

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**

**BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM**



**NGUYỄN HỮU QUYỀN**

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỶ  
ĐẠO TÀU THỦY CỐ RÀNG BUỘC TÍN HIỆU VÀ BẮT  
ĐỊNH HÀM Ở ĐẦU VÀO**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HẢI PHÒNG - 2019**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**

**BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM**

**NGUYỄN HỮU QUYỀN**

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỠ  
ĐẠO TÀU THỦY CỐ RÀNG BUỘC TÍN HIỆU VÀ BẮT  
ĐỊNH HÀM Ở ĐẦU VÀO**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA**

**MÃ SỐ: 9520216**

**CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA**

**Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS Trần Anh Dũng**

**HẢI PHÒNG - 2019**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi dưới sự hướng dẫn của giáo viên hướng dẫn và các nhà khoa học. Các tài liệu tham khảo đã được trích dẫn đầy đủ. Kết quả nghiên cứu là trung thực và chưa từng được ai công bố trên bất cứ một công trình nào khác.

*Hải Phòng, ngày 8 tháng 12 năm 2019*

Giáo viên hướng dẫn

Tác giả

*PGS.TS Trần Anh Dũng*

*Nguyễn Hữu Quyền*

## LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình làm luận án, tôi đã nhận được nhiều góp ý về chuyên môn cũng như sự ủng hộ giúp đỡ của giáo viên hướng dẫn, của các nhà khoa học, của các đồng nghiệp. Tôi xin được gửi tới họ lời cảm ơn sâu sắc.

Tôi xin bày tỏ lòng cảm ơn đến giáo viên hướng dẫn đã trực tiếp hướng dẫn tôi trong suốt thời gian qua.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn các nhà khoa học, Khoa Điện - Điện tử, Viện đào tạo sau đại học, trường Đại học Hàng hải Việt Nam đã tạo điều kiện thuận lợi cho tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu thực hiện luận án.

Cuối cùng là lời cảm ơn sự ủng hộ, động viên khích lệ to lớn của gia đình để tôi hoàn thành nhiệm vụ học tập.

*Hải Phòng, Ngày 8 tháng 12 năm 2019*

Tác giả luận án

*Nguyễn Hữu Quyền*

## MỤC LỤC

<b>MỞ ĐẦU</b>	1
1. Tính cấp thiết của đề tài	1
2. Mục đích và nhiệm vụ của đề tài	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án	3
4. Phương pháp nghiên cứu	3
5. Ý nghĩa lý luận và thực tiễn	4
6. Bố cục của luận án	4
<b>CHƯƠNG 1 MÔ HÌNH TOÁN VÀ TỔNG QUAN BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY</b>	6
1.1 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy	6
1.1.1 Mô tả chuyển động tàu thủy trong hệ quy chiếu	6
1.1.2 Các hệ quy chiếu	7
1.1.3 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do	9
1.1.3.1 Mối quan hệ giữa vị trí, hướng và vận tốc của chuyển động tàu thủy	9
1.1.3.2 Phương trình mô tả động lực học tàu thủy	10
1.1.3.3 Mô hình toán tàu thủy 6 bậc tự do	12
1.1.4 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do (xét trong mặt phẳng ngang).	13
1.1.5 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang	17
1.1.5.1 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng mô hình xác định.	20
1.1.5.2 Mô hình toán bất định mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang	21
1.2 Tổng quan các nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy	23
1.2.1 Tình hình nghiên cứu trong nước	23
1.2.2 Tình hình nghiên cứu ngoài nước	24
1.2.2.1 Tổng quan điều khiển chuyển động tàu thủy đủ cơ cấu chấp hành	24

1.2.2.2	Tổng quan điều khiển chuyển động tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành	25
1.3	Hướng nghiên cứu của luận án	31
1.3.1	Vấn đề đặt ra trong luận án	31
1.3.2	Ý nghĩa vấn đề ràng buộc tín hiệu điều khiển	32
1.4	Kết luận chương 1	32
<b>CHƯƠNG 2 ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BÁM QUỠ ĐẠO ĐẶT VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO CÓ RÀNG BUỘC TÍN HIỆU ĐIỀU KHIỂN KHI MÔ HÌNH TÀU XÁC ĐỊNH</b>		<b>33</b>
2.1	Nguyên lý điều khiển dự báo	34
2.1.1	Cấu trúc bộ điều khiển dự báo	34
2.1.1.1	Khối mô hình dự báo	35
2.1.1.2	Khối hàm mục tiêu	36
2.1.1.3	Khối tối ưu hóa	36
2.1.1.4	Nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian	37
2.1.2	Điều khiển dự báo hệ tuyến tính phản hồi trạng thái	38
2.1.3	Giải pháp điều khiển dự báo hệ song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian	39
2.1.4	Một số giải pháp nâng cao chất lượng bộ điều khiển dự báo	43
2.1.4.1	Nâng cao tốc độ hội tụ của sai lệch bám nhờ hiệu chỉnh tín hiệu đặt theo nguyên lý học lặp (Iterative Learning)	43
2.1.4.2	Lọc nhiễu và chuyển phản hồi trạng thái thành phản hồi đầu ra nhờ bộ quan sát Kalman	44
2.2	Các phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc	46
2.2.1	Những phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc thường sử dụng	46
2.2.1.1	Phương pháp tối ưu hóa truyền thống	46
2.2.1.2	Phương pháp tối ưu tiến hóa	47
2.2.2	Giải pháp điều khiển tối ưu hóa có ràng buộc với bộ điều khiển MPC	47
2.3	Thiết kế bộ điều khiển MPC điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt, có ràng buộc tín hiệu điều khiển khi mô hình tàu xác định	48

2.3.1	Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái điều khiển tàu chuyển động bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu xác định	49
2.3.1.1	Mô hình dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc trục thời gian	50
2.3.1.2	Xây dựng khối hàm mục tiêu của bộ điều khiển MPC	51
2.3.1.3	Xây dựng khối tối ưu hóa của bộ điều khiển	52
2.3.1.4	Thuật toán bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái	53
2.3.1.5	Mô phỏng bộ điều khiển MPC-S	55
2.3.2	Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách để điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu xác định	62
2.3.2.1	Xây dựng bộ quan sát trực tiếp trạng thái từ mô hình liên tục	63
2.3.2.2	Xây dựng bộ quan sát trạng thái và lọc nhiễu nhờ bộ lọc Kalman mở rộng (EKF)	68
2.3.2.3	Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra với bộ QSTT	72
2.3.2.4	Kết quả mô phỏng bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra MPC-O	74
2.4	Chứng minh tính ổn định hệ điều khiển dự báo đề xuất	81
2.5	Kết luận chương 2	85
<b>CHƯƠNG 3 ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BÁM QUỸ ĐẠO ĐẶT VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO KHI MÔ HÌNH TÀU CÓ CHỨA THÀNH PHẦN BẤT ĐỊNH</b>		
3.1	Cấu trúc mô hình bù thành phần bất định	86
3.2	Giải pháp bù thành phần bất định	89
3.2.1	Bù thành phần bất định	89
3.2.2	Mô phỏng bộ ước lượng bù bất định	91
3.2.2.1	Mô phỏng kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định dạng hàm bất định tác động từ bên ngoài	92
3.2.2.2	Mô phỏng kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định sinh ra từ mô hình đối tượng	93

3.2.2.3	Đánh giá bộ ước lượng bù bất định	95
3.3	Thiết kế bộ điều khiển dự báo điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt khi mô hình có bất định hàm ở đầu vào	95
3.3.1	Thiết kế bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái	95
3.3.1.1	Thuật toán điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái	95
3.3.1.2	Cài đặt bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái DMPC-S	98
3.3.1.3	Kết quả mô phỏng, đánh giá chất lượng bộ điều khiển DMPC-S	99
3.3.2	Thiết kế bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra	104
3.3.2.1	Thuật toán điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra	104
3.3.2.2	Mô phỏng bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra DMPC-O	107
3.3.2.3	Kết quả mô phỏng, đánh giá chất lượng bộ điều khiển DMPC-O	108
3.4	Kết luận chương 3	115
3.4.1	Những vấn đề đã thực hiện được	115
3.4.2	Các vấn đề còn tồn tại	115
<b>CHƯƠNG 4  XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM, KIỂM CHỨNG, ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐÃ ĐỀ XUẤT</b>		<b>116</b>
4.1	Phương pháp kiểm nghiệm bộ điều khiển chạy trên nền thời gian thực (Real time)	116
4.2	Xây dựng mô hình thực nghiệm, kiểm chứng bộ điều khiển MPC đề xuất theo phương pháp HIL (Hardware In the Loop)	117
4.2.1	Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC	117
4.2.2	Thư viện mô phỏng thiết bị hàng hải MSS-GNC Toolbox	119
4.2.3	Card ghép nối Arduino Due R3, thư viện Arduino Library I/O	120
4.2.4	Ghép nối mô hình thực nghiệm HIL, cài đặt thông số với bộ điều khiển MPC đề xuất	122
4.2.4.1	Mô hình tàu, mô hình nhiễu bất định và tham số cài đặt	122
4.2.4.2	Xây dựng, cài đặt mô hình nhiễu đo	123



4.2.4.3	Ghép nối, cài đặt mô hình bộ đo tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu bằng GPS - Gyrocompass	123
4.2.4.4	Ghép nối, cài đặt Card Arduino Due R3 Atmega16u2 và chuyển đổi tín hiệu NMEA0183	124
4.2.4.5	Mô hình bộ điều khiển MPC cài đặt trên máy tính 1 (PC1)	124
4.2.4.6	Hình ảnh mô hình vật lý thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất	126
4.3	Kết quả thực nghiệm, kiểm chứng bộ điều khiển MPC đề xuất	127
4.4	Kết luận chương 4	132
	<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ</b>	133
	Những vấn đề đã được giải quyết	133
	Những vấn đề còn tồn tại	133
	<b>CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ</b>	134
	<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO</b>	136
	<b>PHỤ LỤC</b>	

## CÁC KÝ HIỆU ĐƯỢC SỬ DỤNG

Ký hiệu	Ý nghĩa toán học/vật lý
$\underline{v} = [u \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T$	Véc-tơ tổng quát của vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame)
$u$	Tốc độ trượt dọc của tàu
$v$	Tốc độ trượt ngang của tàu
$\omega$	Tốc độ trượt đứng của tàu
$p$	Tốc độ lắc ngang của tàu
$q$	Tốc độ lắc dọc của tàu
$r$	Tốc độ quay trở của tàu
$C(\underline{v})$	Ma trận Coriolis và hướng tâm của phương tiện Hàng hải
$C_A(\underline{v})$	Ma trận Coriolis và lực hướng tâm thủy động lực học khối lượng nước kèm
$C_{RB}$	Ma trận Coriolis và lực hướng tâm của vật rắn
$D$	Ma trận suy giảm thủy động lực học tuyến tính
$D_n(\underline{v})$	Ma trận suy giảm thủy động lực học phi tuyến
$D(\underline{v})$	Ma trận suy giảm thủy động lực học
$\underline{\eta} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$	Véc-tơ vị trí và hướng trong hệ tọa độ trái đất (e-frame)
$x$	Tọa tàu theo hướng dọc trục $x$
$y$	Tọa tàu theo hướng ngang trục $y$
$z$	Tọa tàu theo hướng thẳng đứng trục $z$
$\phi$	Góc lắc ngang của tàu
$\theta$	Góc lắc dọc của tàu
$\psi$	Góc hướng đi của tàu
$\underline{\eta}_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]$	Quỹ đạo véc-tơ vị trí và hướng đặt trong hệ tọa độ trái đất (e-frame)
$\underline{v}_d = [u_d \ v_d \ r_d]$	Quỹ đạo vector vận tốc dài và tốc độ quay trở
$\underline{g}(\underline{\eta})$	Véc-tơ lực đẩy và lực trọng trường

$J_1(\underline{\eta}_2)$	Ma trận quay chuyển đổi vận tốc dài
$J_2(\underline{\eta}_2)$	Ma trận quay chuyển đổi vận tốc góc
$J(\underline{\eta})$	Ma trận quay chuyển đổi vận tốc dài và vận tốc góc
$m$	Khối lượng của vật rắn
$M_A$	Ma trận quán tính hệ thống của khối lượng nước kèm
$M_{RB}$	Ma trận quán tính hệ thống vật rắn
$\underline{\tau} = [\underline{\tau}_1 \ \underline{\tau}_2]^T$	Lực và mô-men tác động lên thân tàu trong hệ tọa độ gắn thân tàu (b-frame)
$\underline{\tau}_1 = [XYZ]^T$	Lực tác động lên thân tàu trong hệ tọa độ (b-frame)
$\underline{\tau}_2 = [KMN]^T$	Mô men tác động lên thân tàu trong hệ tọa độ (b-frame)
$\beta$	Góc quay của bánh lái (góc bẻ lái)
$\underline{\tau}_H$	Lực và mô-men thủy động lực học
$\underline{\tau}_w$	Lực và mô-men do nhiễu tác động bên ngoài (sóng, gió, dòng chảy,...)
$\underline{\tau}_{rd}$	Lực và mômen tạo ra do tác động của bánh lái chính sau lái, bánh lái phụ trợ (Fin),...
$\underline{\tau}_P$	Lực và mô-men tạo ra do tác động của cơ cấu đẩy
$\tau_u$	Lực gây ra cho tàu trượt dọc theo hướng theo trục $x$
$\tau_v$	Lực gây ra cho tàu trượt ngang hướng theo trục $y$
$\tau_r$	Mô-men quay trở tạo ra sự thay đổi hướng đi của tàu
$F$	Ma trận phân bố lực
$\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$	Các véc-tơ lực và mô-men các thành phần bất định của mô hình tàu và nhiễu loạn từ môi trường bên ngoài
$\underline{\hat{d}}$	Tín hiệu ước lượng bất định
$e_x, e_y$	Sai lệch bám trục $x$ , trục $y$
$e_{hd}$	Sai lệch bám hướng đi
$e_u, e_v, e_r$	Sai lệch bám tốc độ trượt dọc, trượt ngang, quay trở

## BẢNG KÝ HIỆU VIẾT TẮT

<b>Ký hiệu</b>	<b>Tiếng Anh</b>	<b>Tiếng Việt</b>
DOF	Degree Of Freedom	Bậc tự do
RHC	Receding Horizon Control	Bộ điều khiển trượt dọc theo trục thời gian
RBF	Radial Basis Function	Hàm hướng tâm
DP	Dynamic Position	Hệ thống ổn định động
GPS	Global Positioning System	Hệ thống định vị toàn cầu
ASV	Autonomous Surface Vessel	Tàu nổi tự hành
ILC	Iterative Learning Control	Điều khiển học lặp
BODY	Body-fixed reference frame	Khung tọa độ quy chiếu gắn với thân tàu
CG	Center of gravity	Tọa độ trọng tâm tàu
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers	Hiệp hội kiến trúc hải quân và hàng hải
DSC	Dynamic Surface Control	Điều khiển bề mặt động
SMC	Sliding Mode Control	Điều khiển trượt
DWC	Dynamic Window Control	Điều khiển cửa sổ động
LTI	Linear Time Invariant	Hệ tuyến tính tham số hằng
SQP	Sequential Quadratic Programming	Tối ưu toàn phương
GA	Genetic Algorithm	Thuật giải di truyền
PSO	Particle Swarm Optimization	Tối ưu bầy đàn
MPC	Model Predictive Control	Điều khiển dự báo theo mô hình
MPC-S	Model Predictive Control - State	Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái cho hệ tiền định
MPC-O	Model Predictive Control - Output	Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra cho hệ ngẫu nhiên

DMPC-S	Disturbance Model Predictive Control – State	Điều khiển dự báo phản hồi trạng thái cho hệ bất định
DMPC-O	Disturbance Model Predictive Control – Output	Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra cho hệ ngẫu nhiên, bất định
EKF	Extended Kalman Filter	Thuật toán lọc Kalman mở rộng
QSTT		Quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục
MSS-GNC- Toolbox	Marine System Simulator – Guidance Navigation Control –Toolbox	Hệ thống mô phỏng điều khiển, dẫn đường trong lĩnh vực Hàng hải
HIL	Hardware In the Loop	Thực nghiệm trên nền thời gian thực
NMEA	National Marine Electronics Association	Hiệp hội điện tử Hàng hải Quốc tế

## DANH MỤC BẢNG

Bảng 1-1 Thành phần chuyển động và tham số động học của tàu thủy [28] ..... 7

## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Mô tả trạng thái chuyển động tàu thủy [23].....	7
Hình 1.2 Các khung tọa độ quy chiếu [23]. .....	8
Hình 1.3 Mô tả động lực học tàu thủy trong khung tọa độ quy chiếu quán tính gắn với trái đất và khung tọa độ gắn thân tàu [23] .....	10
Hình 1.4 Mô tả thành phần chuyển động, các thông số động học của chuyển động tàu thủy trong mặt phẳng ngang [23]. .....	14
Hình 2.1 Cấu trúc và nguyên lý làm việc của hệ điều khiển dự báo [5].....	34
Hình 2.2 Nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển dự báo. .	38
Hình 2.3 Tuyến tính hóa từng đoạn mô hình song tuyến dọc trục thời gian. .	42
Hình 2.4 Ý nghĩa hiệu chỉnh tín hiệu đặt cho bộ điều khiển dự báo [5].....	44
Hình 2.5 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (MPC-S), điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt.....	55
Hình 2.6 Quỹ đạo đặt kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển. ....	56
Hình 2.7 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình tròn .....	59
Hình 2.8 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình sin .....	61
Hình 2.9 Cấu trúc bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt.....	62
Hình 2.10 Quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục tàu thủy ba bậc tự do.....	64
Hình 2.11 Đồ thị mô phỏng kết quả bộ QSTT khi tàu chạy quỹ đạo hình tròn. ....	66
Hình 2.12 Đồ thị mô phỏng kết quả bộ QSTT khi tàu chạy quỹ đạo hình sin	67

Hình 2.13 Kết quả mô phỏng so sánh bộ QSTT và Kalman (EKF) khi không có nhiễu đo .....	70
Hình 2.14 Kết quả mô phỏng so sánh bộ QSTT và Kalman (EKF) khi có nhiễu đo .....	71
Hình 2.15 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt (MPC-O). .....	73
Hình 2.16 Cấu trúc điều khiển MPC-O với bộ quan sát trạng thái trực tiếp. .	74
Hình 2.17 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-O-QSTT với quỹ đạo hình tròn .....	77
Hình 2.18 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-O-QSTT với quỹ đạo hình sin. ....	80
Hình 3.1 Biểu diễn không gian ảnh của thành phần bất định $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ . ....	87
Hình 3.2 Bù thành phần bất định cho hệ có mô hình bất định để nó tương đương như hệ có mô hình xác định. ....	88
Hình 3.3 Kết quả mô phỏng ước lượng $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ từ thành phần bất định $d_1, d_2$ với tín hiệu bất định giả thiết dạng sóng hình Sin. ....	92
Hình 3.4 Kết quả mô phỏng tín hiệu ước lượng được $\hat{d}_2$ từ thành phần bất định $d_2$ với tín hiệu bất định giả thiết dạng tín hiệu Random .....	93
Hình 3.5 Kết quả mô phỏng tín hiệu ước lượng được $\hat{d}_2$ , từ thành phần bất định $d_2$ với tín hiệu bất định giả thiết dạng xung vuông .....	93
Hình 3.6 Kết quả ước lượng thành phần bất định $\hat{d}_1, \hat{d}_2$ khi thay đổi hệ số ma trận thủy động lực học $D(\underline{\nu})$ trong mô hình. ....	94
Hình 3.7 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định ..	96
Hình 3.8 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định DMPC-S .....	97
Hình 3.9 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-S với quỹ đạo hình tròn .....	101
Hình 3.10 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-S với quỹ đạo hình sin .....	103

Hình 3.11 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định....	105
Hình 3.12 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định DMPC-O .....	106
Hình 3.13 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-O với quỹ đạo hình tròn .....	110
Hình 3.14 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-O với quỹ đạo hình sin .....	113
Hình 4.1 Các phương pháp mô phỏng trên nền thời gian thực .....	116
Hình 4.2 Cấu trúc lai mô phỏng thời gian thực.....	117
Hình 4.3 Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất .....	118
Hình 4.4 Thư viện mô phỏng hệ thống điều khiển Hàng hải MSS-GNC.....	119
Hình 4.5 Thư viện MSS-GNC Toolbox cài đặt trong Simulink-Matlab .....	120
Hình 4.6 Card ghép nối máy tính Arduino due R3 giao tiếp với Matlab .....	121
Hình 4.7 Thư viện Arduino I/O trong Matlab - Simulink.....	121
Hình 4.8 Mô hình tàu thủy trong thư viện MSS - GNC Toolbox được ghép nối và cài đặt trên PC2 .....	122
Hình 4.9 Mô hình nhiều đo và tham số cài đặt .....	123
Hình 4.10 Mô hình xác định quỹ đạo, hướng bằng GPS- GYRO .....	124
Hình 4.11 Mô hình bộ điều khiển MPC được cài đặt trên PC1 .....	125
Hình 4.12 Hình ảnh mô hình vật lý thực nghiệm tại phòng thí nghiệm Mô hình hóa tại trường Đại học Hàng hải Việt Nam .....	127
Hình 4.13 Kết quả thực nghiệm HIL với bộ điều khiển DMPC-O-quỹ đạo hình tròn .....	131



## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài

Nghị quyết số 36-NQ/TW về chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030 tầm nhìn đến năm 2045 chỉ rõ: “ về vấn đề khoa học, công nghệ, phát triển nguồn nhân lực biển là tiếp cận, tận dụng tối đa thành tựu khoa học, công nghệ tiên tiến và thuộc nhóm nước dẫn đầu ASEAN, có một số lĩnh vực khoa học và công nghệ biển đạt trình độ tiên tiến, hiện đại trên thế giới. Đào tạo và phát triển nguồn nhân lực biển, hình thành đội ngũ cán bộ khoa học và công nghệ biển có năng lực, trình độ cao”. Với chủ trương phát triển đó trong những năm gần đây, các cơ sở nghiên cứu, các nhà máy đóng tàu, các doanh nghiệp vận tải biển trong nước đã không ngừng nâng cao năng lực thiết kế, đổi mới về mặt công nghệ, áp dụng khoa học kỹ thuật tiên tiến nhất để thiết kế đóng mới hàng loạt tàu chở hàng với trọng tải lớn, tàu nghiên cứu biển, tàu kiểm ngư, tàu chuyên dụng cảnh sát biển và bộ đội biên phòng,...

Cùng với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, sự bùng nổ của công nghệ điện tử - tin học và cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 là việc áp dụng các trang thiết bị kỹ thuật, công nghệ tự động hóa tiên tiến, hiện đại trên tàu thủy như: hệ thống lái tự động tàu thủy (Auto Pilot), hệ thống điều khiển chuyển động tàu theo quỹ đạo, hệ thống định vị tàu DP (Dynamic Position), hệ thống nghi khí Hàng hải như định vị vệ tinh, hệ thống dẫn đường GPS (Global Positioning System), Radar, hệ thống tự động hóa buồng máy, hệ thống tự động hóa trạm phát điện...nhằm cải thiện và nâng cao chất lượng khai thác tàu thủy.

