approx 6.68\times10^5$ flops, $C_{\text{Semi},b} \approx 5.45\times10^4$ flops, $C_{A,b} \approx 5.18\times10^4$ flops và $C_{Tr,b} \approx 3.77\times10^3$ flops; trong khi tại $Q = 40$, $C_{SD,b} \approx 1.36\times10^6$ flops, $C_{\text{Semi},b} \approx 5.31\times10^4$

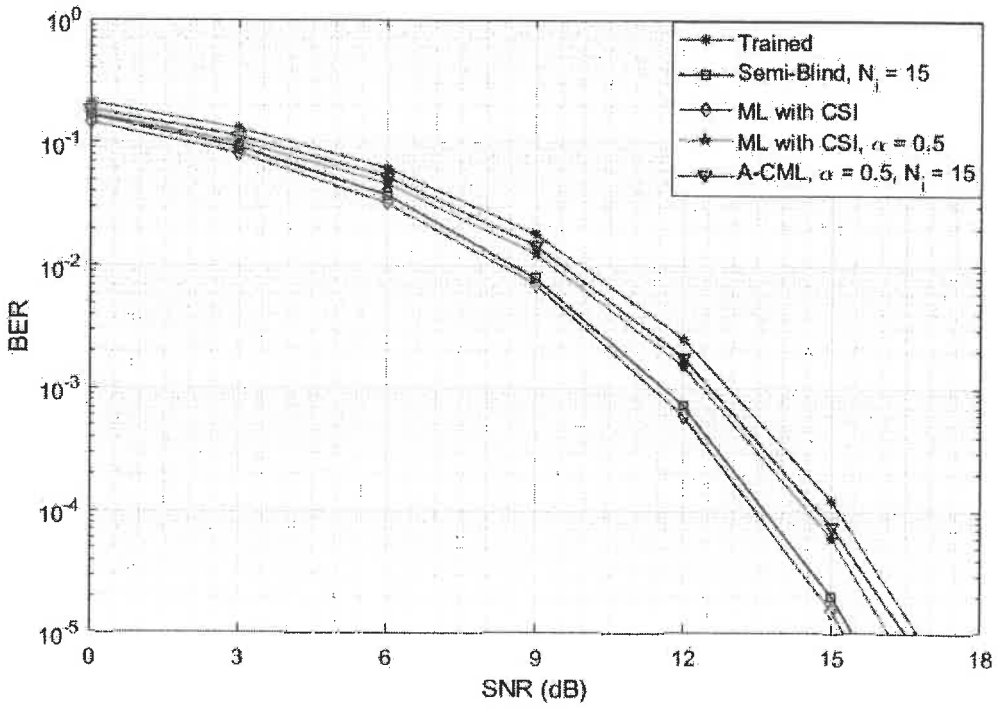
flops, $C_{A,b} \approx 5.18\times10^4$ flops và $C_{Tr,b} \approx 3.68\times10^3$ flops.

3.2.2. Phân tích phẩm chất BER trong hệ thống (6,2)

Trường hợp 1: Thực hiện mô phỏng và tính toán phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống MIMO 6 anten phát 2 anten thu, được tách sóng bởi A-CML đề xuất và các bộ tách sóng mù và bán mù hiện có. Các ký hiệu được truyền được lấy từ các chòm sao 16-QAM thông thường và các chòm sao 16-QAM cải tiến với $\alpha = 0,5$ và độ dài khung: Q = 12.

Trong cấu hình (6,2) với điều chế 16-QAM, kết quả mô phỏng BER được trình bày trong Hình 3.2 cho thấy bộ tách sóng A-CML vượt trội so với các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù. Việc sử dụng chòm sao cải tiến giúp A-CML hội tụ nhanh và tránh các nghiệm mơ hồ thường gặp trong tách sóng mù.

Khoảng cách SNR giữa A-CML và bộ tách sóng huấn luyện phản ánh lợi ích của việc loại bỏ ký hiệu huấn luyện, từ đó tăng tốc độ dữ liệu hữu hiệu. Điều này đặc biệt quan trọng trong các hệ thống yêu cầu thông lượng cao.

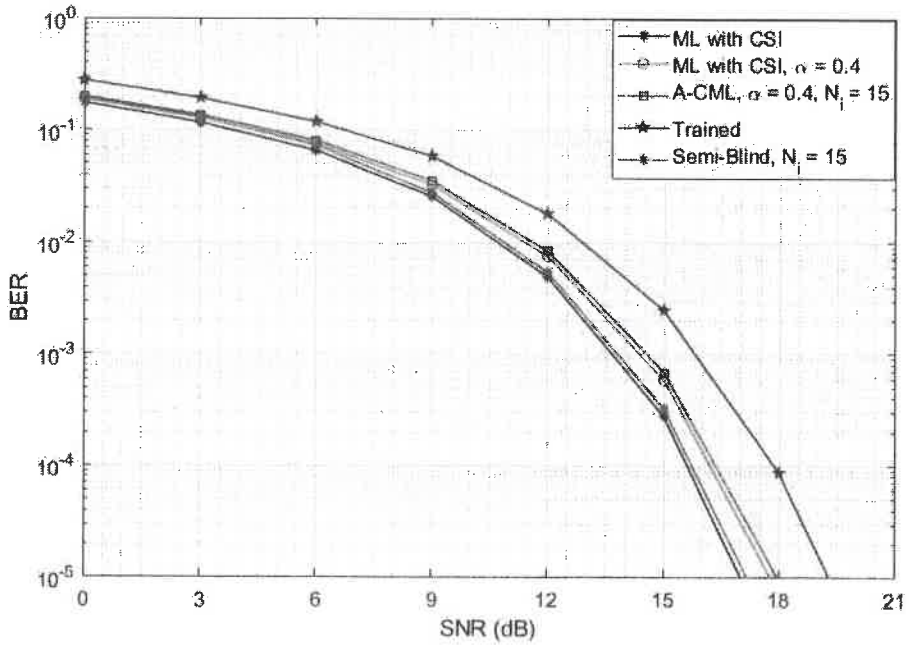


Hình 3.2. Phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (6, 2), được tách sóng bởi A-CML đề xuất và các bộ tách sóng mù và bán mù hiện có. Các ký hiệu được truyền được lấy từ các chòm sao 16-QAM thông thường và các chòm sao 16-QAM cải tiến với α = 0,5, độ dài khung: Q = 12.