Trong lĩnh vực nghiên cứu, các nhà khoa học trong và ngoài nước đã không ngừng quan tâm, nghiên cứu, tổng hợp các bộ điều khiển áp dụng vào tàu thủy như: Từ những bộ điều khiển kinh điển như PID [28], điều khiển tuyến tính LQR (Liner Quadratic Regulator), LQG (Linear Quadratic Gaussian) [33],...đến các bộ điều khiển phi tuyến như: Backstepping [70], [63], trượt SMC (Sliding Mode Control) [10], [48], điều khiển mặt động DSC (Dynamic Surface Control) [22], điều khiển thích nghi [68], [75] hay các bộ điều khiển phi tuyến kết hợp với điều khiển mờ,

Neural, SMC - Backstepping, SMC - thích nghi để giải quyết các yếu tố bất định phức tạp trong mô hình tàu nhằm nâng cao chất lượng điều khiển [14],....

Bài toán nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy đặt ra nhiều khó khăn, thách thức với các nhà khoa học khi nghiên cứu, lý do chính là vì:

i) Tàu thủy là phương tiện hàng hải hoạt động trong môi trường phức tạp và không có cấu trúc xác định, điều này dẫn đến nhiều loạn không dự báo được đối với hệ thống điều khiển, ví dụ như dòng chảy đại dương, sóng và gió...

ii) Mô hình động lực học của tàu thủy là mô hình phi tuyến bất định, các tham số trong mô hình tàu phụ thuộc vào các biến trạng thái điều khiển [24]. Phương trình toán mô tả chuyển động tàu thủy là phương trình vi phân bậc cao, xét về tính chất động học tàu thủy cho thấy đối tượng có tính chất như: quá trình dao động, thời gian quá độ dài, độ dự trữ ổn định thấp.

Tổng quan chung về điều khiển chuyển động tàu thủy cho thấy các bộ điều khiển phi tuyến mang tính thời sự đã và đang được nghiên cứu, áp dụng vào điều khiển tàu thủy. Việc tổng hợp bộ điều khiển phi tuyến đều dựa trên hàm điều khiển Lyapunov, và việc xác định hàm điều khiển Lyapunov là phức tạp và luôn là một thách thức trong thiết kế điều khiển. Các công trình đã nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy mới chỉ dừng lại ở việc giải quyết những vấn đề điều khiển đơn lẻ chưa có công trình nào giải quyết kết hợp chung những vấn đề như: bám quỹ đạo, ràng buộc tín hiệu điều khiển, sử dụng mô hình có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên,... trong một bộ điều khiển.

Do đó một phương pháp điều khiển mới để điều khiển chuyển động tàu thủy đáp ứng những vấn đề trên sẽ làm phong phú thêm các phương pháp điều khiển và nâng cao chất lượng điều khiển chuyển động tàu thủy.

## **2. Mục đích và nhiệm vụ của đề tài**

Mục đích của đề tài là nghiên cứu ứng dụng điều khiển dự báo theo mô hình MPC (Model Predictive Control) với nguyên tắc trượt dọc trên trục thời gian RHC (Receding Horizon Control), trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc trục thời gian để thiết kế bộ điều khiển tàu thủy bám quỹ đạo, có ràng buộc tín hiệu và trong mô hình toán có chứa thành phần bất định.

Để thực hiện được mục tiêu này, đề tài đặt ra các nhiệm vụ chính sau:

Nghiên cứu mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy và các dạng biến đổi khác nhau của mô hình toán. Trên cơ sở đó phân tích tổng quan các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy đã được công bố trong và ngoài nước những năm gần đây, từ đó đặt ra hướng nghiên cứu cho luận án.

Nghiên cứu lý thuyết điều khiển tối ưu có ràng buộc với bộ điều khiển dự báo theo mô hình MPC.

Nghiên cứu xây dựng bộ quan sát trạng thái và bộ ước lượng, bù thành phần bất định mới.

Áp dụng nguyên lý điều khiển dự báo MPC trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến để xây dựng bộ điều khiển tàu có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt có ràng buộc tín hiệu và mô hình tàu có chứa thành phần bất định.

Mô phỏng và thực nghiệm theo phương pháp HIL (Hardware In the Loop) để kiểm chứng bộ điều khiển.

### **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án**

#### **Đối tượng nghiên cứu của đề tài:**

Đối tượng nghiên cứu của đề tài là tàu nổi, choán nước, có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated) trong bài toán điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt.

#### **Phạm vi nghiên cứu của đề tài là:**

Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt với mô hình toán tàu nổi, choán nước, ba bậc tự do dạng thiếu cơ cấu chấp hành xét trên mặt phẳng ngang khi có ràng buộc tín hiệu điều khiển và bất định hàm ở đầu vào (không xét đến mô hình cơ cấu thực hiện của tàu). Mô hình toán mô tả động lực học tàu thủy trên mặt phẳng ngang có chứa thành phần bất định, chịu ảnh hưởng của yếu tố nhiễu ngẫu nhiên từ môi trường ngoài. Tàu hoạt động ở chế độ chạy kiểm tra tính năng điều động, quay trở, trong điều kiện hạn chế về sóng, gió, dòng chảy... không lớn hơn cấp 5, điều này có nghĩa là các nhiễu ngẫu nhiên tác động từ môi trường ngoài là không lớn.

### **4. Phương pháp nghiên cứu**

Sử dụng phương pháp từ phân tích, đánh giá sau đó tổng hợp, cụ thể như sau:

Nghiên cứu, phân tích mô hình toán mô tả động lực học tàu thủy trên mặt phẳng ngang. Phân tích, đánh giá các công trình nghiên cứu đã được công bố trong và ngoài nước trên các bài báo, tạp chí, các tài liệu tham khảo về điều khiển chuyển động tàu thủy. Đặc biệt là các phương pháp điều khiển áp dụng cho tàu nổi, choán nước có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành.

Nghiên cứu lý thuyết điều khiển dự báo và ứng dụng điều khiển dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến để tổng hợp, thiết kế bộ điều khiển.

Kiểm chứng kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng Matlab - Simulink và thực nghiệm theo phương pháp HIL.

## **5. Ý nghĩa lý luận và thực tiễn**

Về mặt phương pháp luận, luận án hướng tới.

Luận án đưa ra phương pháp luận, đề xuất áp dụng một bộ điều khiển phi tuyến mới để điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt. Cụ thể là, bộ điều khiển theo nguyên lý RHC (trượt dọc trên trục thời gian), trên nền điều khiển dự báo MPC cho đối tượng tàu thủy, có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến. Luận án sẽ góp phần bổ sung và làm phong phú thêm các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy.

Về mặt thực tiễn luận án hướng tới.

Kết quả của luận án sẽ hiện thực hóa vấn đề điều khiển chuyển động đối tượng có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt. Cụ thể là tàu thủy, đối tượng có tính phi tuyến lớn, trong mô hình có chứa thêm thành phần bất định và chỉ có hai tác động điều khiển là bánh lái và chân vịt chính phía sau lái.

## **6. Bố cục của luận án**

Luận án được trình bày trong 4 chương với nội dung chính tóm tắt như sau:

### **Chương 1 Mô hình toán và tổng quan bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy**

Phân tích mô hình toán mô tả động lực học tàu thủy. Mô hình tàu 6 bậc, 3 bậc tự do xét trên mặt phẳng ngang dạng đủ và thiếu cơ cấu chấp hành.

Phân tích tổng quan các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy đủ và thiếu cơ cấu chấp hành đã được công bố trong và ngoài nước.

Xác định đối tượng và hướng nghiên cứu của luận án.

## **Chương 2 Điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt với bộ điều khiển dự báo có ràng buộc tín hiệu điều khiển khi mô hình tàu xác định**

Phân tích tổng quan về điều khiển dự báo MPC, điều khiển dự báo hệ song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian và một số giải pháp nâng cao chất lượng trong điều khiển dự báo.

Các phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc, giải pháp ràng buộc tín hiệu điều khiển với bộ điều khiển MPC.

Xây dựng bộ điều khiển MPC phản hồi trạng thái MPC-S (Model Predictive Control - State) và phản hồi đầu ra MPC-O (Model Predictive Control - Output) dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến với bộ quan sát trực tiếp từ mô hình liên tục và đề xuất áp dụng bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF) khi mô hình tàu xác định.

Chứng minh ổn định bộ điều khiển đề xuất, mô phỏng kiểm nghiệm kết quả.

## **Chương 3 Điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt với bộ điều khiển dự báo khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định**

Trên cơ sở mô hình toán có chứa thành phần bất định, luận án xây dựng bộ nhận dạng, ước lượng và bù tín hiệu bất định mới.

Thiết kế bộ điều khiển, xây dựng thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định DMPC-S (Disturbance Model Predictive Control - State) và bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định DMPC-O (Disturbance Model Predictive Control - Output). Mô phỏng kiểm nghiệm kết quả bộ điều khiển.

## **Chương 4 Xây dựng mô hình thực nghiệm, kiểm chứng, đánh giá chất lượng bộ điều khiển đã đề xuất**

Xây dựng mô hình thực nghiệm kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển theo phương pháp HIL. Sử dụng công cụ mô phỏng điều khiển thiết bị Hàng hải MSS-GNC (Guidance Navigation Control) Toolbox cài đặt trên nền Simulink - Matlab, kết hợp với phần cứng sử dụng Card Arduino Due giao tiếp với Matlab để xây dựng mô hình thực nghiệm.

# CHƯƠNG 1 MÔ HÌNH TOÁN VÀ TỔNG QUAN BÀI TOÁN ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY

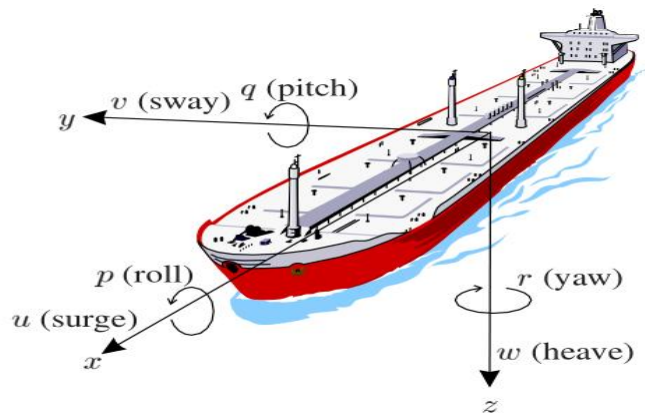
Bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy, giống như các bài toán điều khiển khác, việc đầu tiên là phải hiểu biết, nắm rõ đặc tính động học của đối tượng điều khiển cũng như quan hệ giữa nó với môi trường xung quanh, trước khi tiến hành thiết kế bộ điều khiển cho nó. Kết quả của quá trình tìm hiểu về đối tượng điều khiển thường là mô hình toán mô tả đặc tính động học của nó. Từ đó, dựa vào mô hình toán này và các yêu cầu về chất lượng điều khiển mong muốn người ta mới đề xuất được phương pháp điều khiển thích hợp.

Cũng vì lẽ đó, ở chương này, để có thể trình bày tổng quan được các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy hiện có. Trước tiên, luận án sẽ trình bày mô hình động học và động lực học tàu thủy và từ đó là mô hình tổng quát mô tả chuyển động tàu thủy sáu bậc tự do, ba bậc tự do đủ và thiếu cơ cấu chấp hành, sau đó mới đi vào phân tích tổng quan các phương pháp điều khiển trong và ngoài nước đã và đang áp dụng trong điều khiển chuyển động tàu thủy.

## 1.1 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy

### 1.1.1 Mô tả chuyển động tàu thủy trong hệ quy chiếu

Tàu thủy là đối tượng hoạt động dưới nước, môi trường hoạt động phức tạp, chịu sự tác động của các yếu tố ngẫu nhiên, như: sóng, gió, dòng chảy... Động lực học tàu thủy được áp dụng bởi định luật Newton, trong đó, coi tàu thủy như một vật rắn chuyển động trong môi trường chất lỏng và chuyển động của tàu thủy gồm 6 bậc tự do (6 DOF: Degree Of Freedom) [24], [29]. Các thành phần chuyển động tàu thủy được mô tả như Hình 1.1, bao gồm các chuyển động: trượt dọc (surge), trượt ngang (sway), trượt đứng (heave), lắc ngang (roll), lắc dọc (pitch) và quay trở (yaw).



Hình 1.1 Mô tả trạng thái chuyển động tàu thủy [24]

Các thành phần chuyển động và tham số động học tàu thủy được mô tả chi tiết trong Bảng 1-1.

Bảng 1-1 Thành phần chuyển động và tham số động học của tàu thủy [24]

STT	Loại chuyển động	Lực và mô-men	Véc-tơ vận tốc dài, vận tốc góc	Vị trí và góc Euler
1	trượt dọc ( <i>surge</i> )	$X$	$u$	$x$
2	trượt ngang ( <i>sway</i> )	$Y$	$v$	$y$
3	trượt đứng ( <i>heave</i> )	$Z$	$w$	$z$
4	lắc ngang ( <i>roll</i> )	$K$	$p$	$\phi$
5	lắc dọc ( <i>pitch</i> )	$M$	$q$	$\theta$
6	quay trở ( <i>yaw</i> )	$N$	$r$	$\psi$

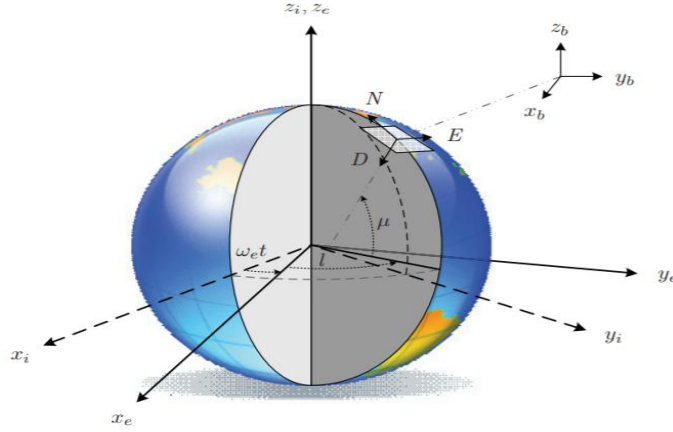
### 1.1.2 Các hệ quy chiếu

Nghiên cứu về chuyển động tàu thủy thường gặp các hệ quy chiếu được mô tả như Hình 1.2, gồm có:

*Hệ quy chiếu ECI (i-frame)* – hệ quy chiếu có khung tọa độ định vị trái đất  $x_i y_i z_i$ , có gốc đặt tại tâm trái đất.

*Hệ quy chiếu ECEF (e-frame)* – hệ quy chiếu có khung tọa độ quán tính  $x_e y_e z_e$ , có gốc đặt tại tâm trái đất, quay xung quanh trục  $z$  với tốc độ  $\omega_e$ .

Hệ quy chiếu NED (*n-frame*) – hệ quy chiếu có khung tọa độ địa lý  $x_n y_n z_n$ , gốc đặt tại bề mặt tiếp tuyến với trái đất, trục  $x$  hướng bắc, trục  $y$  hướng đông, trục  $z$  chỉ hướng tới bề mặt trái đất.



Hình 1.2 Các khung tọa độ quy chiếu [24].

Hệ quy chiếu BODY (*b-frame*) – hệ quy chiếu có khung tọa độ gắn với phương tiện hàng hải cần khảo sát  $o x_b y_b z_b$  có gốc đặt tại trọng tâm của tàu, trục  $x$  gắn hướng mũi tàu, trục  $y$  hướng ngang mạn tàu, trục  $z$  hướng thẳng đáy tàu.

Dựa theo bảng 1.1, chuyển động tàu thủy được mô tả bởi các véc-tơ sau [24]:

$$\begin{aligned} \underline{\eta} &= [\underline{\eta}_1 \underline{\eta}_2]^T \in R^6, \underline{\eta}_1 = [x \ y \ z]^T \in R^3, \underline{\eta}_2 = [\phi \ \theta \ \psi]^T \in R^3 \\ \underline{\upsilon} &= [\underline{\upsilon}_1 \ \underline{\upsilon}_2]^T \in R^6, \underline{\upsilon}_1 = [u \ v \ \omega]^T \in R^3, \underline{\upsilon}_2 = [p \ q \ r]^T \in R^3 \\ \underline{\tau} &= [\underline{\tau}_1 \ \underline{\tau}_2]^T \in R^6, \underline{\tau}_1 = [X \ Y \ Z]^T \in R^3, \underline{\tau}_2 = [K \ M \ N]^T \in R^3 \end{aligned}$$

trong đó:

$\underline{\eta}$  – véc-tơ vị trí và hướng trong hệ tọa độ trái đất (*n-frame*)

$\underline{\upsilon}$  – véc-tơ vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (*b-frame*)

$\underline{\tau}$  – lực và mô-men tác động lên thân tàu trong hệ tọa độ gắn với thân tàu.



### 1.1.3 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do

#### 1.1.3.1 Mối quan hệ giữa vị trí, hướng và vận tốc của chuyển động tàu thủy

Đạo hàm bậc nhất của véc-tơ vị trí  $\underline{\eta}_1$  và véc-tơ vận tốc dài  $\underline{\nu}_1$  liên hệ với nhau qua biểu thức (1.1), [28]:

$$\dot{\underline{\eta}}_1 = J_1(\underline{\eta}_2)\underline{\nu}_1 \quad (1.1)$$

$J_1(\underline{\eta}_2)$  – ma trận chuyển đổi, và được đưa ra như sau:

$$J_1(\underline{\eta}_2) = \begin{pmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & -c(\psi)c(\phi) + s(\psi)s(\theta)s(\phi) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

trong đó  $c(\cdot) = \cos(\cdot)$ ,  $s(\cdot) = \sin(\cdot)$

Có thể thấy  $J_1(\underline{\eta}_2)$  là ma trận trực giao, nghĩa là:

$$J_1(\underline{\eta}_2)^T = J_1(\underline{\eta}_2)^{-1} \quad (1.3)$$

Mặt khác đạo hàm bậc nhất của  $\underline{\eta}_2$  và véc-tơ  $\underline{\nu}_2$  có mối quan hệ như (1.4):

$$\dot{\underline{\eta}}_2 = J_2(\underline{\eta}_2)\underline{\nu}_2 \quad (1.4)$$

Ở đây ma trận  $J_2(\underline{\eta}_2)$  được cho bởi (1.5):

$$J_2(\underline{\eta}_2) = \begin{pmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\theta & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Đối với các phương tiện hoạt động trên mặt biển thì  $J_2(\underline{\eta}_2)$  luôn hữu hạn, vì có  $\theta \neq \pi/2$  hay  $\cos\theta \neq 0$ .

Kết hợp (1.1) và (1.4) có được mối quan hệ giữa vị trí, hướng và vận tốc trong chuyển động tàu thủy theo (1.6).

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{\eta}}_1 \\ \dot{\underline{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\underline{\eta}_2) & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & J_2(\underline{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\nu}_1 \\ \underline{\nu}_2 \end{bmatrix} \leftrightarrow \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu} \quad (1.6)$$

### 1.1.3.2 Phương trình mô tả động lực học tàu thủy

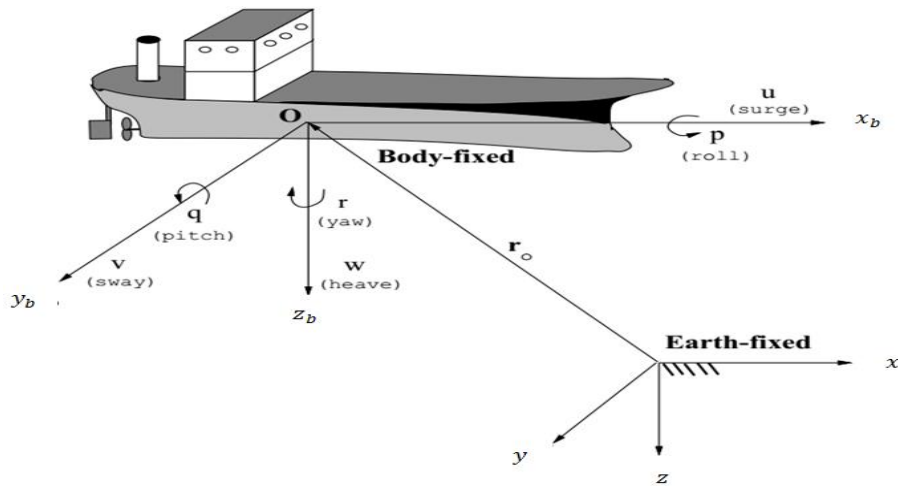
Chuyển động của phương tiện hàng hải (tàu thủy) được mô tả giống như chuyển động của một vật rắn trong môi trường chất lỏng trong hệ tọa độ gắn với vật rắn (b-frame)  $ox_b y_b z_b$ , trọng tâm của vật rắn trùng với gốc tọa độ gắn vật rắn  $o$ , được mô tả như Hình 1.3.

Phương trình mô tả chuyển động tàu thủy trong môi trường Đại Dương được biểu diễn như sau [28]:

$$M_{RB}\dot{\underline{v}} + C_{RB}(\underline{v})\underline{v} = \underline{\tau}_{RB} \quad (1.7)$$

trong đó:

$\underline{v} = [u \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T$  – véc-tơ tổng quát của vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame)



Hình 1.3 Mô tả động lực học tàu thủy trong khung tọa độ quy chiếu quán tính gắn với trái đất và khung tọa độ gắn thân tàu [24]

$M_{RB}$  – ma trận quán tính

$C_{RB}$  – ma trận Coriolis và hướng tâm

$\underline{\tau}_{RB} = [X \ Y \ Z \ K \ M \ N]^T$  – véc-tơ tổng quát của lực và mô-men phân tích trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame). Véc-tơ tổng quát lực, mô-men này bao gồm các thành phần  $\underline{\tau}_{RB} = \underline{\tau}_H + \underline{\tau}_w + \underline{\tau}$ .

Trong đó:

$\underline{\tau}_H$  – lực và mô-men thủy động lực học

$\underline{\tau}_w$  – lực và mô-men do nhiễu tác động từ bên ngoài (sóng, gió, dòng chảy,...)

$\underline{\tau}$  – lực và mô-men gây ra bởi cơ cấu thực hiện của tàu (chân vịt, bánh lái).

Các thành phần lực và mô-men này lần lượt được phân tích như sau:

**a. Lực và mômen thủy động lực học –  $\underline{\tau}_H$**

Theo Faltinsen (1990) (được trích dẫn trong [27] của tác giả Fossen) khi tàu thủy chuyển động trên môi trường biển sẽ chịu tác động của lực và mô-men thủy động lực học bao gồm: lực cảm ứng bức xạ và lực do ma sát bề mặt với nước, độ trôi, xoáy của nước.

*Thứ nhất, xét lực và mômen cảm ứng bức xạ (ký hiệu là  $\underline{\tau}_R$ ) bao gồm các thành phần sau:*

(i). Thành phần do khối lượng nước kèm (*added mass*) và do quán tính chất lỏng xung quanh thân tàu gây ra được đặc trưng bởi ma trận  $M_A, C_A(\underline{v})$ .

(ii). Sự suy giảm thế năng do năng lượng bị mất đi bởi sóng biển, được đặc trưng bởi ma trận  $D_p(\underline{v})$ .

(iii). Lực phục hồi (do trọng lượng và lực đẩy gây ra), các thành phần này tạo thành lực và mômen ký hiệu là  $\tau_R$  được tính như sau:

$$\underline{\tau}_R = -M_A \dot{\underline{v}} - C_A(\underline{v}) \underline{v} - D_p(\underline{v}) \underline{v} - g(\underline{\eta}) \quad (1.8)$$

trong đó:

$M_A$  – ma trận quán tính của khối lượng nước kèm

$C_A(\underline{v})$  – ma trận coriolis và hướng tâm thủy động lực học

$D_p(\underline{v})$  – ma trận giảm chấn thủy động lực học

$g(\underline{\eta})$  – lực và mô-men phục hồi, lực này sinh ra do trọng lực và tính nổi của tàu dưới tác động của nước lên thân tàu.

*Thứ hai, xét lực do ma sát bề mặt với nước, độ trôi, xoáy của nước (ký hiệu là  $\underline{\tau}_D$ ) như sau:*

Ngoài các giảm chấn do cảm ứng bức xạ nêu trên, phải tính đến các hiệu ứng giảm chấn khác như ma sát bề mặt ký hiệu là  $D_S(\underline{v})$ , giảm chấn do độ trôi của sóng

ký hiệu là  $D_W(\underline{v})$  và giảm chấn do bong bóng xoáy của nước ký hiệu là  $D_M(\underline{v})$ , do đó lực do ma sát bề mặt với nước, độ trôi, xoáy của nước được tính như (1.9):

$$\underline{\tau}_D = -D_S(\underline{v})\underline{v} - D_W(\underline{v})\underline{v} - D_M(\underline{v})\underline{v} \quad (1.9)$$

Từ (1.8), (1.9) ma trận giảm chấn thủy động lực học được xác định là tổng của các thành phần sau:

$$D(\underline{v}) = D_P(\underline{v}) + D_S(\underline{v}) + D_W(\underline{v}) + D_M(\underline{v}) \quad (1.10)$$

Nói chung ma trận giảm chấn thủy động lực học  $D(\underline{v})$  của tàu biển chủ yếu là do các giảm chấn thế năng, ma sát bên ngoài, giảm chấn ma sát với sóng và giảm chấn do bong bóng xoáy. Nhưng thật khó để đưa ra một biểu thức chung của ma trận giảm chấn thủy động lực học  $D(\underline{v})$ . Tuy nhiên có thể coi ma trận giảm chấn thủy động lực học  $D(\underline{v})$  gồm hai thành phần tuyến tính và phi tuyến, như (1.11):

$$D(\underline{v}) = D + D_n(\underline{v}) \quad (1.11)$$

Trong đó:

$D$  – thành phần giảm chấn tuyến tính thủy động lực học

$D_n(\underline{v})$  – thành phần giảm chấn phi tuyến thủy động lực học

#### **b. Lực và mô-men do nhiễu tác động từ bên ngoài – $\tau_w$**

Lực và mô-men do tác động của nhiễu loạn môi trường lên tàu bao gồm: sóng, gió, dòng chảy,... Mô hình các nhiễu loạn này được luận án phân tích chi tiết trong phần phụ lục 1.

#### **c. Lực và mô-men do tác động của cơ cấu đẩy – $\underline{\tau}$**

Lực và mô-men do tác động của cơ cấu đẩy có thể được coi gồm các thành phần sau:  $\underline{\tau} = \underline{\tau}_{rd} + \underline{\tau}_p$

trong đó:

$\underline{\tau}_{rd}$  – lực và mô-men tạo ra do tác động của bánh lái chính sau lái, bánh lái phụ trợ (Fin)...

$\underline{\tau}_p$  – lực và mô-men tạo ra do tác động của cơ cấu đẩy (chân vịt)

### **1.1.3.3 Mô hình toán tàu thủy 6 bậc tự do**

Từ những phân tích ở trên, động lực học mô tả chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do được viết tổng quát lại như sau [28].

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu} \\ M\dot{\underline{\nu}} + C(\underline{\nu})\underline{\nu} + D(\underline{\nu})\underline{\nu} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{\tau}_w \end{cases} \quad (1.12)$$

trong đó:

$\underline{\eta} = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \in R^6$  – véc-tơ vị trí, hướng trong hệ tọa độ trái đất (e-frame)

$J(\underline{\eta}) \in R^{6 \times 6}$  – ma trận chuyển đổi

$\underline{\nu} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \in R^6$  – véc-tơ vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame).

$M = M_{RB} + M_A$ , trong đó  $M_{RB}$  – ma trận quán tính,  $M_A$  – ma trận quán tính do khối lượng nước kèm (addmass).

$C(\underline{\nu}) = C_{RB}(\underline{\nu}) + C_A(\underline{\nu})$ , trong đó  $C_{RB}(\underline{\nu})$  là ma trận coriolis và hướng tâm,  $C_A(\underline{\nu})$  là ma trận coriolis và hướng tâm thủy động lực học.

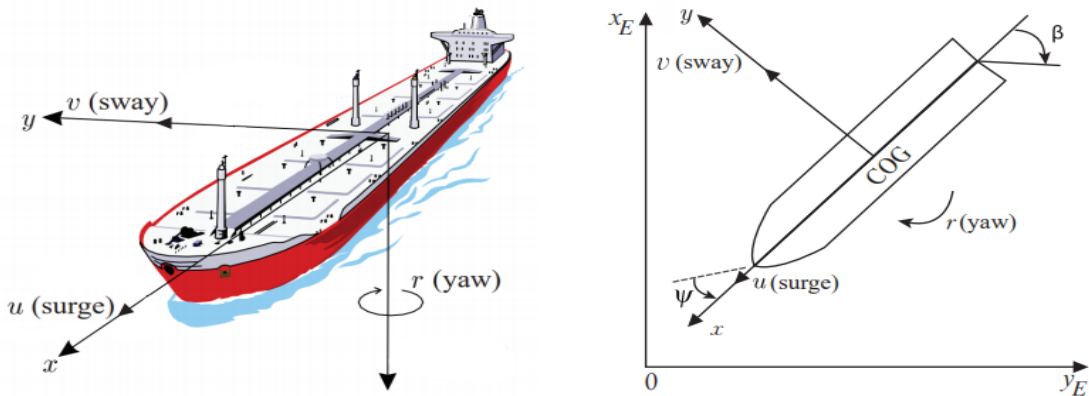
$D(\underline{\nu}) = D + D_n(\underline{\nu})$ , trong đó  $D$  – ma trận giảm chấn tuyến tính,  $D_n(\underline{\nu})$  – ma trận giảm chấn phi tuyến thủy động lực học.

$\underline{\tau}_w$  – nhiễu tác động vào tàu thủy bao gồm sóng, gió, dòng chảy đại dương,...

$\underline{\tau}$  – lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện của tàu bao gồm chân vịt, bánh lái.

#### 1.1.4 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do (xét trong mặt phẳng ngang).

Chuyển động của tàu thủy xét trong mặt phẳng ngang được đặc trưng bởi các thành phần: trượt dọc với tốc độ  $u$ , trượt ngang với tốc độ  $v$ , quay trở với tốc độ  $r$ . Bỏ qua thành phần lắc ngang  $p$ , lắc dọc  $q$ , trượt đứng  $w$ , hay trong phương trình (1.12) có  $p = q = w = 0$ . Chuyển động của tàu thủy ba bậc tự do xét trong mặt phẳng ngang được mô tả như Hình 1.4.



Hình 1.4 Mô tả thành phần chuyển động, các thông số động học của chuyển động tàu thủy trong mặt phẳng ngang [24].

Mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do, xét trong mặt phẳng ngang được đặc trưng bởi:

$$\text{Véc-tơ vị trí và hướng trong hệ tọa độ trái đất (e-frame)} \quad \underline{\eta} = [x \ y \ \psi]^T \in R^3$$

Véc-tơ vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame)

$$\underline{v} = [u \ v \ r]^T \in R^3$$

Để có mô hình toán thể hiện đầy đủ đặc trưng động lực học của tàu thủy trong mặt phẳng ngang, giả định sau được đưa ra:

**Giả định 1 với mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do [28]**

- (i). Tàu có khối lượng đồng đều và đối xứng qua mặt phẳng mạn tàu (đối xứng qua mặt phẳng  $xz$  trong hệ tọa độ gắn với thân tàu).
- (ii). Góc tọa độ gắn với thân tàu (trong hệ tọa độ b-frame) và trùng với trọng tâm tàu sao cho  $y_g = 0$  (với  $y_g$  – là tọa độ trọng tâm tàu trong hệ tọa độ b-frame).
- (iii). Nếu tốc độ tàu thấp có thể bỏ qua ma trận giảm chấn phi tuyến  $D_n(\underline{v})$ , còn khi tàu chạy ở tốc độ cao thì không thể bỏ qua ma trận  $D_n(\underline{v})$  trong công thức (1.11) (trích theo tài liệu [28], trang 106).

Khi đó phương trình động lực học ba bậc tự do mô tả chuyển động tàu thủy trong mặt phẳng ngang theo [25] được viết như (1.13).

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{\tau}_w \end{cases} \quad (1.13)$$

trong đó:

$$J(\underline{\eta}) - \text{ma trận chuyển đổi và là ma trận trực giao } J^{-1}(\underline{\eta}) = J^T(\underline{\eta})$$

khi tối thiểu hoá các thành phần bậc tự do xét trong mặt phẳng ngang của (1.2), có được ma trận chuyển đổi  $J(\underline{\eta})$  như sau:

$$J(\underline{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Do chỉ xét các thành phần chuyển động trong mặt ngang nên mô-men quán tính  $I_{xy} = I_{yz} = 0$ , do vậy ma trận  $M_{RB}$ ,  $M_A$  và ma trận  $M$  được xác định như (1.15) và (1.16) dưới đây.

$$M_A = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{u}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -Y_{\dot{r}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$M = M_A + M_{RB} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Các phần tử trong biểu thức (1.15), (1.16) được ký hiệu theo SNAME 1950 (ký hiệu theo Hiệp hội kiến trúc hải quân và hàng hải), ký hiệu này được sử dụng trong tài liệu [24] và được giải thích ví dụ như: lực  $Y$  do khối lượng nước kèm, dọc theo trục  $y$ , với gia tốc  $\dot{u}$  (hướng trục  $x$ ) được viết là:

$Y = -Y_{\dot{u}} \dot{u}$ ,  $Y_{\dot{u}} = \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}}$ , trong đó  $m$  – khối lượng tàu,  $I_z$  – mô-men quán tính xung quanh trục  $z$ ,  $z_g$  – tọa độ trọng tâm của tàu trên trục  $oz_b$  trong hệ tọa độ (b-frame).

Ma trận coriolis xét trong mặt phẳng ngang được cho bởi (1.17):

$$C(\underline{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{r}} r \\ 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}} u \\ m(x_g r + v) - Y_{\dot{v}} v - Y_{\dot{r}} r & -mu + X_{\dot{u}} u & 0 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Ma trận giảm chấn thủy động lực học  $D(\underline{v})$  được xác định bao gồm:  $D(\underline{v}) = D + D_n(\underline{v})$ . Nếu tốc độ tàu thấp thì có thể bỏ qua thành phần  $D_n(\underline{v})$  khi đó ma trận  $D(\underline{v})$  chỉ có thành phần tuyến tính là  $D(\underline{v}) = D + D_n(\underline{v}) \approx D$ . Nếu tốc độ tàu cao thì không thể bỏ qua thành phần giảm chấn phi tuyến  $D_n(\underline{v})$ , khi đó  $D(\underline{v})$  gồm hai thành phần là tuyến tính  $D$  và phi tuyến  $D_n(\underline{v})$ , khi đó  $D, D_n(\underline{v})$  được xác định theo (1.18).

$$D = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix}, D_n(\underline{v}) = \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v| + Y_{|r|v}|r| & Y_{|v|r}|v| \\ 0 & N_{|v|v}|v| + N_{|r|v}|r| & N_{|v|r}|v| + N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Các phân tử trong ma trận  $D, D_n(\underline{v})$  trong (1.18) cũng được ký hiệu theo SNAME 1950 và được giải thích ví dụ như sau:

$$Y_{|v|v} = \frac{\partial^2 Y}{\partial |v| \partial v} \quad (1.19)$$

$\underline{\tau}$  – lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện của tàu, các lực và mô-men này được cho bởi (1.20).

$$\underline{\tau} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T \quad (1.20)$$

trong đó:

$\tau_u$  – lực làm cho tàu trượt dọc theo hướng trục  $x$

$\tau_v$  – lực làm cho tàu trượt ngang theo hướng trục  $y$

$\tau_r$  – mô-men quay xung quanh trục  $z$  trên mặt phẳng  $xoy$ , gây ra thay đổi hướng đi của tàu.

Theo Fossen [24], [28] mô hình tàu 3 bậc tự do xét trên mặt phẳng ngang với mô hình toán như (1.13), nếu thành phần lực tác động  $\underline{\tau}$  có đầy đủ ba thành phần  $\tau_u, \tau_v, \tau_r$  như (1.20) và  $\underline{v} = [u \ v \ r]^T$  thì mô hình toán xét trên mặt phẳng ngang được gọi là mô hình tàu đủ cơ cấu chấp hành (Full Actuated). Đây là mô hình toán của loại tàu có nhiều cơ cấu thực hiện như: chân vịt chính sau lái tạo ra lực đẩy trượt dọc  $\tau_u$ , chân vịt ngang hai bên mạn tàu tạo ra lực trượt ngang  $\tau_v$ , bánh lái



chính sau lái tạo ra mô-men  $\tau_r$  thay đổi hướng đi của tàu. Mô hình toán này thường gặp trong các tàu công trình, tàu phục vụ nhiệm vụ đặc biệt trên biển,... Mô hình toán này thường được sử dụng khi nghiên cứu về điều khiển ổn định động DP (Dynamic Position) cho tàu thủy. Mô hình toán loại tàu này đã được phân tích và sử dụng để thiết kế điều khiển trong các tài liệu [23] - [29], và các công trình [15], [37], [42], [49], [52], [61], [71], [73], [76].

Mặt khác, nếu  $\underline{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$  tức là trong mô hình toán của tàu không có thành phần lực gây ra trượt ngang  $\tau_v$  (phần tử thực hiện không có cơ cấu đẩy ngang) hướng theo trục  $y$  thì mô hình toán xét trên mặt phẳng ngang được gọi là mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated). Giả thiết rằng lực tác động của bánh lái phía sau lái có thành phần lực gây ra trượt ngang là rất nhỏ, điều đó không mất đi tính thực tế là tàu không có dạt ngang trong quá trình chuyển động. Điều này được lý giải là bởi vì trong mô hình toán tàu thiếu cơ cấu chấp hành trình bày dưới đây, theo phương trình (1.21) tác động dạt ngang được tạo ra bởi thành phần  $u, r$ . Đây là mô hình toán đặc trưng cho loại tàu chỉ có 2 cơ cấu thực hiện là chân vịt chính và bánh lái chính phía sau lái. Nếu tàu có chân vịt mũi thì thực tế chân vịt mũi chỉ hoạt động ở chế độ khi tàu điều động ra vào cầu cảng. Điều này không làm ảnh hưởng hay mất đi tính tổng quát của mô hình toán tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành.

Mô hình toán tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành này thường gặp phổ biến là các tàu chở hàng, tàu Container,... Mô hình toán tàu thiếu cơ cấu chấp hành thường sử dụng để nghiên cứu, thiết kế bộ điều khiển tàu chuyển động theo quỹ đạo đặt, ổn định hướng đi xét trên mặt phẳng ngang. Mô hình toán loại tàu này đã được phân tích và sử dụng để thiết kế điều khiển trong các tài liệu [10], [14], [16] - [22], [30], [35], [40], [41], [56], và các công trình [62] - [70].

### **1.1.5 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang**

Một đối tượng điều khiển được coi là thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated) khi số tín hiệu điều khiển đầu vào ít hơn số biến trạng thái điều khiển (hay số bậc tự do) [21]. Mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành là loại tàu chỉ có hai tác động điều khiển là chân vịt chính (chân vịt chính phía sau lái) làm cho tàu

chuyển động tịnh tiến và bánh lái (bánh lái chính phía sau lái) làm cho tàu chuyển động quay hướng, thiếu cơ cấu thực hiện làm chuyển động dạt ngang. Để có được mô hình toán mô tả đầy đủ tính chất động học tàu thủy ba bậc tự do dạng thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang, giả định sau được đưa ra:

**Giả định 2 với mô hình toán tàu ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành** (theo nguồn [21])

- (i). Tàu có khối lượng đồng đều và đối xứng qua mặt phẳng mạn tàu (đối xứng qua mặt phẳng  $xz$ ).
- (ii). Góc tọa độ gắn với thân tàu, trùng với trọng tâm tàu sao cho  $y_g = 0$  (với  $y_g$  – tọa độ trọng tâm tàu trong hệ tọa độ b-frame).
- (iii). Tàu thiếu cơ cấu chấp hành thường có kết cấu các mặt phẳng đối xứng nhau, trong đó các trục của khung tọa độ gắn thân tàu (b-frame) được chọn sao cho trùng với trục chính theo dòng dịch chuyển của chất lỏng. Thực tế hầu hết các tàu có mặt phẳng đối xứng giữa mạn trái/phải, còn đối xứng giữa đỉnh/đáy không cần thiết cho chuyển động trên mặt phẳng ngang. Sự không đối xứng giữa đuôi/mũi tàu có nghĩa là các phần tử toán hạng không đường chéo trong ma trận  $M, D(\underline{v})$  là khác 0. Tuy nhiên những toán hạng này là nhỏ so với các phần tử đường chéo chính. Điều này dẫn tới giả định tàu thiếu cơ cấu chấp hành xét trong mặt phẳng ngang là bỏ qua các phần tử không đường chéo trong các ma trận  $M, D(\underline{v})$ .

Với các giả định trên, phương trình động lực học ba bậc tự do mô tả chuyển động tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành theo tài liệu [21] được mô tả như (1.21):

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = F\underline{\tau} + \underline{\tau}_w \end{cases} \quad (1.21)$$

trong đó:

$\underline{\eta} = [x \ y \ \psi]^T \in R^3$  – véc-tơ tọa độ vị trí và hướng trong hệ tọa độ trái đất

$$J(\underline{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

$\underline{v} = [u \ v \ r]^T \in R^3$  – véc-tơ vận tốc dài (trượt dọc, trượt ngang) và vận tốc góc (tốc độ thay đổi hướng đi) trong hệ tọa độ gắn thân tàu (b-frame).

$F$  – ma trận phân bố lực (ma trận  $F$  kích thước 3x2, số hàng nhiều hơn số cột thể hiện đặc điểm của mô hình thiếu cơ cấu chấp hành), đối với tàu thủy chỉ có 2 cơ cấu thực hiện là chân vịt và bánh lái chính phía sau lái thì ma trận phân bố lực được

$$\text{đưa ra như sau: } F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\underline{\tau}$  – lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện, với ma trận phân bố lực như trên thì theo (1.21),  $\underline{\tau} = [\tau_u \ \tau_r]^T$

Với giả định 2 các thành phần trong (1.21) được xác định như sau :

Ma trận quán tính:

$$M = M_A + M_{RB} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

trong đó  $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$ ,  $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$ ,  $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$

Ma trận Coriolis:

$$C(\underline{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv + Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}}u \\ mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Ma trận giảm chấn thủy động lực học:

$$D(\underline{v}) = D + D_n(\underline{v}) = \begin{bmatrix} d_{11}(\underline{v}) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(\underline{v}) & 0 \\ 0 & 0 & d_{33}(\underline{v}) \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

trong đó thành phần giảm chấn tuyến tính  $D$  được xác định như (1.26).

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & 0 \\ 0 & 0 & -N_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

với  $d_{11} = -X_u$ ,  $d_{22} = -Y_v$ ,  $d_{33} = -N_r$

Thành phần giảm chấn phi tuyến  $D_n(\underline{\nu})$  được cho bởi (1.27):

$$D_n(\underline{\nu}) = \begin{bmatrix} d_{11n}(\underline{\nu}) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22n}(\underline{\nu}) & 0 \\ 0 & 0 & d_{33n}(\underline{\nu}) \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

trong đó:

$$\begin{aligned} d_{11n}(\underline{\nu}) &= d_{11n(u2)} + d_{11n(u3)} = -X_{|u|u}|u| - X_{uuu}u^2 = \sum_{i=2}^3 X_{ui}|u|^{(i-1)} \\ d_{22n}(\underline{\nu}) &= d_{22n(v2)} + d_{22n(v3)} - Y_{|r|v}|r| = -X_{|v|v}|v| - X_{vvv}v^2 - Y_{|r|v}|r| \\ &= \sum_{i=2}^3 X_{vi}|v|^{(i-1)} - Y_{|r|v}|r| \\ d_{33n}(\underline{\nu}) &= d_{33n(r2)} + d_{33n(r3)} - N_{|v|r}|v| = -X_{|r|r}|r| - X_{rrr}r^2 - N_{|v|r}|v| \\ &= \sum_{i=2}^3 X_{ri}|r|^{(i-1)} - N_{|v|r}|v| \end{aligned} \quad (1.28)$$

Những hệ số trong ma trận  $M$  của (1.23) có thể được xác định chính xác hoàn toàn sử dụng những phương pháp bán kinh nghiệm hoặc những chương trình tính toán thủy động lực học, nhưng việc xác định những hệ số  $\sum_{i=2}^3 X_{ui}|u|^{(i-1)}$ ,

$\sum_{i=2}^3 X_{vi}|v|^{(i-1)} - Y_{|r|v}|r|$ ,  $\sum_{i=2}^3 X_{ri}|r|^{(i-1)} - N_{|v|r}|v|$  trong ma trận suy giảm thủy động lực học phi tuyến  $D_n(\underline{\nu})$  của (1.28) là rất khó khăn. Có thể xác định chúng bằng cách kéo con tàu ở các tốc độ khác nhau theo các hướng khác nhau và đo lực kéo tương ứng thì có khoảng một nửa tham số ở trên được xác định song việc này rất khó tiến hành trên môi trường biển.

### 1.1.5.1 Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng mô hình xác định.

Mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng mô hình xác định có được khi giả định rằng các thông số của ma trận  $M$  trong (1.23), thông số của ma trận  $C(\underline{\nu})$  trong (1.24), là xác định được và xác định đủ, không có thêm thành phần nào khác. Các thông số của ma trận giảm chấn phi tuyến  $D_n(\underline{\nu})$  trong (1.28) chỉ có thành phần bậc hai và bậc

ba nghĩa là chỉ có thành phần  $d_{11n(u2)}, d_{11n(u3)}, d_{22n(v2)}, d_{22n(v3)}, d_{33n(r2)}, d_{33n(r3)}$  và xác định được, các thành phần khó xác định coi như bằng không, coi  $g(\underline{\eta}) = 0$  và không có nhiễu tác động. Cùng với giả định 2, mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang với mô hình xác định như sau [21]:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = F\underline{\tau} \end{cases} \quad (1.29)$$

trong đó:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

$$C(\underline{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

$$D(\underline{v}) = \begin{bmatrix} d_{11} + d_{11n(u2)} + d_{11n(u3)} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} + d_{11n(v2)} + d_{11n(v3)} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} + d_{11n(r2)} + d_{11n(r3)} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

và  $J(\underline{\eta})$  được xác định theo (1.22).

### 1.1.5.2 Mô hình toán bất định mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang

Những hệ số trong ma trận  $M$  trong (1.23) có thể được xác định chính xác nhưng thực tế tàu có khối lượng không đồng đều, tọa độ trọng tâm của tàu không trùng với gốc tọa độ gắn với thân tàu. Việc đưa ra công thức xác định các thông số trong ma trận  $M, C(\underline{v})$  dựa trên nhiều giả thiết, và việc xác định những hệ số:

$\sum_{i=2}^3 X_{ui} |u|^{(i-1)}, \sum_{i=2}^3 X_{vi} |v|^{(i-1)} - Y_{|r|v} |r|, \sum_{i=2}^3 X_{ri} |r|^{(i-1)} - N_{|v|r} |v|$  trong ma trận suy giảm thủy động lực học phi tuyến  $D_n(\underline{v})$  là rất phức tạp. Có thể xác định chúng bằng cách kéo con tàu ở các tốc độ khác nhau theo các hướng khác nhau và đo lực kéo tương ứng thì có khoảng một nửa tham số ở trên được xác định song việc này

không thể tiến hành trên môi trường biển. Ngoài ra các thành phần hệ số trong các ma trận trên còn phụ thuộc vào các yếu tố khác như trọng tải hàng hóa trên tàu, phụ thuộc vào vùng nước tàu di chuyển qua. Do đó có thể đưa ra mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do dạng thiếu cơ cấu chấp hành thể hiện đầy đủ tính chất động học của con tàu bằng cách gộp những thành phần khó xác định nêu trên, những thành phần bất định (không xác định) trong mô hình toán và nhiễu từ môi trường bên ngoài tác động vào đối tượng thành một véc-tơ bất định, được luận án ký hiệu là  $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ .

Khi đó mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang có chứa thành phần bất định được đưa ra như sau [16], [18], [21]:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu} \\ M\dot{\underline{\nu}} + C(\underline{\nu})\underline{\nu} + D(\underline{\nu})\underline{\nu} + g(\underline{\eta}) = F\tau + \underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \end{cases} \quad (1.33)$$

trong đó:

$\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  – véc-tơ lực và mô-men từ các thành phần bất định của mô hình tàu và nhiễu loạn tác động từ môi trường bên ngoài.

Các thông số của ma trận  $M$  được xác định theo (1.23), tham số của ma trận  $C(\underline{\nu})$  được xác định theo (1.24), tham số của ma trận  $D(\underline{\nu})$  được xác định theo (1.26), (1.27) và (1.28),  $J(\underline{\eta})$  được xác định theo (1.22).

Từ phương trình (1.21) đến (1.27) và (1.33) cùng với giả định 2, phương trình động học ba bậc tự do mô tả chuyển động tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành trong mặt phẳng ngang với mô hình bất định được viết lại dạng khai triển như sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \\ \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{d_{11}}{m_{11}} u - \frac{d_{11n}(\underline{\nu})}{m_{11}} u + \frac{1}{m_{11}} \tau_u + \frac{1}{m_{11}} \Delta_u(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{d_{22}}{m_{22}} v - \frac{d_{22n}(\underline{\nu})}{m_{22}} v + \frac{1}{m_{22}} \Delta_v(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \\ \dot{r} = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}} uv - \frac{d_{33}}{m_{33}} r - \frac{d_{33n}(\underline{\nu})}{m_{33}} r + \frac{1}{m_{33}} \tau_r + \frac{1}{m_{33}} \Delta_r(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \end{cases} \quad (1.34)$$

trong đó:

$\Delta_u(\underline{\eta}, \underline{\nu}), \Delta_v(\underline{\eta}, \underline{\nu}), \Delta_r(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  – các thành phần bất định trong mô hình tàu và nhiễu tác động từ môi trường ngoài.

$u, v, r$  – lần lượt là tốc độ trượt dọc, tốc độ trượt ngang, tốc độ quay trở của tàu.

$x, y, \psi$  – lần lượt là tọa độ vị trí theo trục  $x, y$  và góc hướng của tàu trong hệ qui chiếu trái đất (e-frame).

$\tau_u, \tau_r$  – lần lượt là lực trượt dọc (được tạo ra bởi chân vịt chính) và mô-men quay trở (được tạo ra bởi bánh lái chính phía sau lái).

Trong giới hạn nội dung nghiên cứu của luận án, nghiên cứu sinh coi đối tượng tàu thủy có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành, ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang là đối tượng nghiên cứu chính của luận án và chỉ đề cập đến bài toán điều khiển cho đối tượng này có mô hình xác định dạng tổng quát (1.29) và mô hình bất định dạng tổng quát (1.33) hoặc dạng chi tiết như (1.34).

## 1.2 Tổng quan các nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy

### 1.2.1 Tình hình nghiên cứu trong nước

Trong những năm gần đây với sự phát triển của ngành công nghiệp đóng tàu, điều khiển chuyển động tàu thủy đã được các nhà khoa học trong nước quan tâm, nghiên cứu. Từ năm 1999 tác giả của công trình [3] đã nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật tự động hóa và vi xử lý cho hệ thống lái tàu dùng cho những con tàu đóng tại Việt Nam, tuy nhiên công trình này khi nghiên cứu chỉ đề cập tới vấn đề điều khiển ổn định tàu theo hướng đi và áp dụng mô hình tàu dạng NOMOTO một bậc tự do.

Tác giả của công trình [7] đã thực hiện nghiên cứu kiến trúc hướng mô hình kết hợp với Real Time UML/MARTE trong thiết kế hệ thống điều khiển cho phương tiện không người lái tự hành trên mặt nước, không phải là tàu thủy có người lái và không phải là đối tượng thiếu cơ cấu chấp hành.

Tại công trình [8] tác giả đã nghiên cứu ứng dụng lý thuyết hiện đại vào điều khiển lái tàu, sử dụng lý thuyết điều khiển thích nghi, trượt, Backstepping và mạng Neural để điều khiển bám quỹ đạo cho tàu nổi có mô hình đủ cơ cấu chấp hành sử

dụng mô hình toán 3 bậc tự do. Trong công trình này tác giả đã tập hợp các nhiễu bất định vào một véc-tơ bất định và dùng mạng Neural để nhận dạng nhiễu bất định đó.

### **1.2.2 Tình hình nghiên cứu ngoài nước**

Tàu thủy là đối tượng có tính phi tuyến lớn, hoạt động trong môi trường Đại Dương, bởi vậy chịu sự ảnh hưởng lớn của những yếu tố nhiễu ngẫu nhiên như sóng, gió, dòng chảy hải lưu và đặc biệt là việc đo đạc, xác định các tham số động học là phức tạp và khó khăn. Với đặc thù đó, tàu thủy là đối tượng được rất nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm, nghiên cứu và nó luôn là một thử thách thú vị đối với cộng đồng các nhà khoa học khi nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy.

Những tác giả đã có nhiều công trình nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy điển hình như tác giả Fossen. T. I [23] - [29], tác giả Lefeber. E [39] - [41], tác giả Perez. T [57], [58], tác giả Pettersen. KY [56], tác giả Do K.D and J.Pan [16] - [21],...

Như đã đề cập trong mục 1.1 của luận án, khi phân tích mô hình toán mô tả chuyển động của tàu thủy trong mặt phẳng ngang được chia ra làm hai loại mô hình: mô hình tàu đủ cơ cấu chấp hành (Full Actuated) và mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated). Để tổng quan chi tiết các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy đã và đang được cộng đồng các nhà khoa học nghiên cứu, dưới đây luận án sẽ trình bày tổng quan các phương pháp điều khiển riêng cho từng nhóm đối tượng.

#### **1.2.2.1 Tổng quan điều khiển chuyển động tàu thủy đủ cơ cấu chấp hành**

Mô hình toán tàu đủ cơ cấu chấp hành là mô hình toán mà có số biến trạng thái bằng với số tín hiệu điều khiển.

Các công trình nghiên cứu về điều khiển tàu với mô hình đủ cơ cấu chấp hành được phân tích trong công trình [23] - [29], và các công trình [15], [37], [42], [49], [52], [61], [71], [73], [76]. Mô hình tàu đủ cơ cấu chấp hành được mô tả dưới nhiều dạng khác nhau nhưng xét chung lại có hai loại: mô hình tuyến tính và mô hình phi tuyến. Trong [24], [28] tác giả nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển lái tự động tàu thủy (điều khiển tàu ổn định theo hướng đi cho trước) với mô hình tuyến tính sử



dụng điều khiển PID, trong đó mô hình toán sử dụng để thiết kế bộ điều khiển là mô hình đơn giản hóa NOMOTO bậc một, bậc hai, hay các bộ điều khiển tuyến tính LQR (Linear Quadratic Regulator), LQG (Linear Quadratic Gaussian), với mô hình máy lái bậc hai được tuyến tính hóa từ mô hình phi tuyến.

Khi lý thuyết điều khiển phi tuyến phát triển và được ứng dụng thì mô hình tàu phi tuyến cùng các bộ điều khiển phi tuyến như Backstepping [23], [71], điều khiển trượt SMC (Sliding Mode Control) [37], [47], điều khiển bề mặt động DSC (Dynamic Surface Control) [61], điều khiển cửa sổ động DWC (Dynamic Window based Control) [49], điều khiển dự báo MPC (Model Predictive Control) [52], điều khiển thích nghi [42],... được áp dụng để thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy với mô hình toán tàu dạng đủ cơ cấu chấp hành.

Nhằm nâng cao chất lượng trong điều khiển cũng như sử dụng mô hình tàu khi có xét đến các yếu tố bất định và các nhiễu loạn từ môi trường ngoài các bộ điều khiển kép như: Backstepping - Neural trong [15], [73], [76], Backstepping - thích nghi trong [61], Backstepping - trượt thích nghi trong [37], được sử dụng.

Tổng hợp các bộ điều khiển từ các công trình trên với mô hình đủ cơ cấu chấp hành thấy rằng các bộ điều khiển đã và đang được sử dụng là rất đa dạng. Từ việc sử dụng điều khiển tuyến tính bằng cách đơn giản hóa mô hình đến các bộ điều khiển phi tuyến với mô hình tàu phi tuyến xác định, và bộ điều khiển phi tuyến kép để giải quyết các thành phần bất định trong mô hình tàu cũng như các nhiễu loạn từ môi trường nhằm nâng cao chất lượng điều khiển trong chuyển động tàu đủ cơ cấu chấp hành.

#### **1.2.2.2 Tổng quan điều khiển chuyển động tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành**

Mô hình toán tàu thủy dạng thiếu cơ cấu chấp hành có đặc điểm số tín hiệu điều khiển ít hơn số biến trạng thái cần điều khiển. Mô hình loại tàu này bắt đầu được các nhà khoa học nghiên cứu, thiết kế điều khiển từ cuối thế kỷ XX (theo thống kê tài liệu [28] trang 5).

Các công trình nghiên cứu về điều khiển tàu thủy có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành đã được nghiên cứu, phân tích trong các công trình [10], [14], [16] - [22], [30], [35], [40], [41], [56], và các công trình [62] - [70]. Cũng giống như mô hình tàu thủy đủ cơ cấu chấp hành, mô hình toán tàu thiếu cơ cấu chấp hành cũng

được viết dưới nhiều dạng khác nhau. Với mục đích phù hợp thiết kế bộ điều khiển như: mô hình đơn giản hóa NOMOTO bậc một, NOMOTO bậc hai, mô hình Norrbín [24], mô hình tuyến tính máy lái, mô hình phi tuyến ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang có mô hình xác định, mô hình phi tuyến ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang có chứa thành phần bất định.

Mô hình dạng NOMOTO bậc một, bậc hai, mô hình Norrbín hay mô hình tuyến tính máy lái thường chỉ được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển lái tự động với chức năng ổn định tàu theo hướng đi cho trước bởi tính chất đơn giản hóa trong các mô hình này. Trong công trình [50] tác giả thiết kế bộ điều khiển Fuzzy-LQR cho hệ lái tự động (chỉ ổn định tàu theo hướng đi cho trước) với tàu tự hành USV (Unmanned Surface Vessel) sử dụng mô hình tuyến tính hóa. Dựa trên mô hình NOMOTO tác giả công trình [36] đã xây dựng bộ điều khiển tàu chỉ ổn định theo hướng đi sử dụng mạng Neural thích nghi theo mô hình mẫu, trong đó các nhiễu loạn bất định từ môi trường ngoài được xấp xỉ bằng mạng Neural. Tác giả công trình [66] sử dụng mô hình phi tuyến đơn giản hóa của Norrbín để thiết kế bộ điều khiển tàu chỉ ổn định theo hướng đi cho trước với bộ điều khiển trượt SMC - Backstepping, những nhiễu loạn bất định từ môi trường được ước lượng bởi bộ quan sát nhiễu phi tuyến. Bộ điều khiển theo luật điều khiển  $H_\infty$  được thiết kế dùng cho tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành với mục đích chỉ ổn định, giảm lắc ngang trên các tàu Container được công bố trong công trình [34].

Với đặc thù tàu thủy là đối tượng điều khiển có tính phi tuyến lớn, nên việc sử dụng những mô hình đơn giản hóa hay mô hình tuyến tính trên đã làm cho kết quả điều khiển không đạt được theo ý muốn xét về mặt độ chính xác điều khiển, về mặt ổn định và mức độ đáp ứng điều khiển. Những năm sau này với sự phát triển của lý thuyết điều khiển hiện đại, công nghệ điện tử và tin học đã tạo ra được những phần cứng đáp ứng được yêu cầu đặt ra của lý thuyết điều khiển hiện đại. Do đó các lý thuyết điều khiển hiện đại như thích nghi, Backstepping, trượt SMC, điều khiển dự báo MPC đã được nghiên cứu và áp dụng thành công trong điều khiển chuyển động tàu thủy. Ở công trình [30] tác giả đã phát triển luật điều khiển dựa trên kỹ thuật Backstepping để điều khiển tàu thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt, nhưng với giả định rằng tàu chuyển động chỉ với quỹ đạo thẳng và vận tốc chuyển động của tàu là không đổi và luôn dương (tàu chuyển động tiến). Những yếu tố bất

định trong mô hình động học tàu thủy và nhiễu tác động từ môi trường ngoài không được xem xét đến. Công trình [16] tác giả đã thiết kế bộ điều khiển tàu thủy bám quỹ đạo dựa trên hàm Lyapunov và kỹ thuật Backstepping. Để kết quả điều khiển đạt được ổn định và quỹ đạo đầu ra bám theo trên toàn bộ quỹ đạo đặt, giả thiết được công trình đưa ra là các tín hiệu điều khiển phải không có ràng buộc về độ lớn. Cũng tác giả của công trình [16] và các cộng sự sau này đã phát triển các bộ điều khiển đa biến để điều khiển tàu thủy ổn định trên toàn quỹ đạo đặt, giảm lắc ngang và lắc dọc, trong đó thuật toán chiếu liên tục của Lipschitz được sử dụng để cập nhật ước lượng nhiễu không xác định được đưa ra trong công trình [17]. Trong công trình [22] tác giả đề xuất phương pháp điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt với yêu cầu ràng buộc tín hiệu điều khiển đầu vào về độ lớn và tốc độ, sử dụng phương pháp điều khiển bề mặt động DSC trong đó mô hình toán được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển coi như không chứa các yếu tố bất định. Công trình [46], một phương pháp điều khiển dựa trên đại số tuyến tính được đề xuất để thiết kế bộ điều khiển bám theo quỹ đạo đặt cho tàu thiếu cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển này được thiết kế dựa trên việc tuyến tính hóa mô hình phi tuyến đối tượng điều khiển. Tín hiệu điều khiển được tính toán dựa trên việc xác định các điều kiện để hệ phương trình tuyến tính hóa có một nghiệm duy nhất và cuối cùng tín hiệu điều khiển có được khi giải hệ phương trình tuyến tính hóa. Tuy nhiên trong bộ điều khiển này tác giả không đề cập tới vấn đề nhiễu tác động và các yếu tố phi tuyến bất định trong mô hình động lực học tàu thủy.

Như đã đề cập trong mục 1.2 của luận án, để đưa ra mô hình toán mô tả chuyển động của tàu thủy rất nhiều các giả thiết được đặt ra như: các hệ số ma trận Coriolis  $C(\underline{v})$ , ma trận giảm chấn thủy động lực học  $D(\underline{v})$ , ma trận khối lượng  $M$  là không đổi, hay chỉ có thành phần tuyến tính xác định. Hay tọa độ trọng tâm của tàu nằm trong mặt phẳng đối xứng thân tàu và trùng với gốc tọa độ gắn thân tàu, các nhiễu bất định trong mô hình toán thường được bỏ qua. Hệ quả là mô hình tàu sử dụng để thiết kế bộ điều khiển có sai lệch so với mô hình thực tế của tàu, dẫn tới chất lượng điều khiển không được như mong muốn,...Do đó các công trình [67], [69], [70] đã thiết kế bộ điều khiển sử dụng mô hình có xét đến các yếu tố bất định trong mô hình tàu. Để cập nhật trực tuyến các tham số bất định trong mô hình, tránh sự thay đổi theo thời gian của các tham số trong ma trận quán tính khối lượng  $M$

trong mô hình. Tác giả [69] đề xuất bộ điều khiển chuyển động tàu bám theo quỹ đạo đặt dùng cho tàu tự hành sử dụng bộ lọc Kalman UKF (Unscented Kalman Filter) để loại bỏ những nhiễu ẩn trong mô hình toán của đối tượng kết hợp với thuật điều khiển được xây dựng dựa trên kỹ thuật Backstepping. Trong [67] tác giả đã xây dựng bộ điều khiển phản hồi đầu ra để điều khiển tàu nổi thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên phương trình Euler-Lagrange. Trong đó phương pháp biến đổi tọa độ được sử dụng để khắc phục thành phần bất định bậc ba phát sinh trong dẫn xuất hàm Lyapunov do thành phần lực Coriolis và lực hướng tâm gây ra. Bộ điều khiển được thiết kế dựa trên kỹ thuật Backstepping, lý thuyết ổn định hàm Lyapunov và bộ quan sát trạng thái được đưa ra dựa trên phép biến đổi tọa độ. Trong [70] tác giả đề xuất bộ điều khiển dựa trên kỹ thuật Backstepping và chế độ trượt động DSC để điều khiển bám quỹ đạo cho tàu nổi thiếu cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển có xét đến các sai lệch mô hình và các nhiễu bất định từ môi trường ngoài. Mô hình sử dụng để thiết kế bộ điều khiển gồm mô hình tàu phi tuyến và phương trình động lực học sai lệch Serret-Frenet. Thông qua hàm Lyapunov, tác giả đã chứng minh rằng bộ điều khiển đề xuất ổn định tiệm cận.

Điều khiển trượt (SMC) có đặc điểm độ chính xác điều khiển cao, bền vững đối với nhiễu và sự thay đổi các thông số của đối tượng điều khiển, cấu trúc đơn giản, không đòi hỏi phải biết chính xác các thành phần của nhiễu, các thành phần không mô hình hóa được cũng như thời gian trễ,... nhưng yêu cầu phải biết giới hạn biến thiên của chúng nên nhiều tác giả cũng đã áp dụng phương pháp này để thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy. Trong [48] một luật điều khiển ở chế độ trượt thích nghi được đưa ra để điều khiển bám quỹ đạo tàu tự hành ASV (Autonomous Surface Vessel) thiếu cơ cấu chấp hành, luật điều khiển được đưa ra bằng cách sử dụng hai bề mặt trượt, mặt trượt thứ nhất dùng để điều khiển sai lệch bám theo quỹ đạo trượt dọc và mặt trượt thứ hai dùng để điều khiển sai lệch bám theo quỹ đạo trượt ngang. Trong [60] tác giả đề xuất bộ điều khiển trượt có kháng nhiễu ADRC (Active Disturbance Rejection Control) để điều khiển bám quỹ đạo của tàu nổi thiếu cơ cấu chấp hành với thành phần bất định ẩn trong mô hình và nhiễu tác động từ môi trường ngoài. Mô hình toán được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển là mô hình đơn giản hóa trong hệ tọa độ biến đổi (được phân tích trong [60]) và số phương

trình trong mô hình toán được sử dụng là 8 phương trình, điều này làm tăng thêm sự phức tạp trong thiết kế bộ điều khiển.

Gần đây khi lý thuyết điều khiển dự báo MPC được nghiên cứu và ứng dụng. Nhiều tác giả đã nghiên cứu áp dụng vào điều khiển chuyển động tàu thủy. Trong [53] một bộ điều khiển chỉ với mục đích ổn định tàu theo hướng đi cho trước với đường ngắm LOS (Line-Of-Sight) được tạo ra dựa trên nguyên lý mô hình dự báo MPC. Mô hình động học tàu thủy ba bậc tự do được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển là mô hình đơn giản hóa, xét trên mặt phẳng ngang chỉ với hai biến trạng thái là tốc độ tàu và hướng đi. Để đầu ra (hướng đi của tàu) bám theo hướng đi đặt, hàm mục tiêu dạng toàn phương QP (Quadratic Programming) được sử dụng trong bộ điều khiển MPC bằng cách tuyến tính hóa liên tục dọc theo đường ngắm LOS của tàu. Trong [62] đã đề xuất bộ điều khiển dự báo theo mô hình phi tuyến NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) để điều khiển bám quỹ đạo các tàu nổi thiếu cơ cấu chấp hành có xét đến điều kiện bão hòa của tín hiệu điều khiển đầu vào. Bộ điều khiển NMPC được xây dựng để tính toán các tín hiệu điều khiển dự báo đầu vào tương lai dựa trên biến trạng thái hiện tại bằng cách tối ưu hóa hàm chức năng. Mô hình toán sử dụng để thiết kế bộ điều khiển là mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành được đơn giản hóa và không xét đến thành phần bất định trong mô hình. Trong [48], tác giả xây dựng bộ điều khiển dự báo theo mô hình phi tuyến NMPC để điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt có xét đến điều kiện ràng buộc tín hiệu điều khiển đầu vào. Mô hình toán được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển là mô hình tàu 3 bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trong đó tác giả coi như trong mô hình không có thành phần bất định và tất cả các biến trạng thái được giả thiết là phải đo đạc và xác định được hoàn toàn.

Việc áp dụng lý thuyết điều khiển đơn cơ bản chưa đáp ứng tốt được các vấn đề trong điều khiển tàu do tính phi tuyến và yếu tố nhiễu bất định. Một số tác giả đã kết hợp một số lý thuyết hiện đại lại với nhau tạo thành bộ điều khiển kép như: điều khiển trượt (SMC) kết hợp Neural [14], điều khiển thích nghi kết hợp Neural [63], trượt thích nghi [72], trượt thích nghi kết hợp bộ quan sát phi tuyến [68], [75], thích nghi Neural kết hợp trượt - Backstepping [64] nhằm nâng cao chất lượng điều khiển chuyển động tàu thủy.

Một bộ điều khiển bám theo quỹ đạo đặt cho tàu thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên mạng Neural và mô hình trượt phân cấp được đề xuất trong [14]. Trong đó mô hình trượt phân cấp được sử dụng để giải quyết vấn đề thiếu tác động điều khiển của cơ cấu chấp hành trong mô hình. Mạng Neural được sử dụng như một công cụ để xấp xỉ hàm phi tuyến bất định trong mô hình toán của đối tượng. Với phương pháp này, sự bền vững của bộ điều khiển đề xuất được khẳng định và vấn đề rung (chattering) thường xuất hiện ở bộ điều khiển trượt được giải quyết. Trong mô hình toán các phần tử giảm chấn phi tuyến của mô hình tàu được xem xét và xấp xỉ bằng mạng Neural mà trước đó chúng bị bỏ qua trong nhiều nghiên cứu. Các nhiễu bất định cũng được xem xét đến để kiểm tra độ bền vững của bộ điều khiển. Tuy nhiên vấn đề thỏa mãn ràng buộc về tín hiệu điều khiển thì không được tác giả đề cập đến.

Trong [68] tác giả đề xuất một bộ điều khiển dựa trên chế độ trượt thích nghi để điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt, kết hợp với bộ quan sát nhiễu phi tuyến bất định NDO (Nonlinear Disturbance Observer) để ước lượng các nhiễu bất định, sau đó tín hiệu ước lượng này được bù vào tín hiệu điều khiển. Bộ điều khiển có xét đến các tham số phi tuyến bất định trong mô hình tàu. Vấn đề rung (Chattering) của bộ điều khiển ở chế độ trượt được cải thiện bằng việc áp dụng lý thuyết về lớp biên và một phương pháp thích nghi để điều chỉnh độ dày của lớp biên trong điều khiển.

Bộ quan sát nhiễu phi tuyến bất định NDO trong [68] cũng được áp dụng trong công trình [75], trong đó tác giả sử dụng thuật toán điều khiển ở chế độ trượt thích nghi và bộ quan sát nhiễu phi tuyến NDO để xây dựng bộ điều khiển chỉ với mục đích ổn định tàu theo hướng cho trước và giả thiết rằng tốc độ tàu là không đổi.