Ta có thể thấy rõ ràng rằng, bộ tách sóng A-CML cho phép hệ thống có thể cải thiện khoảng 9% về tốc độ dữ liệu so với cả bộ tách sóng huấn luyện và bán mù.

3.2.3. Phân tích phẩm chất BER trong hệ thống (8,4)

Trường hợp 2: Thực hiện mô phỏng và tính toán phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống MIMO 8 anten phát 4 anten thu, được tách sóng bởi A-CML đề xuất và các bộ tách sóng mù và bán mù hiện có. Các ký hiệu được truyền được lấy từ các chòm sao 64-QAM thông thường và các chòm sao 64-QAM cải tiến với α = 0,4 và độ dài khung: Q = 12.



Hình 3.3. Phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 trong hệ thống (8, 4), được phát hiện bởi A-CML đề xuất và các bộ tách sóng mù và bán bù hiện có. Các ký hiệu truyền được lấy từ các chòm sao 64-QAM thông thường và các chòm sao 64-QAM cải tiến với α = 0,4, độ dài khung: Q = 20.

Kết quả mô phỏng trong Hình 3.3, biểu diễn phẩm chất BER của OSTBC tỷ lệ 1/2 với các ký hiệu được lấy từ 64-QAM. Trong trường hợp này, độ dài khung hình Q được đặt bằng 20. Do đó, chi phí huấn luyện cho các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù là $\frac{1}{20} = 5\%$. Điều này ngụ ý rằng, bộ tách sóng A-CML cho phép hệ thống đạt được sự cải thiện đáng kể về tốc độ dữ liệu khoảng 1,05 lần so với các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù.

Hơn nữa, hiệu suất của bộ tách sóng A-CML gần bằng hiệu suất của của bộ tách sóng ML với CSI hoàn hảo với $\alpha = 0,4$. Khoảng cách SNR giữa A-CML và bộ tách sóng huấn luyện tăng lên gần 1,25 dB, trong khi khoảng cách giữa A-CML và bộ tách sóng bán mù giảm xuống còn khoảng 0,8 dB.

Đối với cấu hình (8,4) và điều chế 64-QAM, Hình 3.3 cho thấy thách thức lớn hơn do bậc điều chế cao và số anten lớn. Tuy nhiên, bộ tách sóng A-CML vẫn duy trì hiệu năng BER gần với bộ tách sóng ML lý tưởng khi CSI hoàn hảo.

Khoảng cách SNR giữa A-CML và các bộ tách sóng khác cho thấy tính hiệu quả của phương pháp đề xuất, đặc biệt khi chi phí huấn luyện trở nên đáng kể trong các hệ thống có khung truyền dài.

Kết quả mô phỏng từ Hình 3.1 đến Hình 3.3 cho thấy rằng, bộ tách sóng huấn luyện có độ phức tạp thấp nhất nhưng bị suy giảm phẩm chất BER và tốc độ dữ liệu.

3.2.4. Thảo luận tổng quát

Từ các kết quả mô phỏng, có thể rút ra một số nhận xét quan trọng:

- Bộ tách sóng A-CML đạt được sự cân bằng tối ưu giữa độ phức tạp và hiệu năng BER.

- Việc không sử dụng ký hiệu lái giúp cải thiện đáng kể hiệu quả sử dụng phổ.

- Phương pháp đề xuất đặc biệt phù hợp cho các hệ thống MIMO lớn và bậc điều chế cao.

Những ưu điểm này mở ra khả năng ứng dụng A-CML trong các hệ thống thông tin không dây thế hệ mới, đồng thời là nền tảng cho các nghiên cứu mở rộng trong tương lai, chẳng hạn như kênh fading chọn lọc tần số hoặc hệ thống MIMO phân tán.

3.2.5. Ảnh hưởng của độ dài khung Q đến hiệu năng hệ thống

Độ dài khung Q là một tham số quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến cả độ phức tạp tính toán lẫn phẩm chất BER của hệ thống. Khi Q tăng, số lượng ký hiệu dữ liệu trong mỗi khung lớn hơn, giúp cải thiện hiệu quả thống kê cho các thuật toán tách sóng mù như A-CML. Điều này dẫn đến khả năng hội tụ ổn định hơn và giảm xác suất rơi vào nghiệm cục bộ.

Tuy nhiên, đối với các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù, việc tăng Q đồng thời làm tăng chi phí huấn luyện tuyệt đối, do số ký hiệu lái thường tỷ lệ thuận với số anten phát. Kết quả là hiệu quả sử dụng phổ bị suy giảm rõ rệt khi Q không đủ lớn. Ngược lại, bộ tách sóng A-CML không yêu cầu ký hiệu lái, nên tận dụng được toàn bộ khung truyền cho dữ liệu, đặc biệt hiệu quả trong các kịch bản Q trung bình và lớn.