Trong [64] nhóm tác giả xây dựng bộ điều khiển kép sử dụng Neural thích nghi để điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt, trong đó các yếu tố bất định trong mô hình và các nhiễu loạn không xác định, biến đổi chậm theo thời gian từ môi trường ngoài được xem xét đến. Lý thuyết hàm chặn Logarit, kỹ thuật điều khiển bề mặt động (DSC), kỹ thuật Backstepping, bộ quan sát nhiễu bất định được sử dụng với mục đích làm cho các sai lệch bám luôn nằm giới hạn cho phép được cài đặt trước. Mạng Neural được sử dụng để xấp xỉ các yếu tố bất định trong mô hình động lực tàu, các nhiễu loạn từ môi trường không xác định hoặc biến đổi chậm theo thời gian được ước lượng bởi bộ quan sát.

Tổng hợp các phương pháp điều khiển đã và đang áp dụng với mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành là rất đa dạng và phong phú như: phương pháp điều khiển tuyến tính LQR, PID,... với mô hình đơn giản hóa NOMOTO hay mô hình được tuyến tính hóa từ mô hình phi tuyến và mô hình này chỉ giúp để thiết kế bộ điều khiển ổn định tàu theo hướng đi cho trước. Phương pháp điều khiển phi tuyến như điều khiển trượt SMC, điều khiển động DSC, Backstepping,... kết hợp với các bộ quan sát nhiễu như Kalman (UKF), NDO,... Để giải quyết bài toán điều khiển khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định, những nhiễu loạn từ môi trường ngoài thì các bộ điều khiển kép như: điều khiển SMC kết hợp Neural, điều khiển thích nghi kết hợp Neural, SMC - thích nghi, trượt thích nghi kết hợp bộ quan sát phi tuyến, thích nghi Neural kết hợp trượt – Backstepping được sử dụng nhằm nâng cao chất lượng điều khiển.

### **1.3 Hướng nghiên cứu của luận án**

#### **1.3.1 Vấn đề đặt ra trong luận án**

Từ phân tích tổng quan các phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy đủ và thiếu cơ cấu chấp hành cho thấy: Các bộ điều khiển được sử dụng từ kinh điển đến điều khiển hiện đại. Kết quả là, đã có rất nhiều phương pháp điều khiển, bộ điều khiển mang tính thời sự và các cách điều khiển khác nhau áp dụng vào chuyển động tàu thủy. Từ những mô hình tàu tuyến tính, phi tuyến đơn giản hóa, đến mô hình tàu phi tuyến phức tạp có xét đến các yếu tố bất định trong mô hình

Các công trình đã nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy mới chỉ dừng lại ở việc giải quyết những vấn đề điều khiển đơn lẻ chưa có công trình nào giải quyết kết hợp chung những vấn đề như: bám quỹ đạo, ràng buộc tín hiệu điều khiển, sử dụng mô hình có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên,... trong một bộ điều khiển.

Từ đó, nghiên cứu sinh đặt ra hướng nghiên cứu cho luận án là: nghiên cứu ứng dụng một phương pháp điều khiển mới, để giải quyết kết hợp chung những vấn đề như bám quỹ đạo, ràng buộc tín hiệu điều khiển, mô hình tàu có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên trong một bộ điều khiển, với mục đích điều khiển đối tượng tàu nổi có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt. Cụ thể bộ điều khiển đề xuất là bộ điều khiển dự báo MPC theo nguyên lý

trượt dọc trên trục thời gian (receding horizon) [54], bộ điều khiển MPC tuyến tính áp dụng cho đối tượng phi tuyến dựa trên kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc trục thời gian.

### 1.3.2 Ý nghĩa vấn đề ràng buộc tín hiệu điều khiển

Đối với tàu thủy có cơ cấu thực hiện gồm chân vịt và bánh lái chính phía sau lái (thường là các loại tàu chở hàng) thì góc bẻ lái (ký hiệu là  $\beta$ ) luôn được giới hạn trong khoảng  $35^0(\text{port}) \leq \beta \leq 35^0(\text{s.t board})$  (góc bẻ lái  $\beta$  được giới hạn từ 35 độ trái đến 35 độ phải). Còn ở chế độ lái tự động góc bẻ lái luôn được giới hạn trong khoảng  $10^0(\text{port}) \leq \beta \leq 10^0(\text{s.t board})$ . Ở những phương pháp điều khiển chuyển động tàu thủy hiện có đã trình bày ở trên, kể cả đối với mô hình đủ hay thiếu cơ cấu chấp hành, các điều kiện ràng buộc về tín hiệu góc bẻ lái này nếu như bắt buộc phải được thỏa mãn thì luôn được chuyển sang phần nhiệm vụ của cơ cấu chấp hành thông qua các thiết bị hạn chế tín hiệu (saturation devices). Điều này dẫn tới vấn đề khi thiết kế bộ điều khiển, để đạt được mục tiêu điều khiển tàu bám theo quỹ đạo đặt thì góc bẻ lái có khi phải lớn hơn giá trị quy định góc bẻ lái ở trên rất nhiều. Do vậy vấn đề ràng buộc tín hiệu điều khiển góc bẻ lái cần phải được đặt ra khi nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy.

## 1.4 Kết luận chương 1

Trong chương 1, luận án đã giải quyết được các nội dung:

Phân tích mô hình toán mô tả động lực học chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do, 3 bậc tự do trên mặt ngang. Mô hình tàu thủy 3 bậc tự do đủ và thiếu cơ cấu chấp hành dạng mô hình xác định khi coi không có nhiễu tác động và các tham số trong mô hình tàu là xác định được hoàn toàn. Đề xuất mô hình tàu thủy bất định 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang thiếu cơ cấu chấp hành bằng cách gộp những thành phần bất định trong mô hình và nhiễu ngẫu nhiên tác động từ môi trường ngoài thành véc-tơ hàm bất định.

Phân tích được tổng quan các nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy trong và ngoài nước, từ đó đưa ra hướng nghiên cứu của luận án.



## CHƯƠNG 2 ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BÁM QUỠ ĐẠO ĐẶT VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO CÓ RÀNG BUỘC TÍN HIỆU ĐIỀU KHIỂN KHI MÔ HÌNH TÀU XÁC ĐỊNH

Với mục đích nghiên cứu luận án đặt ra thì nhiệm vụ của luận án là thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám theo quỹ đạo đặt và tín hiệu điều khiển bị ràng buộc bởi điều kiện (2.1), cho đối tượng tàu nổi có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành, trong mô hình có chứa thành phần bất định và nhiễu tác động ngẫu nhiên.

$$\underline{b}_1(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \leq \underline{\tau} \leq \underline{b}_2(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \text{ hoặc } a \leq \underline{\tau} \leq b \quad (2.1)$$

trong đó  $\underline{\tau}$  – lực và mô-men tạo ra bởi cơ cấu thực hiện (chân vịt và bánh lái chính phía sau lái), theo (1.21) thì  $\underline{\tau} = [\tau_u \ \tau_r]^T$ ,  $a, b$  – giá trị giới hạn tín hiệu điều khiển bị ràng buộc.

Trên cơ sở nhận xét như vậy, nghiên cứu sinh định hướng sẽ sử dụng nguyên lý điều khiển dự báo [5], [13], [32], [45], [59] để giải quyết nhiệm vụ điều khiển đặt ra cho luận án. Nguyên lý này dựa trên các phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc [51], [55] và điều khiển tối ưu có ràng buộc [5] nên hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu giải quyết trực tiếp điều kiện ràng buộc (2.1) về tín hiệu điều khiển.

Điều khiển dự báo MPC được ứng dụng để thiết kế bộ điều khiển tối ưu hóa có ràng buộc cho nhiều đối tượng khác nhau trong công nghiệp, và cũng đã được áp dụng cho tàu thủy trong các công trình [48], [53], [62]. Những bộ điều khiển dự báo đã áp dụng đó là những bộ điều khiển dự báo tuyến tính cho mô hình đối tượng tuyến tính hay bộ điều khiển dự báo phi tuyến NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) như công trình [48] cho đối tượng phi tuyến. Đặc điểm của bộ điều khiển dự báo NMPC là khối lượng tính toán lớn, việc tìm nghiệm bài toán tối ưu phi tuyến từ hàm hợp phức tạp, thời gian tính toán dài, ... Do đó định hướng của luận án sẽ sử dụng nguyên lý điều khiển dự báo cho hệ tuyến tính để thiết kế bộ điều khiển cho đối tượng phi tuyến (tàu thủy) trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc trục thời gian.

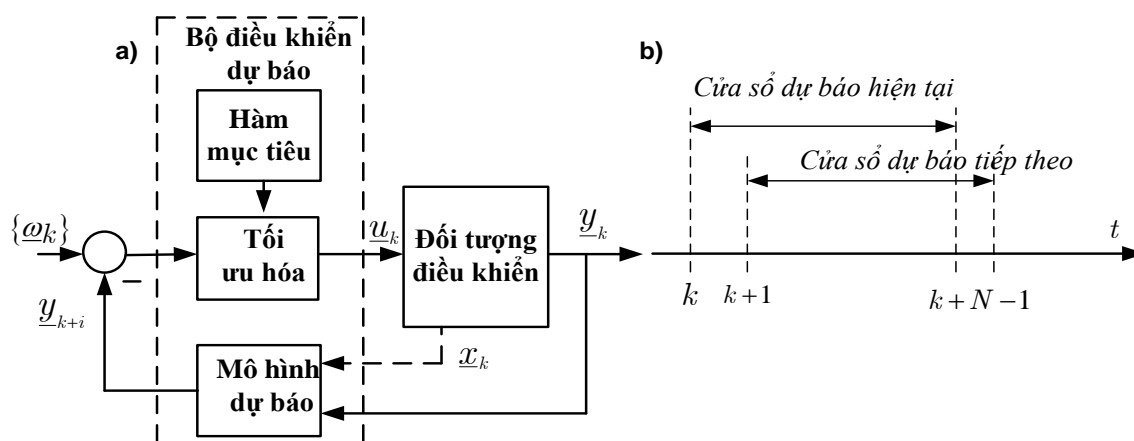
Với định hướng đặt ra đó, dưới đây, trong chương này trước khi đi vào thiết kế cụ thể các bộ điều khiển dự báo, luận án sẽ trình bày nguyên lý chung về:

Điều khiển dự báo, điều khiển dự báo hệ song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian. Các phương pháp nâng cao chất lượng điều khiển dự báo và phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc.

Tiếp theo, luận án đi vào chi tiết nội dung phần thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái, phản hồi đầu ra khi mô hình tàu có tham số xác định (không chứa thành phần bất định) để chuyển động tàu thủy bám theo quỹ đạo đặt. Cũng ở phần thiết kế bộ điều khiển này, luận án sẽ đề xuất xây dựng bộ quan sát trạng thái mới từ mô hình liên tục của đối tượng.

## 2.1 Nguyên lý điều khiển dự báo

### 2.1.1 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo



Hình 2.1 Cấu trúc và nguyên lý làm việc của hệ điều khiển dự báo [5].

Hình 2.1 mô tả cấu trúc một bộ điều khiển dự báo và nguyên lý làm việc trượt dọc trên trục thời gian của nó, theo tài liệu [5], [54]. Cấu trúc gồm 3 khối chính là khối mô hình dự báo, khối hàm mục tiêu và khối tối ưu hóa (Hình 2.1a). Chúng được thiết kế dựa trên mô hình toán dạng rời rạc của đối tượng điều khiển dạng (2.2):

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = \underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) \\ \underline{y}_k = \underline{g}(\underline{x}_k) \end{cases} \quad (2.2)$$

trong đó:

$\underline{x}_k = [x_1(kT_a), x_2(kT_a), \dots, x_n(kT_a)]^T$  – véc-tơ trạng thái

$\underline{u}_k = [u_1(kT_a), u_2(kT_a), \dots, u_m(kT_a)]^T \in U$  – véc-tơ các tín hiệu đầu vào

$\underline{y}_k = [y_1(kT_a), y_2(kT_a), \dots, y_r(kT_a)]^T$  – véc-tơ các tín hiệu đầu ra

$T_a$  – chu kỳ trích mẫu

$\underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) = (f_1(\underline{x}_k, \underline{u}_k), f_2(\underline{x}_k, \underline{u}_k), \dots, f_n(\underline{x}_k, \underline{u}_k))^T$  – véc-tơ hàm trạng thái

$\underline{g}(\underline{x}_k, \underline{u}_k) = (g_1(\underline{x}_k, \underline{u}_k), g_2(\underline{x}_k, \underline{u}_k), \dots, g_r(\underline{x}_k, \underline{u}_k))^T$  – véc-tơ hàm đầu ra

và làm việc theo nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian (Hình 2.1b).

### 2.1.1.1 Khối mô hình dự báo

Khối này có nhiệm vụ như sau. Tại thời điểm  $k$  hiện tại, dựa vào mô hình toán (2.2) của đối tượng điều khiển, nó xác định truy hồi các đầu ra tương lai  $\underline{y}_{k+i}$ ,  $i = 1, \dots, N$  (với  $N$  là số cửa sổ dự báo) thuộc cửa sổ dự báo hiện tại. Chẳng hạn như:

$$\left. \begin{aligned} \text{khi } i = 1: \quad \underline{y}_{k+1} &= \underline{g}(\underline{x}_{k+1}) = \underline{g}(\underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k)) \triangleq \underline{h}_1(\underline{x}_k, \underline{u}_k) \\ \text{khi } i = 2: \quad \underline{y}_{k+2} &= \underline{g}(\underline{x}_{k+2}) = \underline{g}(\underline{f}(\underline{x}_{k+1}, \underline{u}_{k+1})) = \underline{g}(\underline{f}(\underline{f}(\underline{x}_k, \underline{u}_k), \underline{u}_{k+1})) \\ &\triangleq \underline{h}_2(\underline{x}_k, \underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}) \\ &\vdots \\ \text{khi } i = N: \quad \underline{y}_{k+N} &= \dots \triangleq \underline{h}_N(\underline{x}_k, \underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N-1}) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Như vậy, tất cả các đầu ra dự báo này, tính từ thời điểm hiện tại  $k$  mà ở đó trạng thái hiện tại  $\underline{x}_k$  là đã biết do đo hoặc quan sát được, đều là những hàm phụ thuộc vào các đầu vào tương lai  $\underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N-1}$ .

Ký hiệu tập tất cả các đầu ra tương lai đó theo biến mới:

$$\underline{p} = \text{col}(\underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N-1}) \quad (2.4)$$

và sẽ có cho mọi chỉ số  $i = 1, \dots, N$  thuộc cửa sổ dự báo hiện tại:

$$\underline{\mathbf{y}}_k(\underline{p}) = \begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \underline{y}_{k+2} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{h}_1(\underline{p}) \\ \underline{h}_2(\underline{p}) \\ \vdots \\ \underline{h}_N(\underline{p}) \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{h}}(\underline{p}) \quad (2.5)$$

đó là một véc-tơ hàm dự báo đầu ra phụ thuộc  $\underline{p}$  của các đầu vào tương lai.

### 2.1.1.2 Khối hàm mục tiêu

Khối hàm mục tiêu được xây dựng từ nhiệm vụ điều khiển đặt ra mà ở đây là tín hiệu đầu ra  $\underline{y}_k$  của hệ phải bám theo được tín hiệu đặt  $\underline{w}_k$  mong muốn, tức là phải tạo ra được:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \underline{e}(p) = \mathbf{0} \quad \text{trong đó} \quad \underline{e}(p) = \underline{\mathbf{y}}_k(p) - \underline{\mathbf{w}}_k \quad \text{và} \quad \underline{\mathbf{w}}_k = \begin{pmatrix} \underline{w}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Có thể thấy một trong các hàm mục tiêu đáp ứng được yêu cầu trên là [5], [13], [32], [45]:

$$J_k(p) = \underline{e}(p)^T Q_k \underline{e}(p) + \underline{p}^T R_k \underline{p} \rightarrow \min_p \quad (2.7)$$

trong đó  $Q_k, R_k$  là hai ma trận đối xứng xác định dương tùy chọn. Thông qua việc chọn hai tham số này ta có thể can thiệp thêm vào chất lượng điều khiển ngoài việc bám theo tín hiệu đặt (2.6) nêu trên. Chẳng hạn như khi  $Q_k$  được chọn càng lớn, thời gian quá độ sẽ càng ngắn, hoặc khi  $R_k$  được chọn càng lớn, tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  tối ưu tìm được sau này sẽ càng nhỏ [1], [2], [5].

### 2.1.1.3 Khối tối ưu hóa

Khối tối ưu hóa có nhiệm vụ tìm nghiệm tối ưu của bài toán tối ưu có ràng buộc:

$$\underline{p}^* = \arg \min_{p \in P} J_k(p) \quad (2.8)$$

với tập ràng buộc là:

$$P = \left\{ \underline{p} = \text{col}(\underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N-1}) \mid \underline{u}_{k+j} \in U, j = 0, 1, \dots, N-1 \right\} \quad (2.9)$$

trong đó  $U$  là tập giá trị điều kiện ràng buộc về tín hiệu điều khiển của bài toán. Chẳng hạn như ở bài toán điều khiển hệ lái tự động tàu thủy với điều kiện ràng buộc (2.1) của tín hiệu điều khiển  $\underline{\tau}$  thì khi gán  $\underline{u}_k = \underline{\tau}$ , tập ràng buộc  $U$  sẽ là:

$$U = \left\{ \underline{u}_k \in \mathbb{R}^n \mid a \leq \underline{u}_k \leq b \right\}. \quad (2.10)$$

Phương pháp tìm nghiệm tối ưu  $\underline{p}^*$  cho bài toán (2.8) có ràng buộc (2.9) bao gồm các phương pháp truyền thống đã được giới thiệu ở tài liệu [5], [11], [51], hoặc các phương pháp tối ưu tiến hóa cho ở [38], [43], [74].

Sau khi đã có nghiệm  $\underline{p}^*$  tối ưu thì tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  cho hệ (2.2) ở thời điểm  $k$  hiện tại sẽ là:

$$\underline{u}_k = \left( I_2, \mathbf{0}_{2 \times 2(N-1)} \right) \underline{p}^* \quad (2.11)$$

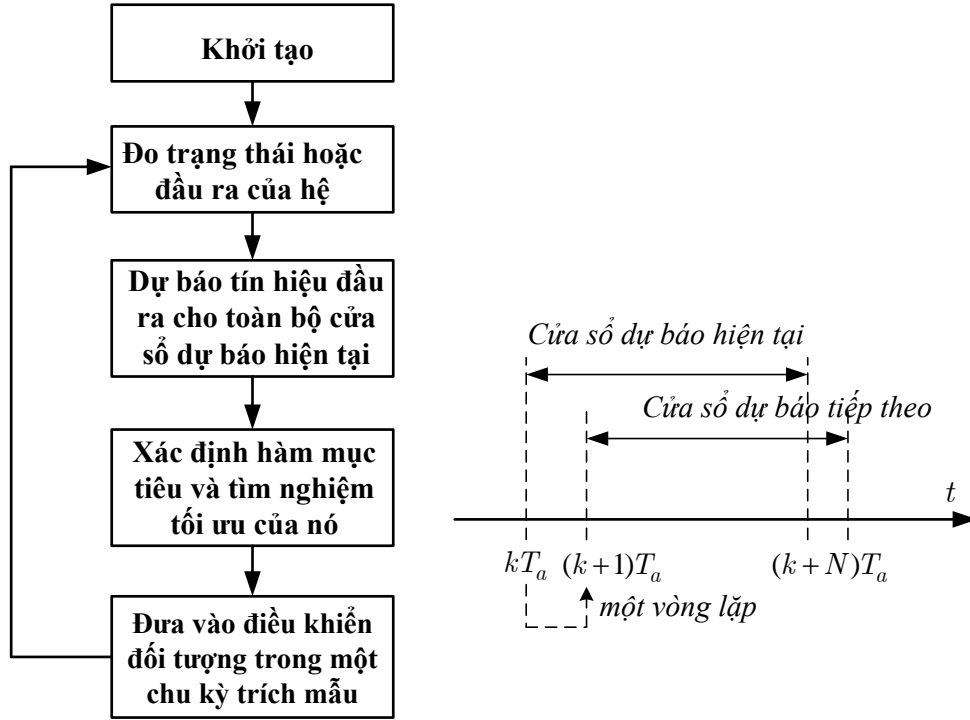
#### 2.1.1.4 Nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian

Tất cả các công thức tính bao gồm: dự báo đầu ra (2.5), hàm mục tiêu (2.7) và tối ưu hóa (2.8) của bộ điều khiển dự báo đều dựa vào giá trị trạng thái  $\underline{x}_k$  đo được từ hệ thống ở thời điểm  $k$  hiện tại và cho ra kết quả là tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  cũng ở thời điểm đó. Bởi vậy, sau khi đã đưa  $\underline{u}_k$  vào điều khiển đối tượng, để xác định được  $\underline{u}_{k+1}$  cho thời điểm kế tiếp là  $k+1$ , tất cả các bước tính trên, về nguyên tắc, phải được lặp lại. Nguyên tắc tính lặp này được gọi là điều khiển trượt dọc trên trục thời gian RHC (Receding Horizon Control).

Tất nhiên, tùy thuộc vào độ đơn giản hay phức tạp của mô hình toán mô tả đối tượng (2.2) mà một vài công thức tính trong số các công thức (2.5), (2.7), (2.8) có thể được dùng chung cho tất cả các vòng lặp. Chẳng hạn như ở hệ tuyến tính tham số hằng LTI (Linear Time Invariant) thì hai công thức dự báo (2.5) và hàm mục tiêu (2.7) đều dùng chung cho tất cả các vòng lặp, chỉ riêng việc tối ưu hóa (2.8), do còn phụ thuộc giá trị trạng thái đo được  $\underline{x}_k$ , phải được lặp lại. Hoặc như ở hệ song tuyến, công thức hàm mục tiêu (2.7) là có thể dùng chung được, còn công thức dự báo (2.5) và tối ưu hóa (2.8) sẽ được lặp lại trong các vòng lặp.

Hình 2.2 dưới đây chi tiết hóa nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển dự báo, vốn đã được thể hiện khái quát ở Hình 2.1b. Các bộ điều khiển

với tính năng trượt dọc trên trục thời gian như vậy có tên gọi chung là RHC.



Hình 2.2 Nguyên lý trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển dự báo.