3.2.6. Ảnh hưởng của tham số α trong chòm sao cải tiến

Tham số α đóng vai trò điều chỉnh mức độ bất đối xứng của chòm sao cải tiến được sử dụng trong bộ tách sóng A-CML. Khi α quá nhỏ, chòm sao tiệm cận chòm sao QAM thông thường, dẫn đến hiện tượng mơ hồ pha và suy giảm khả năng tách sóng mù. Ngược lại, nếu α quá lớn, khoảng cách Euclid tối thiểu giữa các điểm chòm sao giảm, làm BER tăng trong vùng SNR thấp.

Các kết quả mô phỏng cho thấy tồn tại một giá trị α tối ưu phụ thuộc vào bậc điều chế và cấu hình anten. Ví dụ, với 16-QAM trong hệ thống (6,2), giá trị $\alpha = 0,5$ cho hiệu năng BER tốt nhất, trong khi với 64-QAM và hệ thống (8,4), giá trị $\alpha = 0,4$ mang lại sự cân bằng tối ưu giữa khả năng hội tụ và khoảng cách chòm sao.

3.2.7. So sánh hiệu quả sử dụng phổ

Hiệu quả sử dụng phổ được đánh giá thông qua tốc độ dữ liệu hữu hiệu, có xét đến chi phí huấn luyện. Do bộ tách sóng A-CML không sử dụng ký hiệu lái, tốc độ dữ liệu đạt được cao hơn đáng kể so với các bộ tách sóng huấn luyện và bán mù, đặc biệt trong các hệ thống có số anten phát lớn.

Trong các kịch bản mô phỏng, A-CML cho phép cải thiện tốc độ dữ liệu từ 5% đến hơn 10% so với các phương pháp truyền thống. Lợi thế này càng trở nên rõ rệt khi

bậc điều chế tăng cao, do chi phí huấn luyện chiếm tỷ lệ lớn hơn trong tổng tài nguyên truyền dẫn.

3.2.8. Đánh giá tính ổn định và khả năng hội tụ

Một yếu tố quan trọng khác của bộ tách sóng mù là tính ổn định và khả năng hội tụ của thuật toán. Các kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán A-CML hội tụ ổn định sau số lần lặp hữu hạn (tối đa 15 lần lặp), và tiêu chí dừng dựa trên sự trùng khớp khung liên tiếp giúp giảm đáng kể độ trễ xử lý.

So với các thuật toán mù cổ điển, A-CML ít nhạy cảm hơn với điều kiện khởi tạo ban đầu, nhờ việc khai thác cấu trúc OSTBC và chòm sao cải tiến. Điều này làm tăng tính khả thi của phương pháp trong các hệ thống thực tế.

3.3. Kết luận chương

Trong chương này, luận văn đã trình bày chi tiết quá trình xây dựng mô phỏng và đánh giá thực nghiệm cho bộ tách sóng mù thích nghi A-CML. Thông qua các kịch bản mô phỏng đa dạng, phương pháp đề xuất được chứng minh là đạt hiệu năng BER gần với bộ tách sóng ML lý tưởng, trong khi vẫn duy trì độ phức tạp tính toán thấp và hiệu quả sử dụng phổ cao.

Những kết quả đạt được trong chương này là cơ sở quan trọng để khẳng định tính đúng đắn và ưu thế của phương pháp A-CML, đồng thời tạo tiền đề cho việc mở rộng nghiên cứu sang các mô hình kênh phức tạp hơ và các ứng dụng thực tiễn trong các hệ thống thông tin không dây thế hệ mới.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong đồ án này, tác giả đã nghiên cứu bài toán tách sóng mù cho hệ thống MIMO sử dụng mã không gian–thời gian trực giao (OSTBC) trong điều kiện không sử dụng tín hiệu huấn luyện và không biết trước thông tin kênh truyền. Thông qua việc phân tích các đặc tính cấu trúc của OSTBC và những hạn chế của các phương pháp tách sóng mù hiện có, đồ án đã làm rõ nguyên nhân gây mơ hồ ký hiệu và không định danh kênh trong các OSTBC có khả năng xoay, điển hình là mã Alamouti.

Để khắc phục các vấn đề trên, đồ án đã đề xuất một phương pháp tách sóng mù hoàn toàn dựa trên thuật toán Cyclic Maximum Likelihood cải tiến (A-CML), kết hợp với kỹ thuật sửa đổi chòm sao điều chế QAM. Việc dịch chòm sao bằng một hằng số thực giúp phá tính đối xứng của chòm sao, loại bỏ mơ hồ ký hiệu và cho phép ước lượng kênh ban đầu một cách mù, từ đó cải thiện khả năng hội tụ và độ ổn định của thuật toán A-CML.

Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ tách sóng A-CML đề xuất đạt được hiệu năng BER tiệm cận với bộ tách sóng biết kênh trong vùng SNR trung bình và cao, đồng thời cải thiện hiệu suất phổ so với các bộ tách sóng dựa trên tín hiệu huấn luyện do không cần sử dụng pilot. Điều này cho thấy phương pháp đề xuất đặc biệt phù hợp với các hệ thống truyền thông không dây yêu cầu tiết kiệm tài nguyên huấn luyện và tốc độ dữ liệu cao.

Về mặt ứng dụng thực tế, phương pháp tách sóng mù đề xuất có thể được áp dụng cho các hệ thống MIMO trong mạng di động thế hệ mới, các hệ thống truyền thông trong môi trường kênh thay đổi chậm hoặc các kịch bản truyền thông có hạn chế về tín hiệu huấn luyện, như mạng cảm biến không dây và các hệ thống truyền thông IoT. Trong các nghiên cứu tiếp theo, phương pháp có thể được mở rộng cho các chòm sao điều chế khác, các mã không gian–thời gian có tốc độ cao hơn, cũng như được tối ưu hóa để giảm độ phức tạp tính toán trong các hệ thống thực tế.

PHỤ LỤC

Phụ lục A

Phân bố của $\zeta_{R,k}$ và $\zeta_{I,k}$

Xem xét ký hiệu được truyền thứ k trong từ mã thứ q, tức là $s_{k,q}$. Nếu các ký hiệu được truyền từ Ω có xác suất như nhau, thì $\Re(s_{k,q})$ và $\Im(s_{k,q})$ cũng có xác suất được truyền như nhau. Giá trị trung bình và phương sai của $\Re(s_{k,q})$ và $\Im(s_{k,q})$ có thể được tính bằng:

$$\mu_{\Re(s_{k,q})} = \mu_{\Im(s_{k,q})} = E\{\Re(s_{k,q})\} = E\{\Im(s_{k,q})\} = 0 \tag{A.1}$$

$$\sigma^2_{\Re(s_{k,q})} = \sigma^2_{\Im(s_{k,q})} = E\{|\Re(s_{k,q})|^2\} = \frac{1}{2} \tag{A.2}$$

Chứng minh cho các biểu thức (A.1) và (A.2) có thể được trình bày như sau. Để đơn giản, ta xét một chòm sao M-QAM Ω, trong đó $M = 2^{2n}$ với một số nguyên $n \geq 1$. Vì $s_{k,q} \in \Omega$, $\Re(s_{k,q})$ và $\Im(s_{k,q})$ có thể được rút ra từ tập hợp $\mathcal{L} = \{\pm\gamma(\sqrt{M}-1), \pm\gamma(\sqrt{M}-3), \ldots, \pm\gamma\}$, trong đó $\gamma = \sqrt{\frac{3}{2(M-1)}}$ là hệ số chuẩn hóa, với xác suất phân bố đều $p = \frac{1}{\sqrt{M}}$. Nếu chúng ta định nghĩa $l = 1, 2, \ldots, \sqrt{M}$, thì các giá trị tương ứng của $\Re(s_{k,q})$ hoặc $\Im(s_{k,q})$ có thể được biểu diễn như sau:

$$\Re(s_{k,q}(l)) = \gamma\left(2l - (\sqrt{M}+1)\right). \tag{A.3}$$

Giá trị trung bình của $\Re(s_{k,q})$ được đánh giá là:

$$\begin{aligned} \mu_{\Re(s_{k,q})} &= E\{\Re(s_{k,q})\} = \frac{1}{\sqrt{M}}\sum_{l=1}^{\sqrt{M}} \Re(s_{k,q}(l)) \\ &= \frac{\gamma}{\sqrt{M}}\sum_{l=1}^{\sqrt{M}} (2l - (\sqrt{M}+1)) \\ &= \frac{\gamma}{\sqrt{M}}\left[\frac{2(\sqrt{M}+1)\sqrt{M}}{2} - (\sqrt{M}+1)\sqrt{M}\right] = 0. \end{aligned} \tag{A.4}$$

Vì $\mu_{\Re(s_{k,q})} = 0,$, phương sai của $\Re(s_{k,q})$ được đánh giá là:

$$\begin{aligned}\sigma^2_{\Re(s_{k,q})} &= E\{(\Re(s_{k,q}))^2\} = \frac{1}{\sqrt{M}}\sum_{l=1}^{\sqrt{M}}(\Re(s_{k,q}(l)))^2 \\ &= \frac{\gamma^2}{\sqrt{M}}\sum_{l=1}^{\sqrt{M}}(2l-(\sqrt{M}+1))^2 \\ &= \frac{4\gamma^2}{\sqrt{M}}\left[\sum_{l=1}^{\sqrt{M}}l^2 - \sum_{l=1}^{\sqrt{M}}l(\sqrt{M}+1) + \sum_{l=1}^{\sqrt{M}}\frac{(\sqrt{M}+1)^2}{4}\right].\end{aligned} \tag{A.5}$$

Sau một số thao tác phức tạp, chúng ta có được:

$$\begin{aligned}\sigma^2_{\Re(s_{k,q})} &= \frac{4\gamma^2}{\sqrt{M}}\left[\frac{\sqrt{M}(M-1)}{12}\right] \\ &= \frac{3}{2(M-1)}\frac{4}{\sqrt{M}}\left[\frac{\sqrt{M}(M-1)}{12}\right] = \frac{1}{2}.\end{aligned} \tag{A.6}$$

Chúng ta định nghĩa các biến ngẫu nhiên mới $z_{\{R,k\}}$ và $z_{\{I,k\}}$ như sau:

$$z_{R,k} = \frac{1}{\gamma_m Q}\sum_{q=1}^{Q}\Re(s_{k,q}), \tag{A.7}$$

$$z_{I,k} = \frac{1}{\gamma_m Q}\sum_{q=1}^{Q}\Im(s_{k,q}) \tag{A.8}$$

trong đó $\Re(s_{k,q})$ và $\Im(s_{k,q})$ là các biến ngẫu nhiên độc lập và có phân phối đồng nhất.