### 2.1.2 Điều khiển dự báo hệ tuyến tính phản hồi trạng thái

Phương pháp này sử dụng mô hình trạng thái (2.12) của hệ LTI như sau:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C\underline{x}_k \end{cases} \quad \text{với } A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}, C \in \mathbb{R}^{r \times n}. \quad (2.12)$$

Để tăng chất lượng bám người ta thường bổ sung thêm vào bộ điều khiển một thành phần tích phân. Điều này được thực hiện bằng cách xây dựng mô hình dự báo từ mô hình tương đương với (2.12), nhưng bây giờ được viết lại để xuất hiện thành phần tích phân bằng cách chuyển nó thành mô hình có tín hiệu đầu vào là

$$\Delta \underline{u}_k = \underline{u}_k - \underline{u}_{k-1}, \quad \begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_{k-1} + B\Delta \underline{u}_k \\ \underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} + \Delta \underline{u}_k \end{cases},$$

$$\underline{y}_k = C\underline{x}_k = C\underline{x}_k + \mathbf{0}u_{k-1}$$

$$\text{hay } \underline{z}_{k+1} = \begin{pmatrix} \underline{x}_{k+1} \\ \underline{u}_k \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} A & B \\ \mathbf{0} & I \end{pmatrix}}_{\hat{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix}}_{\underline{z}_k} + \underbrace{\begin{pmatrix} B \\ I \end{pmatrix}}_{\hat{B}} \Delta \underline{u}_k = \hat{A}\underline{z}_k + \hat{B}\Delta \underline{u}_k \quad (2.13)$$

$$\text{và } \underline{y}_k = \underbrace{(C, \mathbf{0})}_{\widehat{C}} \underline{z}_k = \widehat{C} \underline{z}_k. \quad (2.14)$$

Sử dụng mô hình (2.13), (2.14) ta được đầu ra dự báo  $\underline{y}_{k+i}$ ,  $i=1,2, \dots, N$  xác định truy hồi từ  $\underline{z}_k$  như sau:

$\underline{y}_{k+i} = \widehat{C}\widehat{A}^i \underline{z}_k + \widehat{C}\widehat{A}^{i-1}\widehat{B}\Delta \underline{u}_k + \widehat{C}\widehat{A}^{i-2}\widehat{B}\Delta \underline{u}_{k+1} + \dots + \widehat{C}\widehat{B}\Delta \underline{u}_{k+i-1}$  bởi vậy, nếu viết chung lại theo cấu trúc véc-tơ dự báo đầu ra (2.5), sẽ được:

$$\underline{y}_k = \begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \underline{y}_{k+2} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \widehat{C}\widehat{B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \widehat{C}\widehat{A}\widehat{B} & \widehat{C}\widehat{B} & \dots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{C}\widehat{A}^{N-1}\widehat{B} & \widehat{C}\widehat{A}^{N-2}\widehat{B} & \dots & \widehat{C}\widehat{B} \end{pmatrix}}_H \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta \underline{u}_k \\ \Delta \underline{u}_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta \underline{u}_{k+N-1} \end{pmatrix}}_p + \underbrace{\begin{pmatrix} \widehat{C}\widehat{A} \\ \widehat{C}\widehat{A}^2 \\ \vdots \\ \widehat{C}\widehat{A}^N \end{pmatrix}}_{\underline{b}_k} \underline{z}_k \quad (2.15)$$

trong đó véc-tơ  $\underline{b}_k$  là xác định được từ những giá trị vào ra của hệ trong quá khứ (không phụ thuộc vào các tín hiệu điều khiển tương lai  $p$ ).

Cùng với véc-tơ đầu ra dự báo, hàm mục tiêu (2.7) trở thành:

$$J_k(p) = p^T (H^T Q_k H + R_k) p + 2(\underline{b}_k - \underline{w}_k)^T Q_k H p + (\underline{b}_k - \underline{w}_k)^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{w}_k) \quad (2.16)$$

Do đó, trong trường hợp bài toán điều khiển không có điều kiện ràng buộc, nghiệm tối ưu (2.8) của nó sẽ là:

$$\underline{p}^* = \arg \min J_k(p) = -\left(H^T Q_k H + R_k\right)^{-1} H^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{w}_k).$$

Suy ra tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  ở thời điểm  $k$  hiện tại là:

$$u_k = u_{k-1} - (\mathbf{I}, 0, \dots, 0) \left(H^T Q_k H + R_k\right)^{-1} H^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{w}_k). \quad (2.17)$$

### 2.1.3 Giải pháp điều khiển dự báo hệ song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian

Nguyên lý điều khiển dự báo hệ tuyến tính đã trình bày ở trên cũng áp dụng được cho các hệ phi tuyến nói chung. Tuy nhiên, vấn đề chính là làm thế nào để có được công thức xác định đầu ra dự báo một cách đơn giản hơn là trực tiếp thực hiện

việc xác định các hàm hợp phi tuyến cho ở (2.3), tức là phải tìm được các hàm  $h_i(\cdot)$  trong (2.18):

$$\begin{aligned} \underline{y}_{k+i} &= \underline{g}(\underline{x}_{k+i}) = \underline{g}(f(\underline{x}_{k+i-1}, \underline{u}_{k+i-1})) = \underline{g}(f(f(\underline{x}_{k+i-2}, \underline{u}_{k+i-2}), \underline{u}_{k+i-1})) \\ &= \dots \triangleq h_i(\underline{x}_k, \underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+i-1}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

từ mô hình phi tuyến của hệ cho tất cả các chỉ số  $i=1, 2, \dots, N$ . Một giải pháp cho vấn đề này đã được trình bày trong [1], [5] sẽ được luận án áp dụng, với tên gọi là dự báo đầu ra thông qua tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian.

Sau đây, luận án sẽ chỉ giới hạn việc trình bày tư tưởng của giải pháp cho hệ song tuyến, là lớp hệ có cấu trúc phi tuyến đơn giản, giống như mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang.

Hệ song tuyến là hệ phi tuyến có cấu trúc gần với tuyến tính nhất. Mô hình trạng thái của hệ song tuyến có dạng chung là:

Mô hình dạng liên tục:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B(\underline{x})\underline{u} \\ \underline{y} = C(\underline{x})\underline{x} \end{cases} \quad (2.19)$$

với các ma trận  $A(\underline{x}), B(\underline{x}), C(\underline{x})$  đều phụ thuộc trạng thái  $\underline{x}$ .

hoặc dạng rời rạc:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k \end{cases} \quad (2.20)$$

trong đó, khác với hệ tuyến tính (2.12), các ma trận hệ thống  $A(\underline{x}_k), B(\underline{x}_k), C(\underline{x}_k)$  lúc này đều phụ thuộc trạng thái.

Thuật toán điều khiển dự báo cho hệ song tuyến (2.20) trên cơ sở dự báo tín hiệu ra nhờ mô hình tuyến tính hóa từng đoạn trên trục thời gian đã được trình bày tại [1], [5]. Tiếp theo, luận án sẽ mở rộng thuật toán đó thêm một chút cho lớp hệ song tuyến có cả các ma trận hệ thống không những phụ thuộc trạng thái  $\underline{x}_k$ , mà còn phụ thuộc cả tín hiệu đầu vào trong quá khứ  $\underline{u}_{k-1}$  như sau:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})\underline{x}_k + B(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})\underline{x}_k. \end{cases} \quad (2.21)$$



Từ mô hình song tuyến mở rộng (2.21) này, và khi đặt các biến mới.

$$\begin{aligned} \underline{z}_k &= \begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix}, \quad \widehat{A}(\underline{z}_k) = \begin{pmatrix} A(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) & B(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) \\ \mathbf{0} & I \end{pmatrix}, \quad \widehat{B}(\underline{z}_k) = \begin{pmatrix} B(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) \\ I \end{pmatrix} \\ \widehat{C}(\underline{z}_k) &= (C(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}), \mathbf{0}), \quad \Delta \underline{u}_k = \underline{u}_k - \underline{u}_{k-1} \end{aligned} \quad (2.22)$$

nó sẽ chuyển được thành hệ song tuyến có chứa thành phần tích phân (2.23).

$$\begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \widehat{A}(\underline{z}_k) \underline{z}_k + \widehat{B}(\underline{z}_k) \Delta \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = \widehat{C}(\underline{z}_k) \underline{z}_k. \end{cases} \quad (2.23)$$

Với mô hình (2.23) có chứa thành phần tích phân nêu trên, trước tiên, nghiên cứu sinh sẽ tìm cách xác định các đầu ra dự báo  $\underline{y}_{k+i}$ ,  $i=1, 2, \dots, N$  cho hệ mà tránh phải sử dụng tới phép tính hàm hợp cho ở công thức (2.18), tức là không sử dụng tới:

$$\begin{aligned} \underline{y}_{k+i} &= \widehat{C}(\underline{z}_{k+i}) \underline{z}_{k+i} \\ &= \widehat{C} \left( \widehat{A}(\underline{z}_{k+i-1}) \underline{z}_{k+i-1} + \widehat{B}(\underline{z}_{k+i-1}) \Delta \underline{u}_{k+i-1} \right) \widehat{A} \left( \widehat{A}(\underline{z}_{k+i-1}) \underline{z}_{k+i-1} + \widehat{B}(\underline{z}_{k+i-1}) \Delta \underline{u}_{k+i-1} \right) \\ &= \dots \triangleq \underline{h}_i(\underline{x}_k, \Delta \underline{u}_k, \Delta \underline{u}_{k+1}, \dots, \Delta \underline{u}_{k+i-1}) \end{aligned}$$

Để làm được điều này, theo [1], [5] thì do ở thời điểm  $k$  hiện tại, véc-tơ trạng thái  $\underline{z}_k$  là đã biết, nên mô hình song tuyến (2.23), trong khoảng thời gian rất nhỏ  $kT_a \leq t < (k+1)T_a + \delta$  với  $T_a$  là chu kỳ trích mẫu và  $\delta$  là khoảng thời gian thực hiện một vòng lặp, sẽ xấp xỉ được bởi mô hình tuyến tính tham số hằng LTI, ký hiệu mô hình đó là  $\mathcal{H}_k$ :

$$\mathcal{H}_k : \begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \bar{A}_k \underline{z}_k + \bar{B}_k \Delta \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = \bar{C}_k \underline{z}_k \end{cases} \quad \text{với } \bar{A}_k = \widehat{A}(\underline{z}_k), \bar{B}_k = \widehat{B}(\underline{z}_k), \bar{C}_k = \widehat{C}(\underline{z}_k) \quad (2.24)$$

Tuy rằng mô hình xấp xỉ LTI  $\mathcal{H}_k$  trong (2.24) này chỉ có nghĩa trong khoảng thời gian rất nhỏ, song nó sẽ được sử dụng để dự báo tín hiệu đầu ra trong toàn bộ cửa sổ dự báo của một chu kỳ. Điều này dẫn đến kết quả dự báo sẽ có sai lệch tăng dần theo thời gian, khoảng dự báo càng lớn, sai lệch càng cao. Hệ quả của nó là sai lệch dãy giá trị tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_{k+i}$ ,  $i=0, 1, \dots, N-1$  thu được so với dãy giá trị tối ưu phải có cũng tăng dần theo chỉ số  $i$ . Mặc dù vậy, ảnh hưởng của sai lệch đó tới chất lượng điều khiển sẽ không nhiều, vì trong số dãy giá trị tín hiệu điều

khởi dự báo thu được  $\underline{u}_{k+i}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$  sẽ chỉ có giá trị đầu tiên  $\underline{u}_k$  ứng với  $i = 0$  mới thực sự được sử dụng vào việc điều khiển đối tượng.

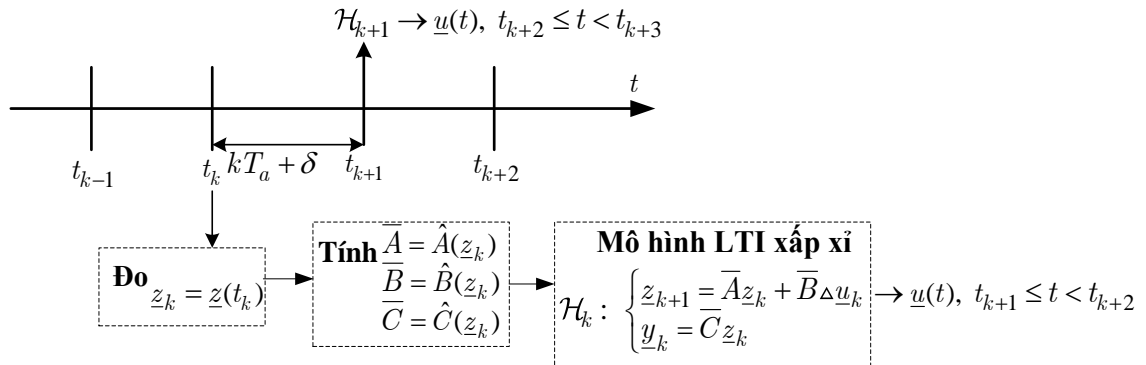
Quay lại việc thiết kế bộ điều khiển dự báo cho hệ (2.24). Do đây là hệ LTI với mô hình đối tượng giống như (2.13), (2.14) nên kết quả ở đó cũng áp dụng được cho hệ (2.24) này. Nói cách khác, giá trị tín hiệu điều khiển dự báo cho hệ song tuyến (2.21) cũng sẽ là:

$$\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} - (I, 0, \dots, 0) \left( H_k^T Q_k H_k + R_k \right)^{-1} H_k^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{w}_k) \quad (2.25)$$

trong đó:

$$H_k = \begin{pmatrix} \bar{C}_k \bar{B}_k & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \bar{C}_k \bar{A}_k \bar{B}_k & \bar{C}_k \bar{B}_k & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}_k \bar{A}_k^{N-1} \bar{B}_k & \bar{C}_k \bar{A}_k^{N-2} \bar{B}_k & \dots & \bar{C}_k \bar{B}_k \end{pmatrix}, \quad \underline{b}_k = \begin{pmatrix} \bar{C}_k \bar{A}_k \\ \bar{C}_k \bar{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C}_k \bar{A}_k^N \end{pmatrix} \underline{z}_k. \quad (2.26)$$

mô hình tuyến tính hóa từng đoạn dọc trục thời gian được thể hiện như Hình 2.3



Hình 2.3 Tuyến tính hóa từng đoạn mô hình song tuyến dọc trục thời gian.

Điểm khác biệt duy nhất ở đây giữa bộ điều khiển (2.25) cho hệ song tuyến (2.21) và bộ điều khiển (2.17) cho hệ tuyến tính (2.12) là các ma trận  $\bar{A}_k, \bar{B}_k, \bar{C}_k$  cho hệ song tuyến, tính theo (2.22), (2.24), sẽ phải xác định lại theo từng vòng lặp, tức là ma trận  $H_k$  cho ở công thức (2.26) là thay đổi theo  $k$ , chứ không còn là hằng số với mọi  $k$  như  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$  và  $H$  ở hệ LTI (2.12).

## 2.1.4 Một số giải pháp nâng cao chất lượng bộ điều khiển dự báo

### 2.1.4.1 Nâng cao tốc độ hội tụ của sai lệch bám nhờ hiệu chỉnh tín hiệu đặt theo nguyên lý học lặp (Iterative Learning)

Trong phương pháp điều khiển thông minh dựa trên nguyên tắc học lặp (Iterative Learning Control - ILC), tín hiệu điều khiển ở lần thử thứ  $k$ , ký hiệu là  $u_k(t)$  thường được hiệu chỉnh từ chính bản thân nó  $u_{k-1}(t)$  và sai lệch bám  $e_{k-1}(t) = y_{k-1}(t) - w_{k-1}(t)$  ở lần thử thứ  $k-1$  trước đó, như sau [9], [12]:

$$u_k(t) = u_{k-1}(t) - Ke_{k-1}(t) \quad (2.27)$$

có  $K$  là hằng số dương được chọn thích hợp tùy theo từng hệ, chẳng hạn như ở hệ tuyến tính (2.12) thì nó được chọn thỏa mãn [43]:

$$\|I - CBK\| < 1. \quad (2.28)$$

Tư tưởng hiệu chỉnh tín hiệu điều khiển theo nguyên tắc học lặp này đã được tài liệu [5] áp dụng cho việc nâng cao tốc độ bám của bộ điều khiển dự báo hệ tuyến tính (2.12) nói riêng và song tuyến (2.20) nói chung. Định hướng áp dụng này của [5] được dựa trên hai nhận xét sau:

Thứ nhất là do ở điều khiển dự báo không có các vòng thử (trials), nên việc hiệu chỉnh này sẽ được thực hiện sau từng vòng lặp của điều khiển dự báo (thay cho các vòng thử của ILC - trial).

Thứ hai là do ở điều khiển học lặp, công thức hiệu chỉnh (2.27) thay đổi trực tiếp tín hiệu điều khiển nên điều này sẽ làm mất đi bản chất dự báo của bộ điều khiển dự báo. Bởi vậy, ở đây nó sẽ được hiệu chỉnh gián tiếp thông qua tín hiệu đặt  $\underline{w}(t)$ .

Trên cơ sở hai nhận xét đó, tài liệu [5] đã đưa ra công thức hiệu chỉnh tín hiệu đặt mới là  $\underline{r}_k$  dựa trên sai lệch  $\underline{e}_{k-1} = \underline{y}'_{k-1} - \underline{w}_{k-1}$  ở vòng lặp trước đó, thay cho tín hiệu đặt gốc ban đầu là  $\underline{w}_k$ , như sau:

$$\underline{r}_k = \underline{w}_k - Ke_{k-1} \quad \text{có } 0 < K < 1 \text{ là hằng số tùy chọn.} \quad (2.29)$$

Ở công thức hiệu chỉnh trên, sai lệch  $\underline{e}_{k-1}$  sẽ được cập nhật sửa đổi ở mỗi đầu vòng lặp tiếp theo nhờ công thức:

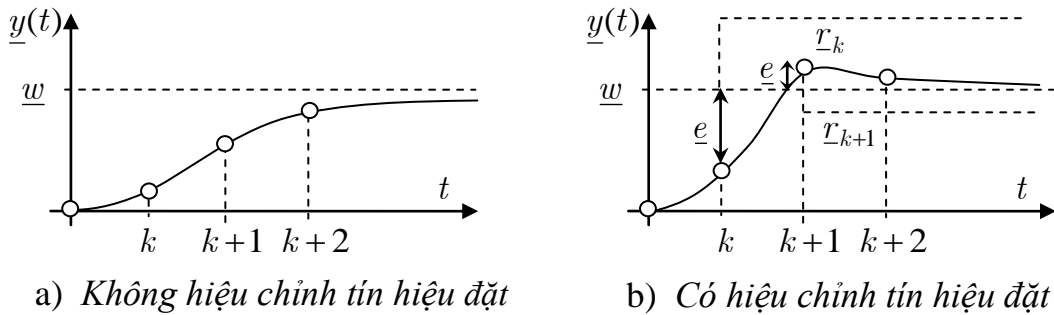
$$e_{k-1} = \underline{y}'_{k-1} - \underline{w}_{k-1} \quad (2.30)$$

với  $\underline{y}'_{k-1}$  là đầu ra đo được của hệ tại vòng lặp trước. Nghiên cứu sinh ký hiệu nó bởi  $\underline{y}'_{k-1}$  là để phân biệt với đầu ra dự báo  $\underline{y}_{k+i}$  vốn được suy ra từ mô hình. Ở vòng lặp đầu tiên, nó được gán là  $e_0 = 0$ , tức là ở vòng lặp đầu tiên sẽ có  $\underline{r}_k = \underline{w}_k$ .

Với công thức hiệu chỉnh tín hiệu đặt (2.29), véc-tơ  $\underline{w}_k$  tính theo (2.6), được dùng trong các bộ điều khiển (2.17) và (2.25), bây giờ sẽ được thay bằng  $\underline{r}_k$  xác định như sau:

$$\underline{r}_k = \begin{pmatrix} \underline{w}_{k+1} - Ke_k \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} - Ke_k \end{pmatrix} \text{ với } e_k = \underline{y}'_k - \underline{w}_k. \quad (2.31)$$

Hình 2.4 minh họa nguyên tắc hiệu chỉnh tín hiệu đặt này cho trường hợp đơn giản là tín hiệu đặt ban đầu là hằng số ( $\underline{w}_k = \underline{w} = \text{constant}$ ).



Hình 2.4 Ý nghĩa hiệu chỉnh tín hiệu đặt cho bộ điều khiển dự báo [5].

#### 2.1.4.2 Loại nhiễu và chuyển phản hồi trạng thái thành phản hồi đầu ra nhờ bộ quan sát Kalman

Một vấn đề thường gặp trong ứng dụng thực tế là sự ảnh hưởng của nhiễu vào hệ thống. Nếu cần phải để ý tới cả sự ảnh hưởng của các loại nhiễu này trong quá trình thiết kế bộ điều khiển, thì mô hình gốc ban đầu của hệ song tuyến (2.21) có thêm nhiễu đo sẽ là:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})\underline{x}_k + B(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})\underline{u}_k + \underline{\zeta}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1})\underline{x}_k + \underline{\lambda}_k. \end{cases} \quad (2.32)$$

trong đó  $\underline{\zeta}_k, \underline{\lambda}_k$  lần lượt là nhiễu tác động tới trạng thái và nhiễu tác động ở đầu ra của hệ. Tương tự như đã làm ở trên khi chuyển đổi (2.21) thành (2.23), ở đây mô hình (2.32) cũng sẽ viết lại được thành:

$$\begin{cases} z_{k+1} = \widehat{A}(z_k)z_k + \widehat{B}(z_k)\Delta u_k + \underline{\zeta}_k \\ y_k = \widehat{C}(z_k)z_k + \underline{\lambda}_k. \end{cases} \quad (2.33)$$

với  $\underline{\zeta}_k = \text{col}(\underline{\zeta}_k, \underline{0})$ ,  $z_k = \text{col}(x_k, u_{k-1})$ ,  $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$  và  $\widehat{A}(z_k), \widehat{B}(z_k), \widehat{C}(z_k)$  được xác định từ  $A(x_k, u_{k-1})$ ,  $B(x_k, u_{k-1})$ ,  $C(x_k, u_{k-1})$  theo công thức (2.22).

Giả sử ở thời điểm  $k-1$  ta đã có giá trị trạng thái  $\widehat{z}_{k-1}$  không lẫn nhiễu thì nhiệm vụ lọc nhiễu là phải xác định tiếp  $\widehat{z}_k$  khi đã có đầu vào  $\Delta u_{k-1}$  và đầu ra  $y_k$ . Để thực hiện được nhiệm vụ đó, trước tiên ta xấp xỉ mô hình không có nhiễu từ (2.33) thành:

$$\begin{cases} z_k = \mathcal{A}_{k-1}z_{k-1} + \mathcal{B}_{k-1}\Delta u_{k-1} \\ y_k = \mathcal{C}_{k-1}z_k \end{cases} \quad \text{với } \mathcal{A}_{k-1} = \widehat{A}(\widehat{z}_{k-1}), \mathcal{B}_{k-1} = \widehat{B}(\widehat{z}_{k-1}), \mathcal{C}_{k-1} = \widehat{C}(\widehat{z}_{k-1}) \quad (2.34)$$

sau đó, tìm  $\widehat{z}_k$ ,  $k=1, 2, \dots$  nhờ bộ lọc Kalman như sau [4], [5], [31]:

$$\begin{cases} P_k = \mathcal{A}_{k-1}K_{k-1}\mathcal{A}_{k-1}^T + N_X \\ L_k = P_k\mathcal{C}_{k-1}^T \left( \mathcal{C}_{k-1}P_k\mathcal{C}_{k-1}^T + V \right)^{-1} \\ K_k = (I - L_k\mathcal{C}_{k-1})P_k \\ z'_k = \mathcal{A}_{k-1}\widehat{z}_{k-1} + \mathcal{B}_{k-1}\Delta u_{k-1} \\ \widehat{z}_k = z'_k + L_k \left( y_k - \mathcal{C}_{k-1}z'_k \right) \end{cases} \quad (2.35)$$

trong đó  $N_X, V$  lần lượt là các ma trận tương quan của  $\underline{\zeta}_k$  và  $\underline{\lambda}_k$ , còn  $K_0$  tùy chọn.