Sử dụng kết quả trong (A.1) và (A.2), ta có thể dễ dàng thu được giá trị trung bình, $\mu_{z_{R,k}} = E\{z_{R,k}\}, \mu_{z_{I,k}} = E\{z_{I,k}\},$, và phương sai, $\sigma^2_{z_{R,k}} = E\{|z_{R,k}|^2\}, \sigma^2_{z_{I,k}} = E\{|z_{I,k}|^2\}$ của $z_{\{R,k\}}$ và $z_{\{I,k\}}$ như sau:

$$\mu_{z_{R,k}} = \mu_{z_{I,k}} = \frac{1}{\gamma_m Q}\sum_{q=1}^{Q}E\{\Re(s_{k,q})\} = 0 \tag{A.9}$$

$$\sigma^2_{z_{R,k}} = \sigma^2_{z_{I,k}} = \frac{1}{\gamma_m^2 Q^2}\sum_{q=1}^{Q}\sigma^2_{\Re(s_{k,q})} = \frac{1}{2Q\gamma_m^2} \tag{A.10}$$

Từ (2.24) ta có thể viết lại $\zeta_{R,k}$ như sau:

$$\zeta_{R,k} = \frac{\alpha}{\gamma_m} + z_{R,k}. \tag{A.11}$$

Do đó, có thể dễ dàng chứng minh rằng $\zeta_{R,k}$ là một biến ngẫu nhiên có giá trị trung bình và phương sai như sau:

$$\mu_\zeta = \frac{\alpha}{\gamma_m} \tag{A.12}$$

$$\sigma_\zeta^2 = \frac{1}{2Q\gamma_m^2} \tag{A.13}$$

Theo Định lý Giới hạn Trung tâm (CLT), khi độ dài khung Q đủ lớn, $\zeta_{R,k}$ gần như tuân theo phân phối chuẩn với trung bình $\mu_\zeta = \frac{\alpha}{\gamma_m}$, và phương sai $\sigma_\zeta^2 = \frac{1}{2Q\gamma_m^2}$, tức là $\zeta_{R,k} \sim \mathcal{N}(\mu_\zeta, \sigma_\zeta^2)$, với hàm mật độ xác suất (pdf) được định nghĩa bởi:

$$p(z) = \frac{1}{\sigma_\zeta \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_\zeta}{\sigma_\zeta} \right)^2 \right) \tag{A.14}$$

Tương tự, từ (2.25) suy ra $\zeta_{I,k} \sim \mathcal{N}(\mu_\zeta, \sigma_\zeta^2)$.

Phụ lục B

Chúng ta thấy rằng, đối với phân phối chuẩn $\zeta_{R,k} \sim \mathcal{N}(\mu_\zeta, \sigma_\zeta^2)$., khoảng tin cậy (CI) cho giá trị trung bình được định nghĩa là:

$$CI = [\mu_\zeta - \kappa_p \sigma_\zeta, \mu_\zeta + \kappa_p \sigma_\zeta], \tag{B.1}$$

trong đó κ_p xác định điểm cắt cho mức độ tin cậy p, với $0 \le p \le 1$. Để có $\zeta_{R,k} > 0$ với xác suất p, ta phải tìm α sao cho giới hạn dưới của khoảng tin cậy p trong (B.1) lớn hơn 0, nghĩa là:

$$\mu_\zeta - \kappa_p \sigma_\zeta > 0 \tag{B.2}$$

Thay μ_ζ trong (A.12) và σ_ζ trong (A.13) vào (B.2), ta được:

$$\frac{\alpha}{\gamma_m} > \frac{\kappa_p}{\gamma_m \sqrt{2Q}} \tag{B.3}$$

Cuối cùng, chúng ta có:

$$\alpha > \frac{\kappa_p}{\sqrt{2Q}} \tag{B.4}$$

Tương tự, để có $\zeta_{R,k} < 0$ với xác suất p, ta phải tìm α sao cho giới hạn trên của khoảng tin cậy p trong (B.1) nhỏ hơn 0, tức là:

$$\mu_\zeta + \kappa_p \sigma_\zeta < 0 \tag{B.5}$$

Cuối cùng ta có:

$$\alpha < -\frac{\kappa_p}{\sqrt{2Q}} \tag{B.6}$$

Nhìn chung, α nên được chọn sao cho $|\alpha| > \alpha_L$, trong đó $\alpha_L = \frac{\kappa_p}{\sqrt{2Q}}$ là giới hạn dưới của |α|, để tạo ra $|\zeta_{R,k}| > 0$ với mức độ tin cậy p.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Alamouti, S. M. (2002), "A simple transmit diversity technique for wireless communications of Article", *IEEE Journal on selected areas in communications Name*, 16(8), 1451-1458.

[2] Ammar, N., & Ding, Z. (2006), "Channel identifiability under orthogonal space-time coded modulations without training of Article", *IEEE Transactions on Wireless Communications Name*, 5(5), 1003-1013.

[3] Cui, T., & Tellambura, C. (2007), "Efficient blind receiver design for orthogonal space-time block codes of Article", *IEEE transactions on wireless communications Name*, 6(5), 1890-1899.

[4] Ding, Z., & Ward, D. B. (2005), "Subspace approach to blind and semi-blind channel estimation for space-time block codes of Article", *IEEE transactions on wireless communications Name*, 4(2), 357-362.

[5] Garg, P., Mallik, R. K., & Gupta, H. M. (2006), "Exact error performance of square orthogonal space-time block coding with channel estimation of Article", *IEEE transactions on communications Name*, 54(3), 430-437.

[6] Golub, G. H., & Van Loan, C. F. (1996), *Matrix computations*, Johns Hopkins Univ Press,

[7] Hochwald, B. M., & Sweldens, W. (2002), "Differential unitary space-time modulation of Article", *IEEE transactions on communications Name*, 48(12), 2041-2052.

[8] Larsson, E. G., & Stoica, P. (2003), "Space-time block coding for wireless communications of Article", *Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, to be published Name*,

[9] Larsson, E. G., Stoica, P., & Li, J. (2003), "Orthogonal space-time block codes: Maximum likelihood detection for unknown channels and unstructured interferences of Article", *IEEE Transactions on Signal Processing Name*, 51(2), 362-372.

[10] Le, M.-T., Pham, V.-S., Mai, L., & Yoon, G. (2007), "Efficient algorithm for blind detection of orthogonal space-time block codes of Article", *IEEE Signal Processing Letters Name*, 14(5), 301-304.

[11] Liang, X.-B. (2003), "Orthogonal designs with maximal rates of Article", *IEEE Transactions on Information theory Name*, 49(10), 2468-2503.

[12] Ma, W.-K. (2007), "Blind ML detection of orthogonal space-time block codes: Identifiability and code construction of Article", *IEEE transactions on signal processing Name*, 55(7), 3312-3324.

[13] Ma, W.-K., Ching, P.-C., Davidson, T. N., & Xia, X.-G. (2003). *Blind maximum-likelihood decoding for orthogonal space-time block codes: A semidefinite relaxation approach.* Paper presented at the GLOBECOM'03.

IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE Cat. No. 03CH37489).

[14] Ma, W.-K., Ching, P., Davidson, T. N., & Vo, B.-N. (2004). *Blind symbol identifiability of orthogonal space-time block codes.* Paper presented at the 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.

[15] Ma, W.-K., Vo, B.-N., Davidson, T. N., & Ching, P.-C. (2006), "Blind ML detection of orthogonal space-time block codes: Efficient high-performance implementations of Article", *IEEE Transactions on Signal Processing Name*, 54(2), 738-751.

[16] Muhammad, M., & Ding, Z. (2010), "A linear programming receiver for blind detection of full rate space-time block codes of Article", *IEEE transactions on signal processing Name*, 58(11), 5819-5834.

[17] Shahbazpanahi, S., Gershman, A. B., & Manton, J. H. (2005), "Closed-form blind MIMO channel estimation for orthogonal space-time block codes of Article", *IEEE Transactions on signal processing Name*, 53(12), 4506-4517.

[18] Stoica, P., & Ganesan, G. (2003), "Space–time block codes: Trained, blind, and semi-blind detection of Article", *Digital Signal Processing Name*, 13(1), 93-105.

[19] Tarokh, V., Jafarkhani, H., & Calderbank, A. R. (1998), "Space-time codes for high data rate wireless communications: performance criterion and code construction of Article", *IEEE Transactions on Information Theory Name*, 44(2), 744-765.

[20] Tarokh, V., Jafarkhani, H., & Calderbank, A. R. (1999), "Space-time block coding for wireless communications: Performance results of Article", *IEEE Journal on selected areas in communications Name*, 17(3), 451-460.

[21] Tarokh, V., Jafarkhani, H., & Calderbank, A. R. (2002), "Space-time block codes from orthogonal designs of Article", *IEEE Transactions on Information theory Name*, 45(5), 1456-1467.

[22] Tian, X., Li, M., Ti, G., & Liu, W. (2016), "Fast detection of orthogonal space-time block codes with unknown channel of Article", *IEEE Communications Letters Name*, 20(9), 1896-1899.

[23] Vucetic, B., & Yuan, J. (2003), *Space-time coding*, John Wiley & Sons,

[24] Zhou, S., Muquet, B., & Giannakis, G. B. (2002), "Subspace-based (semi-) blind channel estimation for block precoded space-time OFDM of Article", *IEEE Transactions on Signal Processing Name*, 50(5), 1215-1228.

BẢN CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đã thực hiện việc kiểm tra mức độ tương đồng nội dung đề án qua phần mềm Turnitin một cách trung thực và đạt kết quả mức độ tương đồng 16% toàn bộ nội dung đề án. Bản đề án kiểm tra qua phần mềm là bản cứng đề án đã nộp để bảo vệ trước hội đồng. Nếu sai tôi xin chịu các hình thức kỷ luật theo quy định hiện hành của Học viện.

Hà Nội, ngày 30 tháng 01 năm 2026

HỌC VIÊN CAO HỌC



Phạm Anh Tuấn

16% Tính tương đồng nói chung

Tổng cộng của tất cả các kết quả trùng khớp, bao gồm cả các nguồn trùng lặp, cho mỗi c...

Đã lọc khỏi Báo cáo

- Mục lục tham khảo
- Văn bản được trích dẫn

Nguồn hàng đầu

12% Nguồn Internet
11% Ấn bản
5% Bài tập được nộp (bài của học sinh)

Hà Nội, ngày 30 tháng 01 năm 2026

HỌC VIÊN CAO HỌC	GIẢNG VIÊN HƯỚNG DẪN
Phạm Anh Tuấn	TS, Lê Minh Tuấn

BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

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

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

Họ và tên học viên: Phạm Anh Tuấn.....

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn Thông.....

Khóa: 2024 đợt I.....

Tên đề án: Nghiên cứu phương pháp tách sóng mù trong hệ thống MIMO-OSTBC .....

Người hướng dẫn khoa học: TS. Lê Minh Tuấn.....

Ngày bảo vệ: 24/01/2026.....