Sau khi đã có  $\widehat{z}_k$  thay vì  $z_k$ , và nếu như bài toán là không bị ràng buộc, bộ điều khiển phản hồi trạng thái (2.25) lúc này sẽ trở thành bộ điều khiển phản hồi đầu ra:

$$\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} - (I, 0, \dots, 0) \left( \mathcal{H}_k^T Q_k \mathcal{H}_k + R_k \right)^{-1} \mathcal{H}_k^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{r}_k) \quad (2.36)$$

với  $\underline{r}_k$  được xác định theo (2.31) và

$$\mathcal{H}_k = \begin{pmatrix} C_k \mathcal{B}_k & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ C_k \mathcal{A}_k \mathcal{B}_k & C_k \mathcal{B}_k & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_k \mathcal{A}_k^{N-1} \mathcal{B}_k & C_k \mathcal{A}_k^{N-2} \mathcal{B}_k & \cdots & C_k \mathcal{B}_k \end{pmatrix}, \quad \underline{b}_k = \begin{pmatrix} C_k \mathcal{A}_k \\ C_k \mathcal{A}_k^2 \\ \vdots \\ C_k \mathcal{A}_k^N \end{pmatrix} \underline{z}_k \quad (2.37)$$

$$\mathcal{A}_k = \widehat{A}(\underline{z}_k), \quad \mathcal{B}_k = \widehat{B}(\underline{z}_k), \quad C_k = \widehat{C}(\underline{z}_k).$$

## 2.2 Các phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc

Trong bộ điều khiển dự báo có thành phần tối ưu hóa Hình 2.1a với nhiệm vụ tìm nghiệm  $\underline{p}^*$  của bài toán tối ưu (2.8) thỏa mãn ràng buộc  $P$ . Nó được thực hiện trong từng vòng lặp. Một cách tổng quát thì bài toán này có dạng chung cho tất cả các vòng lặp là:

$$\underline{p}^* = \arg \min_{\underline{p} \in P} J(\underline{p}) \quad \text{với } P = \left\{ \underline{p} \in \mathbb{R}^n \mid \varphi_i(\underline{p}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \right\} \quad (2.38)$$

trong đó  $\varphi_i(\underline{p})$  – các hàm mô tả điều kiện ràng buộc.

### 2.2.1 Những phương pháp tối ưu hóa có ràng buộc thường sử dụng

Để giải quyết các bài toán tối ưu hóa có ràng buộc thông thường sử dụng hai phương pháp chính là phương pháp tối ưu truyền thống và phương pháp tối ưu tiến hóa.

#### 2.2.1.1 Phương pháp tối ưu hóa truyền thống

Những phương pháp truyền thống đều là phương pháp line search, nội dung chi tiết của phương pháp này đã được trình bày trong các tài liệu [5], [11]. Hai phương pháp line search cơ bản trong số chúng là SQP (sequential quadratic optimization) và phương pháp điểm trong (interior point). Đặc điểm của các phương pháp line search nói chung và hai phương pháp SQP, phương pháp điểm trong nói riêng là lần lượt tìm dãy các điểm  $\underline{p}_k \in P$ ,  $k = 0, 1, \dots$  sao cho chúng hội tụ tới nghiệm  $\underline{p}^*$ . Hiện nay, thuật toán SQP và ‘điểm trong’ đã được cài đặt thành lệnh

**fmincon(·)** với **options** chuẩn trong MatLab là ‘**sqp**’ và **fmincon(·)** với **options** chuẩn trong MatLab là ‘**interior-point**’.

### 2.2.1.2 Phương pháp tối ưu tiến hóa

Các phương pháp tối ưu tiến hóa (evolutional optimization) cho bài toán tối ưu có ràng buộc (2.38) cũng được xây dựng trên cơ sở lặp từng bước, giống như line search, song quy luật tìm kiếm được sao chép từ phản ứng tự nhiên của sinh/động vật, thay vì xác định hướng tìm và khoảng cách bước tìm của toán học. Có rất nhiều phiên bản tối ưu tiến hóa khác nhau, nhưng có thể nói, chúng đều có gốc gác từ hai phương pháp chính là giải thuật di truyền (Genetic Algorithm - GA) và tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO). Nội dung chi tiết của phương pháp này đã được trình bày trong các tài liệu [12], [37], [42]. Hiện nay, thuật toán ‘GA’ và ‘PSO’ đã được cài đặt chuẩn thành lệnh **ga(·)** và **particleswarm(·)** trong MatLab.

### 2.2.2 Giải pháp điều khiển tối ưu hóa có ràng buộc với bộ điều khiển MPC

Các phương pháp giải quyết bài toán tối ưu hóa có ràng buộc đề cập ở trên mặc dù sử dụng rất thuận tiện khi các phương pháp đó đã được cụ thể hóa bằng lệnh trong Matlab. Tuy nhiên, đối với bộ điều khiển theo nguyên lý receding horizon như MPC thì mỗi vòng lặp của bộ điều khiển phải giải bài toán tối ưu một lần, điều này có thể dẫn tới thời gian tính toán lệnh tối ưu hóa có ràng buộc vượt quá khoảng thời gian cho phép thực hiện một vòng lặp tức là khoảng thời gian  $t_{k+1} - t_k$ . Bởi vậy, để đơn giản sau đây luận án sẽ sử dụng kỹ thuật ước lượng xấp xỉ đã được giới thiệu trong [2], [5] để giải quyết bài toán tối ưu có ràng buộc. Kỹ thuật này được xây dựng dựa trên nhận xét rằng tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  trong (2.25) thay đổi theo từng vòng lặp với  $k = 0, 1, 2, \dots$  và phụ thuộc vào việc chọn ma trận xác định dương  $R_k, Q_k$  như sau:

Nếu ma trận  $Q_k$  đối xứng xác định dương được chọn có chuẩn  $\|Q_k\|$  càng lớn, sai số bám sẽ càng nhỏ và gián tiếp kéo theo nghiệm tối ưu  $\underline{u}(t)$  có  $|\underline{u}(t)|$  càng lớn.

Ngược lại, khi ma trận  $R_k$  đối xứng xác định dương được chọn có chuẩn  $\|R_k\|$  càng lớn, nghiệm tối ưu  $\underline{u}(t)$  tìm được sẽ có  $|\underline{u}(t)|$  càng nhỏ, gián tiếp kéo theo sai lệch bám càng lớn và hệ hội tụ càng chậm.

Do đó trong trường hợp tín hiệu điều khiển  $\underline{u}(t)$  bị ràng buộc, chẳng hạn như:

$$a \leq \|\underline{u}(t)\| \leq b \quad (2.39)$$

thì có thể hiệu chỉnh giá trị  $R_k, Q_k$  thích hợp theo từng vòng lặp để điều kiện (2.39) được thỏa mãn. Giải pháp này sẽ được luận án áp dụng để giải quyết điều kiện ràng buộc tín hiệu điều khiển như luận án đã đặt ra.

### 2.3 Thiết kế bộ điều khiển MPC điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt, có ràng buộc tín hiệu điều khiển khi mô hình tàu xác định

Như đã đề cập trong chương 1 của luận án, mô hình xác định của tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành là mô hình có cấu trúc xác định, các tham số trong mô hình là xác định và mô hình coi như không có nhiễu tác động. Mục tiêu và nhiệm vụ của luận án là từ mô hình xác định, thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám theo quỹ đạo đặt và có ràng buộc tín hiệu điều khiển.

Mô hình động lực học tàu thủy ba bậc tự do, thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang dạng mô hình xác định (không chứa thành phần bất định) theo [21] có cấu trúc như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu}, \underline{\eta} \in \mathbb{R}^3, \underline{\nu} \in \mathbb{R}^3 \\ M\dot{\underline{\nu}} + [C(\underline{\nu}) + D(\underline{\nu})]\underline{\nu} + \underline{g}(\underline{\eta}) = F\underline{\tau}, \underline{\tau} \in \mathbb{R}^2, F \in \mathbb{R}^{3 \times 2} \end{cases} \quad (2.40)$$

trong đó  $F$  là ma trận có số cột ít hơn số hàng (đặc điểm của hệ thiếu cơ cấu chấp hành). Nhiệm vụ điều khiển là xây dựng được bộ điều khiển để đầu ra  $\underline{\eta}$  của hệ bám theo được quỹ đạo mẫu  $\underline{\eta}_d(t) = \underline{w}(t)$  cho trước, đồng thời thỏa mãn các điều kiện ràng buộc  $a \leq \underline{\tau} \leq b$ . Đối với độ lớn góc bẻ lái trên tàu thủy được qui định,  $-\beta_{gh} \leq \beta \leq \beta_{gh}$ , với  $\beta$  là góc bẻ lái,  $\beta_{gh}$  là giới hạn góc bẻ lái. Điều kiện ràng buộc này tương đương với ràng buộc về mô-men giới hạn quay trở  $\tau_r$  như sau:

$$-\tau_{r.gh} \leq \tau_r \leq \tau_{r.gh} \quad (2.41)$$



trong đó  $\tau_{r,gh}$  – giá trị giới hạn đặt mô-men của bánh lái (giá trị này tỷ lệ với độ lớn của góc bẻ lái và coi như tương đương với ràng buộc về độ lớn góc bẻ lái).

Để giải quyết nhiệm vụ đặt ra, luận án sẽ sử dụng nguyên lý điều khiển dự báo MPC trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian và giải pháp tối ưu hóa có ràng buộc để thiết kế bộ điều khiển. Trong giới hạn phạm vi nghiên cứu của luận án, tín hiệu điều khiển được thiết kế là lực (lực đẩy chân vịt) và mô-men (mô-men của bánh lái), chúng được ký hiệu là  $\underline{\tau}$  trong mô hình (2.40) và không quan tâm tới mô hình toán của cơ cấu thực hiện, như các công trình đã nghiên cứu về điều khiển tàu nổi có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành, không xét đến mô hình của cơ cấu chấp hành.

### 2.3.1 Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái điều khiển tàu chuyển động bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu xác định

Ta thấy ngay rằng ở mô hình tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang (2.40), trong trường hợp có thể xấp xỉ được:

$$\underline{g}(\underline{\eta}) = G(\underline{\eta})\underline{\eta} \quad (2.42)$$

với  $G(\underline{\eta}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là một ma trận phụ thuộc  $\underline{\eta}$ , thì nó sẽ là một hệ song tuyến. Vì vậy để đồng bộ với phần lý thuyết đã được trình bày ở trên, sau đây luận án sẽ viết lại mô hình toán tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang (2.40) về dạng song tuyến chính tắc đã cho ở công thức (2.19) và (2.21) như sau:

Từ (2.40) và (2.42) có được:

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{\eta}} \\ \dot{\underline{\nu}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{\eta}) \\ -G(\underline{\eta}) & -M^{-1}[C(\underline{\nu}) + D(\underline{\nu})] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\eta} \\ \underline{\nu} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix} \underline{\tau} \quad (2.43)$$

trong đó  $\mathbf{0}_{3 \times 3}$  là ma trận không kiểu  $3 \times 3$  (3 hàng 3 cột). Do đó, khi đặt các biến mới  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$ ,  $\underline{x}_2 = \underline{\nu}$ ,  $\underline{u} = \underline{\tau}$  và  $\underline{x} = \text{col}(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$ , cũng như ký hiệu:

$$A(\underline{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{x}_1) \\ -G(\underline{x}_1) & -M^{-1}[C(\underline{x}_2) + D(\underline{x}_2)] \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix}, \quad C = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3}) \quad (2.44)$$

với  $A(\underline{x})$ ,  $B(\underline{x})$  là các ma trận có kiểu lần lượt là  $6 \times 6$  và  $6 \times 2$ , sẽ được:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B\underline{u} \\ \underline{y} = \underline{\eta} = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3})\underline{x} = C\underline{x} \end{cases} \quad (2.45)$$

trong đó  $I_3$  là ký hiệu của ma trận đơn vị kiểu  $3 \times 3$ . Như vậy, (2.45) là một hệ song tuyến và khi so sánh với hệ song tuyến nói chung, mô tả ở công thức tổng quát (2.19), thì nó sẽ còn gần với hệ tuyến tính hơn ở chỗ là cả hai ma trận  $B, C$  của mô hình (2.45) đều là hằng số. Do đó, phương pháp điều khiển dự báo cho hệ song tuyến đã trình bày ở mục 2.1.3 là hoàn toàn áp dụng được để tính hiệu đầu ra  $\underline{y} = \underline{\eta}$  của mô hình tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang dạng song tuyến (2.45) bám tiệm cận theo được quỹ đạo mẫu  $\underline{w}(t)$  cho trước.

Để thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái cho mô hình (2.45) thì các biến trạng thái  $\underline{x} = \text{col}(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$ , trong đó  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$ ,  $\underline{x}_2 = \underline{v}$  giả thiết phải đo đạc hoặc xác định được trực tiếp.

### 2.3.1.1 Mô hình dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc trục thời gian

Do việc thiết kế bộ điều khiển dự báo cần tới mô hình không liên tục (mô hình rời rạc theo thời gian) nên ta sẽ rời rạc mô hình tàu thủy ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang dạng liên tục (2.45) với một chu kỳ trích mẫu  $T_a$  chọn trước.

Sử dụng công thức xấp xỉ:  $\dot{\underline{x}}(t) \approx [x((k+1)T_a) - x(kT_a)]/T_a$  và cho phép tính đạo hàm, thì mô hình liên tục (2.45) sẽ chuyển được về dạng rời rạc (2.46):

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = [I_6 + T_a A(\underline{x}_k)]\underline{x}_k + T_a B \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C \underline{x}_k \end{cases} \quad (2.46)$$

trong đó:  $\underline{x}_k = \underline{x}(kT_a)$ ,  $\underline{u}_k = \underline{u}(kT_a)$ ,  $\underline{y}_k = \underline{y}(kT_a)$ ,  $I_6$  là ma trận đơn vị kiểu  $6 \times 6$ .

Tiếp theo, ta xét tại thời điểm  $k$  hiện tại. Nếu như tại đó véc-tơ trạng thái  $\underline{x}_k$  là đã biết, có thể là do đo được trực tiếp từ hệ thống, hoặc do quan sát được từ những dữ liệu vào/ra đo được  $\underline{u}_{k-1}$ ,  $\underline{y}_k$ , thì trong một khoảng thời gian đủ nhỏ, mô hình song tuyến (2.46) ở trên sẽ xấp xỉ được bởi mô hình tuyến tính tham số hằng  $\mathcal{H}_k$  như (2.47):

$$\mathcal{H}_k : \begin{cases} z_{k+1} = \bar{A}_k z_k + \bar{B} \Delta u_k \\ \underline{y}_k = \bar{C} z_k \end{cases} \quad (2.47)$$

trong đó:

$$z_k = \text{col}(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) \in \mathbb{R}^8, \Delta u_k = \underline{u}_k - \underline{u}_{k-1} \in \mathbb{R}^2 \quad (2.48)$$

và

$$\bar{A}_k = \begin{pmatrix} I_6 + T_a A(\underline{x}_k) & T_a B \\ \mathbf{0}_{2 \times 6} & I_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}, \bar{B} = \begin{pmatrix} T_a B \\ I_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{8 \times 2}, \bar{C} = (C, \mathbf{0}_{3 \times 2}) \in \mathbb{R}^{3 \times 8} \quad (2.49)$$

Từ mô hình xấp xỉ tuyến tính từng đoạn  $\mathcal{H}_k$  với  $k=0,1, \dots$  cho ở (2.47), ta cũng có được công thức dự báo xấp xỉ cho tín hiệu đầu ra  $\underline{y}_{k+i}$ ,  $i=1,2, \dots, N$  của hệ (2.46) thuộc cửa sổ dự báo hiện tại  $[k, N)$ , như sau:

$$\underline{y}_{k+i} = \bar{C} \bar{A}_k^i z_k + \bar{C} \bar{A}_k^{i-1} \bar{B} \Delta u_k + \bar{C} \bar{A}_k^{i-2} \bar{B} \Delta u_{k+1} + \dots + \bar{C} \bar{B} \Delta u_{k+i-1},$$

trong đó  $N \geq 2$  là độ rộng cửa sổ dự báo được chọn trước. Viết chung các đầu ra tương lai đó lại với nhau theo cấu trúc véc-tơ cho toàn bộ cửa sổ dự báo, sẽ có:

$$\begin{aligned} \underline{y}_k &= \begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \underline{y}_{k+2} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{C} \bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C} \bar{A}_k \bar{B} & \bar{C} \bar{B} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C} \bar{A}_k^{N-1} \bar{B} & \bar{C} \bar{A}_k^{N-2} \bar{B} & \cdots & \bar{C} \bar{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{C} \bar{A}_k \\ \bar{C} \bar{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C} \bar{A}_k^N \end{pmatrix} z_k \\ &= H_k \underline{p} + \underline{b}_k \end{aligned} \quad (2.50)$$

với:

$$H_k = \begin{pmatrix} \bar{C} \bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C} \bar{A}_k \bar{B} & \bar{C} \bar{B} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C} \bar{A}_k^{N-1} \bar{B} & \bar{C} \bar{A}_k^{N-2} \bar{B} & \cdots & \bar{C} \bar{B} \end{pmatrix}, \underline{p} = \begin{pmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N-1} \end{pmatrix}, \underline{b}_k = \begin{pmatrix} \bar{C} \bar{A}_k \\ \bar{C} \bar{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C} \bar{A}_k^N \end{pmatrix} z_k \quad (2.51)$$

trong đó  $\underline{p}$  là véc-tơ các tín hiệu đầu vào tương lai cần phải được xác định.

### 2.3.1.2 Xây dựng khối hàm mục tiêu của bộ điều khiển MPC

Sau khi đã có được các tín hiệu đầu ra tương lai  $\underline{y}_{k+i}$ ,  $i=1,2, \dots, N$  thuộc cửa sổ dự báo hiện tại dưới dạng các hàm số của tín hiệu đầu vào tương lai

$\Delta \underline{u}_{k+j}$ ,  $j = 0, 1, \dots, N-1$  cho ở công thức (2.50) thì để xác định được các đầu vào tương lai này sao cho đầu ra bám theo được dãy tín hiệu đặt  $\{\underline{w}_k\}$ . Ta cần một khối hàm mục tiêu thể hiện được mục đích bám tín hiệu đặt đó và một trong các hàm mục tiêu thể hiện được điều này là tổng bình phương các sai lệch bám thuộc của số dự báo hiện tại.

Tuy nhiên, nhằm nâng cao được tốc độ bám, ở đây luận án sẽ sử dụng kỹ thuật hiệu chỉnh tín hiệu đặt đã được nói tới ở mục 2.1.4.1 của chương 2, mà cụ thể là tín hiệu đặt sau hiệu chỉnh  $\underline{r}_k$  cho ở công thức (2.31) với:

$$\underline{r}_k = \begin{pmatrix} \underline{w}_{k+1} - K e_k \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} - K e_k \end{pmatrix} \text{ có } \underline{w}_k = \underline{w}(kT_a), \quad (2.52)$$

trong đó  $e_k = \underline{y}'_k - \underline{w}_k$  là sai lệch bám dư thừa ở thời điểm trước đó và  $0 < K < 1$  là tham số tùy chọn.

Hàm mục tiêu thể hiện được sai lệch bám nhỏ nhất giữa véc-tơ các tín hiệu đầu ra tương lai  $\underline{y}_k$  cho ở công thức (2.50) và véc-tơ các tín hiệu đặt sau hiệu chỉnh cho ở công thức (2.52) bây giờ sẽ là:

$$J_k(\underline{p}) = (\underline{y}_k - \underline{r}_k)^T Q_k (\underline{y}_k - \underline{r}_k) + \underline{p}^T R_k \underline{p} \xrightarrow{\underline{p}} \min. \quad (2.53)$$

trong đó  $Q_k \in \mathbb{R}^{3N \times 3N}$ ,  $R_k \in \mathbb{R}^{2N \times 2N}$  là hai ma trận đối xứng xác định dương tùy chọn.

Cuối cùng, nếu loại bỏ bớt những thành phần hằng số không phụ thuộc biến  $\underline{p}$  cần tìm trong hàm mục tiêu (2.53) ở trên, ta sẽ có hàm mục tiêu tương đương, nhưng với cấu trúc đơn giản hơn, như sau:

$$J'_k(\underline{p}) = \underline{p}^T (H_k^T Q_k H_k + R_k) \underline{p} + 2(\underline{b}_k - \underline{r}_k)^T Q_k H_k \underline{p} \xrightarrow{\underline{p}} \min. \quad (2.54)$$

### 2.3.1.3 Xây dựng khối tối ưu hóa của bộ điều khiển

Nhiệm vụ của khối tối ưu hóa, như đã trình bày là xác định nghiệm của bài toán tối ưu:

$$\underline{p}^* = \arg \min_{\underline{p} \in P} J'_k(\underline{p}) \quad (2.55)$$

có tập ràng buộc  $P$  được suy ra từ điều kiện ràng buộc (2.41) về qui định giới hạn độ lớn góc bề lái tàu thủy. Giải pháp để tìm nghiệm của bài toán tối ưu có ràng buộc sử dụng kỹ thuật ước lượng xấp xỉ điều kiện ràng buộc thông qua thay đổi tham số hàm mục tiêu, đã được trình bày tại mục 2.2.2 của chương 2.

Một cách cụ thể, nếu bài toán điều khiển không có ràng buộc, nghiệm  $\underline{p}^*$  của bài toán tối ưu (2.55) có hàm mục tiêu cho ở (2.54) sẽ là:

$$\underline{p}^* = \left( H_k^T Q_k H_k + R_k \right)^{-1} H_k^T Q_k (\underline{b}_k - \underline{r}_k). \quad (2.56)$$

Khi đã có  $\underline{p}^*$  ta cũng có được tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  cho hệ điều khiển chuyển động tàu thủy (2.40) ở thời điểm hiện tại  $k$ , suy ra từ công thức (2.48), như sau:

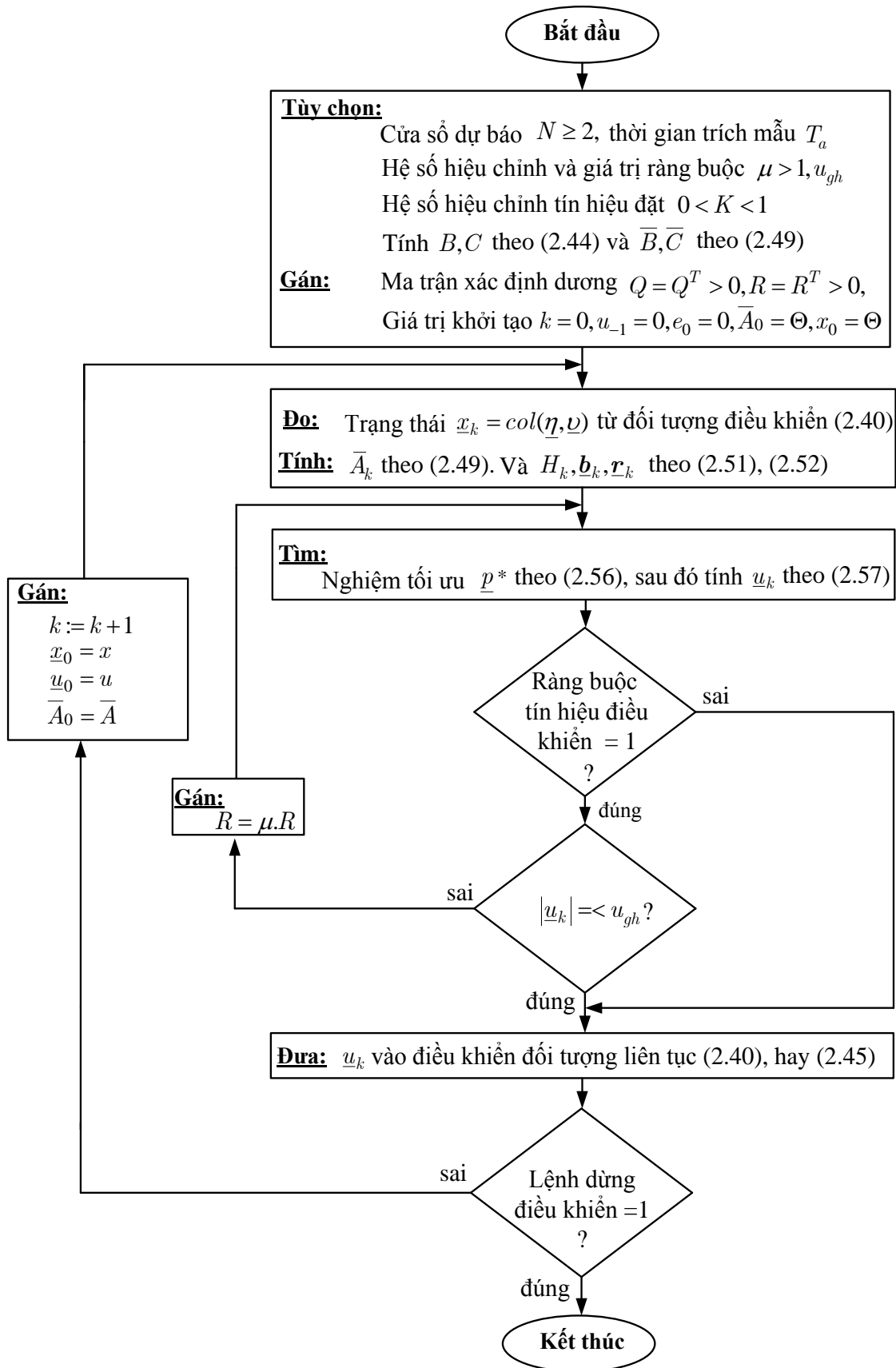
$$\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} - \left( I_2, \mathbf{0}_{2 \times 2(N-1)} \right) \underline{p}^* \quad (2.57)$$

và nó sẽ được đưa vào để điều khiển trong phạm vi một khoảng thời gian trích mẫu  $T_a$ .