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

TT	Ý kiến hội đồng	Sửa chữa của học viên
1	Rà soát và hiệu chỉnh các lỗi thuật ngữ, lỗi soạn thảo trong đề án	Đã tiến hành rà soát và hiệu chỉnh các thuật ngữ tại chương 1 và chương 2 sát với thuật ngữ chuyên ngành của đề án
2	Bổ sung nội dung các mục trong chương 3	Đã bổ sung các nội dung luận giải, giải thích các mục tại Chương 3
3	Hoàn thiện kết luận và hướng phát triển của đề án	Đã chỉnh sửa lại nội dung kết luận của đề án và điều chỉnh hướng phát triển của đề án

Hà Nội, ngày 09 tháng 02 năm 2026

Ký xác nhận của

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN	THƯ KÝ HỘI ĐỒNG	NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC	HỌC VIÊN
PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban	PGS.TS. Dương Thị Thanh Tú	TS. Lê Minh Tuấn	Phạm Anh Tuấn

KTVT1

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

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

BIÊN BẢN
HỌP HỘI ĐỒNG CHẤM ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Căn cứ quyết định số Quyết định số 3299/QĐ-HV ngày 26 tháng 12 năm 2025 của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông về việc thành lập Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ. Hội đồng đã họp vào hồi ....8... giờ ..30.. phút, ngày 24 tháng 01 năm 2025 tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông để chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ cho:

Học viên: **Phạm Anh Tuấn**

Tên đề án tốt nghiệp: **Nghiên cứu phương pháp tách sóng mù trong hệ thống MIMO-OSTBC**

Ngành: **Kỹ thuật viễn thông** Mã số: 8.52.02.08

Các thành viên của Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp có mặt: ..05.../ 05

TT	HỌ VÀ TÊN	TRÁCH NHIỆM TRONG HĐ	GHI CHÚ
1	**PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban**	Chủ tịch	
2	**PGS.TS. Dương Thị Thanh Tú**	Thư ký	
3	**TS. Phạm Xuân Nghĩa**	Phản biện 1	
4	**PGS.TS. Nguyễn Cảnh Minh**	Phản biện 2	
5	**PGS.TS. Đặng Thế Ngọc**	Uỷ viên	

Các nội dung thực hiện:

1. Chủ tịch Hội đồng điều khiển buổi họp. Công bố quyết định của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông về việc thành lập Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ.
2. Người hướng dẫn khoa học hoặc thư ký đọc lý lịch khoa học và các điều kiện bảo vệ đề án tốt nghiệp của học viên (Có bản lý lịch khoa học và kết quả các môn học cao học của học viên kèm theo).
3. Học viên trình bày tóm tắt đề án tốt nghiệp.
4. Phản biện 1 đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)
5. Phản biện 2 đọc nhận xét (có văn bản kèm theo)
6. Các câu hỏi của thành viên Hội đồng:

.....Ý nghĩa / mục đích của việc xoay chòm sao trong ACML
.....điều kiện dừng của thuật toán
.....Làm rõ về cách đánh giá kết quả trên hình 2.2, 3.1
.....nên thêm thì giữa chương 2 và 3
.....giải thích giá trị s
.....

7. Trả lời của học viên:

.....về công thêm bảng số liệu trong chương sao cho thấy dữ liệu đã được xử lý theo thời gian cụ thể, ví dụ như tính mưa hè là bao nhiêu thì có 02 - 07 mưa chưa gây ra lũ, để nhằm giúp người đọc dễ so sánh với các giá trị đó thì trong với giá trị độ phức tạp của các phương pháp cần huấn luyện.....

8. Thư ký đọc nhận xét về quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp của học viên *(có văn bản kèm theo).*

9. Hội đồng họp riêng:

- Bầu Ban kiểm phiếu:
  1. Trưởng Ban kiểm phiếu: PGS.TS. Đặng Thị Ngọc
  2. Uỷ viên Ban kiểm phiếu: TS. Phạm Quang Nghĩa
  3. Uỷ viên Ban kiểm phiếu: PGS.TS. Dương Thị Thanh Tú
- Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp bằng bỏ phiếu kín.
- Ban kiểm phiếu làm việc:
- Trưởng Ban kiểm phiếu báo cáo kết quả kiểm phiếu *(có Biên bản họp Ban kiểm phiếu kèm theo)*
- **Điểm trung bình của đề án tốt nghiệp:** 8.5

Kết luận:

1. Các nội dung cần chỉnh sửa, hoàn thiện sau bảo vệ đề án tốt nghiệp:

.....Rà soát và hiệu chỉnh các lỗi thuật ngữ, lỗi soạn thảo trong đề án.....
.....Bổ sung các nội dung các mục trong chương 3 Hoàn thiện lời luận và trình bày phần trên của đề tài.....
.....
.....
.....

2. Đề nghị Học viện công nhận (hoặc không) và cấp bằng (hoặc không) thạc sĩ cho học viên: Đề nghị Học viện công nhận và cấp bằng thạc sĩ cho HV

3. Đề án tốt nghiệp có thể phát triển thành đề tài nghiên cứu cho NCS.....có.....

Buổi làm việc kết thúc vào....11h30.. cùng ngày.

Chủ tịch	**Thư ký**
PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban	**PGS.TS. Dương Thị Thanh Tú**

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

BẢN NHẬN XÉT LUẬN VĂN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

(*Dùng cho người phản biện*)

Tên đề tài luận văn: **Nghiên cứu phương pháp tách sóng mù trong hệ thống MIMO-OSTBC**

Chuyên ngành: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Mã chuyên ngành: 8.52.02.08

Họ và tên học viên: Phạm Anh Tuấn

Họ và tên người nhận xét: Phạm Xuân Nghĩa

Học hàm, học vị: Tiến sĩ

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Cơ quan công tác:Học viện Kỹ thuật Quân sự

Số điện thoại: 0989 505 717 E-mail: nghiapx@mta.edu.vn

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề tài:

Để đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của thực tế, các mạng truyền thông không dây thế hệ mới đã áp dụng nhiều kỹ thuật hiện đại để đạt được tốc độ truyền tin và độ chính xác cao trong điều kiện băng tần hạn chế, trong số đó phải kể đến các kỹ thuật MIMO, mã hoá không gian – thời gian, kỹ thuật đa ăng ten. Tuy nhiên, trong quá trình áp dụng các kỹ thuật này, một vấn đề quan trọng đặt ra là phải đảm bảo độ chính xác truyền tin với xác suất lỗi của dữ liệu nhận đủ nhỏ khi thông tin về trạng thái chất lượng kênh truyền không được biết chính xác, thậm trí là không biết hoàn toàn, đây là thách thức lớn cho quá trình xử lý tín hiệu ở máy thu. Đề án tập trung nghiên cứu và đề xuất giải pháp giải quyết vấn đề nêu trên, điều này cho thấy ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề án.

II/ Nội dung của đề án, các kết quả đã đạt được:

Đề án gồm phần mở đầu, 3 chương chính và phần kết luận với các nội dung chính sau:

- Trình bày về hệ thống MIMO áp dụng mã khối không gian-thời gian STBC và OSTBC, phương pháp tách sóng (hợp lý cực đại) ở một số trường hợp biết và không biết thông tin trạng thái kênh CSI.

- Đề xuất giải pháp tách sóng mù cho hệ thống MIMO - OSTBC
- Mô phỏng, khảo sát, đánh giá hệ thống qua các tham số BER và độ phức tạp thệ thống.

III/ Những vấn đề cần giải thích thêm:

- Đề án nghiên cứu các vấn đề thực sự phức tạp và trừu tượng, chính vì vậy một số vấn đề trình bày trong luận án được trình bày kém tường minh, khó hiểu, điều này cần được chỉnh sửa. Qua đây nên trỉnh bày bản chất của giải pháp tách sóng mù đề xuất, thể hiện ở các vần đề: sự đổi chòm sao tín hiêu của hệ thống, thuật toán A-CML.

- Phân tích sai số và so sánh tham số này của thuật toán tách sóng đề xuất với các công bố cùng hướng.

IV/ Kết luận:

Tuy còn tồn tại một số hạn chế, nhưng nhìn chung đề án đáp ứng được yêu cầu của bộ GD&ĐT đối với một đề án tốt nghiệp thạc sỹ. Đề nghị cho học viên được bảo vệ trước hội đồng.

Ngày 22 tháng 1 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT

Phạm Xuân Nghĩa

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ
BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

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

BẢN NHẬN XÉT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

(Dùng cho người phản biện)

Tên đề tài đề án: *Nghiên cứu phương pháp tách sóng mù trong hệ thống MIMO-OSTBC*

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông Mã số: 8.52.52.08

Tên học viên: Phạm Anh Tuấn

Họ và tên người nhận xét: Nguyễn Cảnh Minh

Học hàm, học vị: PGS. TS.

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử - Viễn thông

Cơ quan công tác: Khoa Điện - Điện tử Trường ĐH GTVT

NỘI DUNG NHẬN XÉT

I/ Cơ sở khoa học và thực tiễn, tính cấp thiết của đề án:

Hệ thống MIMO-OSTBC đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu năng truyền dẫn của các hệ thống thông tin vô tuyến hiện đại. Tuy nhiên, các phương pháp tách tín hiệu truyền thống phụ thuộc vào thông tin huấn luyện, làm giảm hiệu quả sử dụng phổ tần và tăng độ phức tạp xử lý. Do đó, việc nghiên cứu phương pháp tách sóng mù trong hệ thống MIMO-OSTBC là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

II/ Về nội dung, chất lượng của đề án, các kết quả đã đạt được (so với đề cương đã được duyệt):

Nội dung bám sát đề cương được duyệt.

Phân tích các phương pháp tách sóng mù cho hệ thống MIMO-OSTBC, chỉ ra những hạn chế còn tồn tại của các phương pháp hiện tại.

Kết quả đạt được: Đề xuất giải pháp tách sóng mù hoàn toàn, tối ưu cho hệ thống sử dụng điều chế QAM, giúp giảm phụ thuộc vào tín hiệu huấn luyện và nâng cao hiệu quả truyền thông không dây để phát triển các giải pháp tách sóng hiện đại, phù hợp với yêu cầu thực tiễn của các hệ thống thông tin không dây thế hệ mới(5G/6G, IoT, truyền thông vệ tinh, cảm biến không dây, ...).

Góp ý:

- Lời nói đầu chưa trình bày đầy đủ các mục Lý do chọn đề tài, Tổng quan về vấn đề nghiên cứu, Mục đích nghiên cứu, Đối tượng và pham vi nghiên cứu, Phương pháp nghiên cứu, Nội dung nghiên cứu.

- Còn nhiều lỗi chính tả, lỗi trình bày. Chưa trích dẫn tài liệu tham khảo.

- Xem xét bổ sung, hoàn thiện các nội dung các mục trong chương 3. Hoàn thiện kết luận và hướng phát triển của đề án.

III/ Những vấn đề cần giải thích thêm:

Bổ sung mục 3.2. Phân tích, đánh giá kết quả đạt được trong chương 3.

Làm rõ và đánh giá kết quả mô phỏng trên hình 3.1, 3.2.

IV/ Kết luận:

Đề án đáp ứng các yêu cầu cơ bản của một đề án thạc sỹ kỹ thuật chuyên ngành Kỹ thuật Viễn thông.

Tôi đồng ý để học viên Phạm Anh Tuấn được bảo vệ đề án trước Hội đồng chấm đề án thạc sĩ.

Ngày 15 tháng 01 năm 2026

NGƯỜI NHẬN XÉT



Nguyễn Cảnh Minh