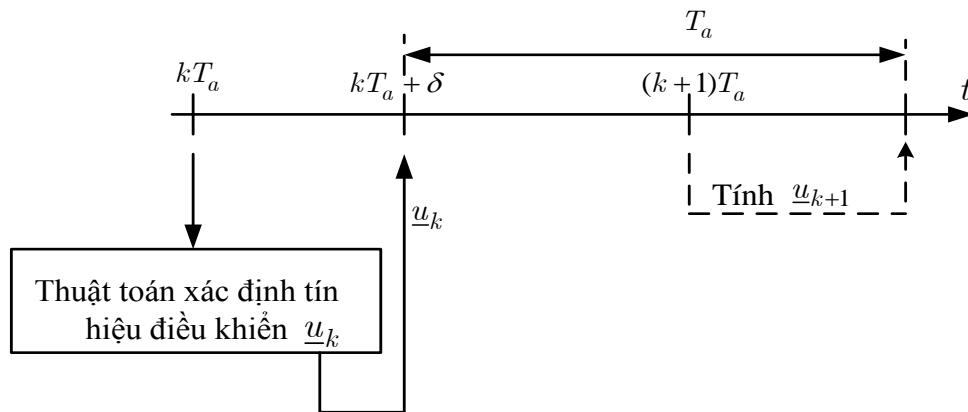
Nếu bài toán có điều kiện ràng buộc cho  $\underline{u}_k$  thì từ (2.57) ta thấy điều kiện ràng buộc đó được chuyển sang điều kiện ràng buộc cho  $\underline{p}^*$ . Do điều kiện ràng buộc tín hiệu điều khiển với đối tượng tàu thủy trong luận án đều là các ràng buộc dạng khoảng cụ thể là  $-\tau_{gh} \leq u_k = \tau \leq \tau_{gh}$  (suy ra từ ràng buộc độ lớn góc bề lái), nên ta có thể thay đổi  $Q_k, R_k$  để  $\underline{p}^*$  thỏa mãn các điều kiện ràng buộc này. Chi tiết hơn, công thức (2.56) cho thấy nếu  $R_k$  càng lớn  $\underline{p}^*$  sẽ càng nhỏ, ngược lại  $Q_k$  càng lớn  $\underline{p}^*$  sẽ càng lớn.

#### 2.3.1.4 Thuật toán bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái

Hình 2.5 biểu diễn thuật toán các bước tính cần thực hiện trong một vòng lặp ở thời điểm  $k$  hiện tại để xác định được tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  và minh họa cấu trúc trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển.



a. Thuật toán xác định tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  bộ điều khiển MPC-S



b. Minh họa thuật toán bộ điều khiển MPC-S trượt dọc trên trục thời gian

Hình 2.5 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (MPC-S), điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt.

Khoảng thời gian chênh lệch  $\delta$  giữa khi đo được trạng thái  $\underline{x}_k$  và có được  $\underline{u}_k$  là khoảng thời gian cần thiết để thực hiện tất cả các phép tính, bao gồm xác định  $\bar{A}_k, H_k, \underline{b}_k, \underline{r}_k, \underline{p}^*$  và cuối cùng là  $\underline{u}_k$ . Về nguyên tắc, với tốc độ tính toán hiện nay của các thiết bị số thì  $\delta$  là rất nhỏ và có thể bỏ qua được.

Khi đã có  $\underline{u}_k$ , nó sẽ được đưa vào điều khiển hệ (2.40), và cũng là hệ liên tục (2.45), trong đúng một khoảng thời gian trích mẫu  $T_a$ , từ thời điểm  $kT_a + \delta$  tới thời điểm  $(k+1)T_a + \delta$ . Ở thời điểm  $(k+1)T_a$  vòng tính toán lặp trên được thực hiện lại, bắt đầu bằng việc đo trạng thái  $\underline{x}_{k+1}$ , tính toán  $\bar{A}_{k+1}, H_{k+1}, \underline{b}_{k+1}, \underline{r}_{k+1}, \underline{p}^*$  để rồi lại có  $\underline{u}_{k+1}$  cho chu kỳ trích mẫu tiếp theo.

Như vậy, hệ điều khiển vòng kín, bao gồm đối tượng điều khiển là hệ liên tục (2.40) và bộ điều khiển số (bộ điều khiển dự báo) sẽ là một hệ sampled data.

Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái được luận án ký hiệu là MPC-S, trong đó ký tự S được thêm vào để ngụ ý rằng đây là thuật toán điều khiển phản hồi trạng thái (system states).

### 2.3.1.5 Mô phỏng bộ điều khiển MPC-S

#### a. Đối tượng và quỹ đạo mô phỏng

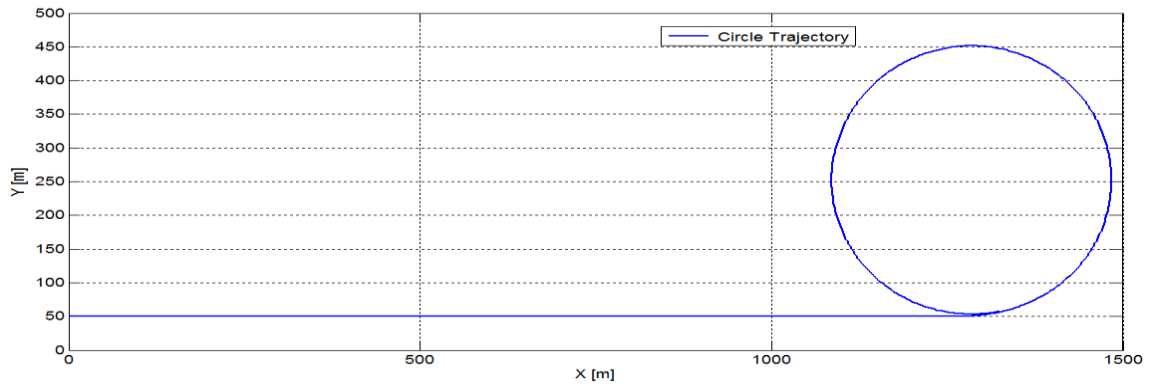
Đối tượng nghiên cứu thiết kế điều khiển là tàu thủy với mô hình ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành, thông số kỹ

thuật của tàu sử dụng mô phỏng được lấy từ tài liệu [21] của tác giả Do K. D and J. Pan (2009). Số liệu chi tiết thông số tàu, tham số của mô hình toán được cho trong bảng PL.1 phụ lục 2. Số liệu thông số tàu này đã được nhiều tác giả sử dụng để mô phỏng, kiểm chứng bộ điều khiển khi nghiên cứu về mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành như các công trình: [14], [16] - [21], [48] và [64]).

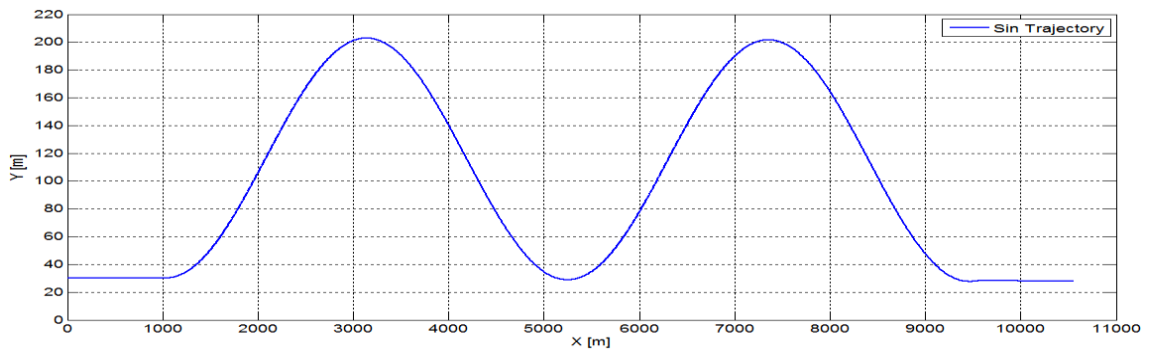
Để kiểm tra chất lượng bám quỹ đạo của bộ điều khiển đề xuất, luận án đưa ra hai quỹ đạo đặt thường hay áp dụng với tàu biển trong quá trình chạy kiểm tra đặc tính điều động và quay trở tàu như sau:

*Quỹ đạo 1:* tàu chạy theo quỹ đạo đường thẳng, sau đó tàu chạy lượn vòng tròn với bán kính lượn vòng 200(m), luận án gọi là quỹ đạo hình tròn, Hình 2.6a.

*Quỹ đạo 2:* tàu chạy theo đường thẳng, sau đó chạy quỹ đạo zíc-zắc hình sin với biên độ 175m, sau đó chạy tiếp với quỹ đạo thẳng, luận án gọi là quỹ đạo hình sin, Hình 2.6b.



a) Quỹ đạo đặt hình tròn với bán kính 200(m)



b) Quỹ đạo đặt hình sin với biên độ hình sin 175(m)

Hình 2.6 Quỹ đạo đặt kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển.

Ký hiệu các đại lượng trong mô phỏng như sau:

$\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]$  – lần lượt là quỹ đạo vị trí và hướng đi đặt của tàu.



$e_x = x_d - x, e_y = y_d - y, e_{hd} = \psi_d - \psi$  - lần lượt là sai lệch bám quỹ đạo theo trục  $x, y$  và sai lệch bám hướng đi.

Thời gian mô phỏng được tính bằng giây [s], tọa độ quỹ đạo trên mặt phẳng ngang của tàu trong hệ trục tọa độ trái đất  $xoy$  theo đơn vị dài là [m], hướng đi của tàu theo đơn vị là độ [deg], trong đó hướng 0 độ trùng với hướng Bắc thật của Trái Đất. Đơn vị lực tác động là [N], mô-men [N.m], vận tốc dài [m/s], và vận tốc góc [rad/s].

### **b. Kết quả mô phỏng**

Chương trình bộ điều khiển viết theo thuật toán điều khiển MPC-S, với các tham số cài đặt như sau:

Cửa sổ dự báo:  $N \geq 2$  (cài đặt  $N = 5$ )

Thời gian trượt (receding horizon)  $T_a = 0.1(s)$

Tham số hiệu chỉnh tín hiệu đặt  $0 < K < 1$  (cài đặt  $K = 0.2$ )

Tín hiệu điều khiển ban đầu ở thời điểm  $t_{-1}$  ( $u_{-1} = 0$ )

Ma trận xác định dương  $Q, R$  (đặt  $Q = \text{diag}([50; 50; 100]); R = \text{diag}([1; 1])$ )

Cài đặt ràng buộc tín hiệu điều khiển (giả thiết giá trị ràng buộc được đặt là  $\tau_{r.gh} = 8.10^5 (N.m)$ ) và tín hiệu điều khiển mô-men quay trở phải thỏa mãn:

$$-\tau_{r.gh} \leq \tau_r \leq \tau_{r.gh}$$

Giá trị ban đầu của quỹ đạo đặt và quỹ đạo vị trí tàu:

Quỹ đạo hình tròn:  $x_d(0) = 0, y_d(0) = 50, \psi_d(0) = 0,$

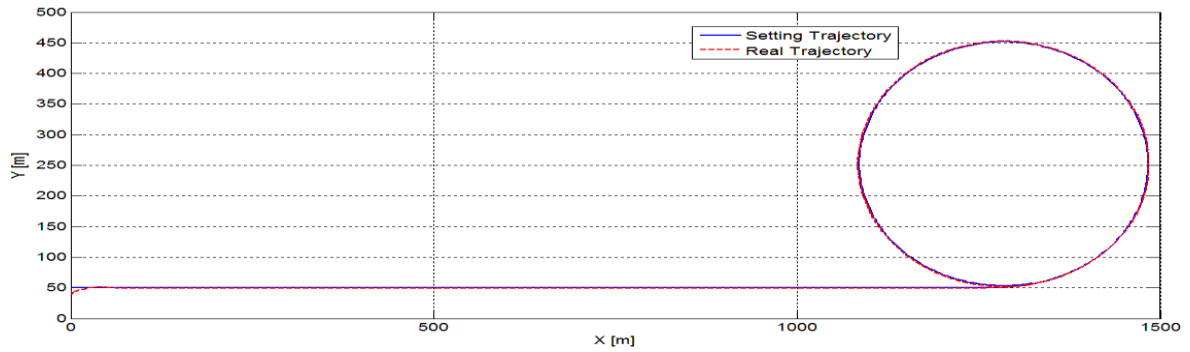
$$x(0) = 0, y(0) = 30, \psi(0) = 0, u(0) = 4, v(0) = 2.3, r(0) = 0.1$$

Quỹ đạo hình sin:  $x_d(0) = 5, y_d(0) = 30, \psi_d(0) = 0$

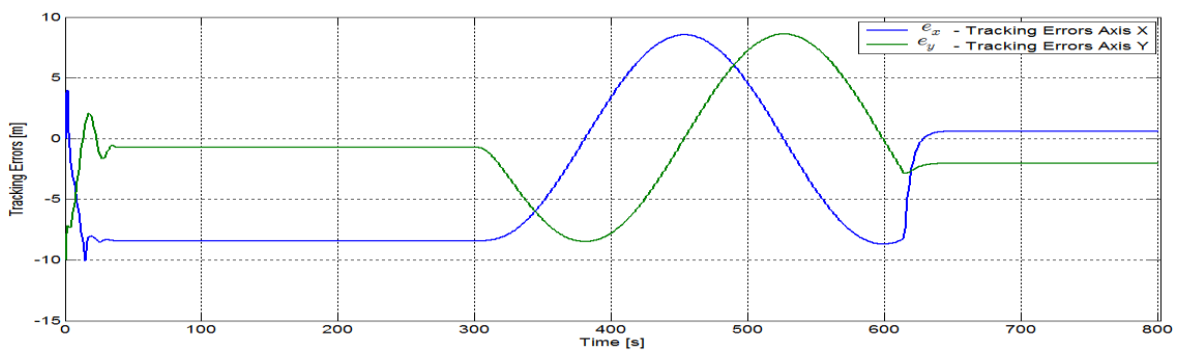
$$x(0) = 0, y(0) = 20, \psi(0) = 0, u(0) = 4, v(0) = 2.3, r(0) = 0.1$$

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển MPC-S được đưa ra trong phần phụ lục 3 của luận án.

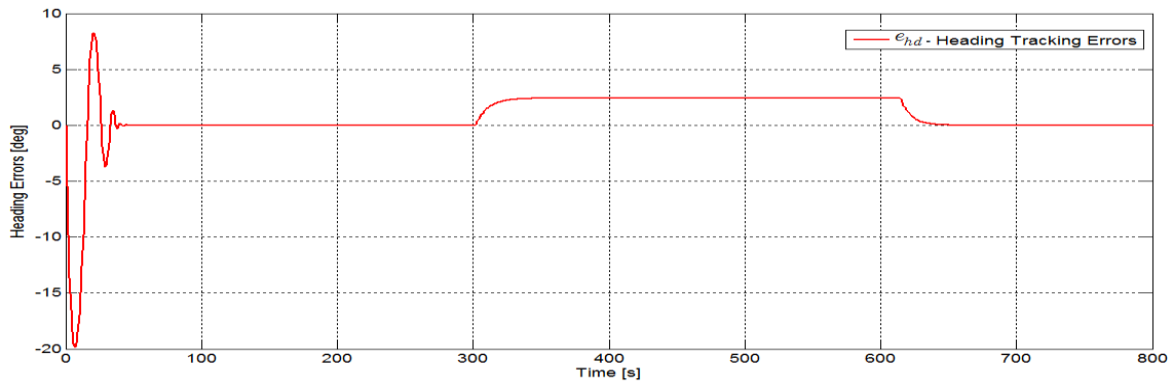
## Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình tròn



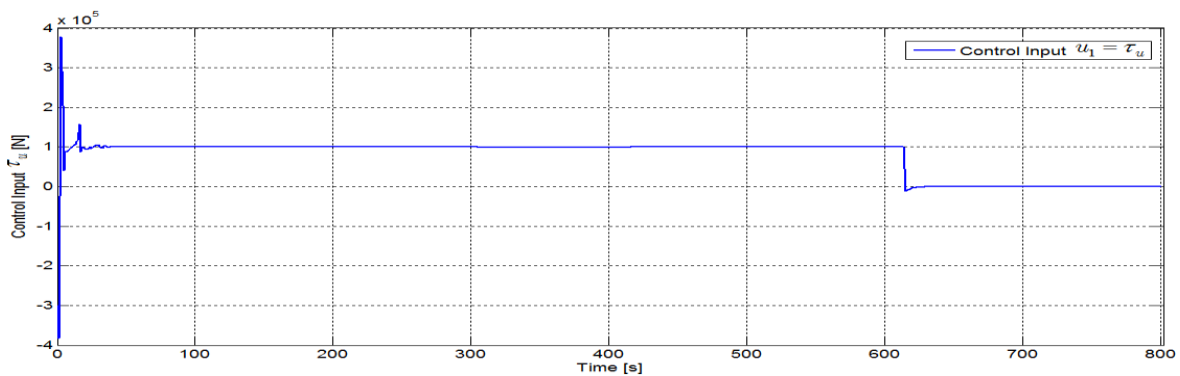
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình tròn (MPC-S)



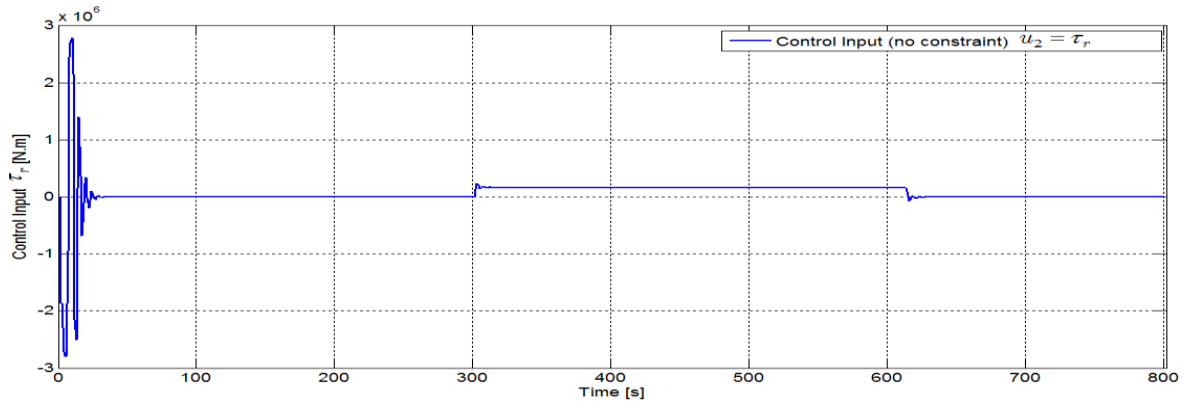
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình tròn (MPC-S)



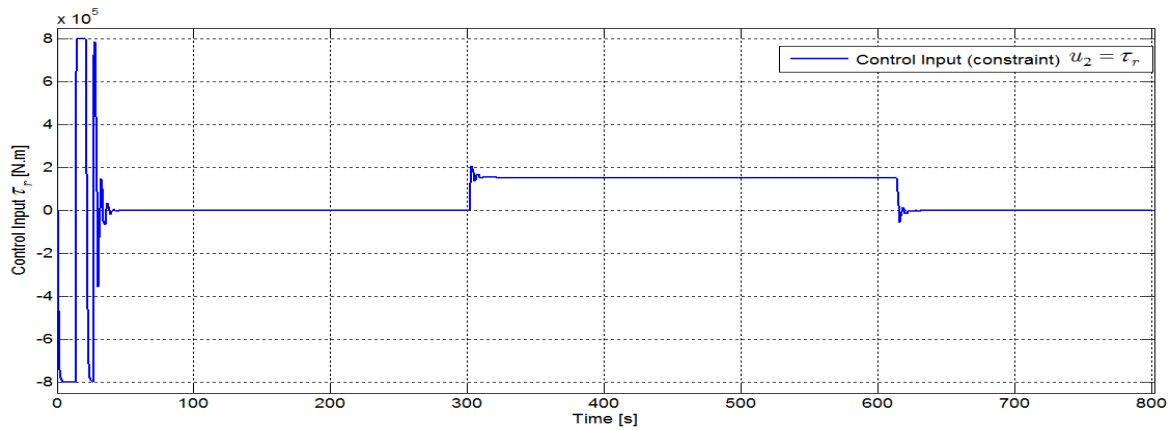
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình tròn (MPC-S)



d) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  – quỹ đạo hình tròn (MPC-S)



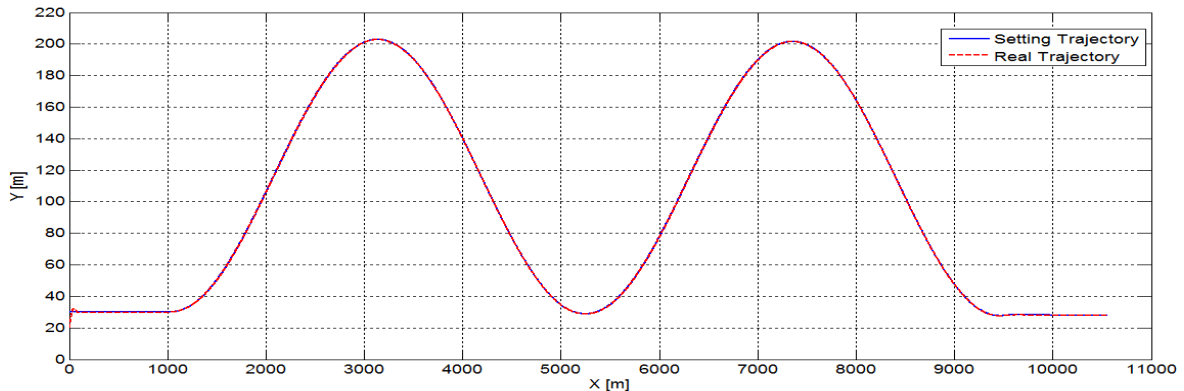
e) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$ , khi không ràng buộc – quỹ đạo hình tròn (MPC-S)



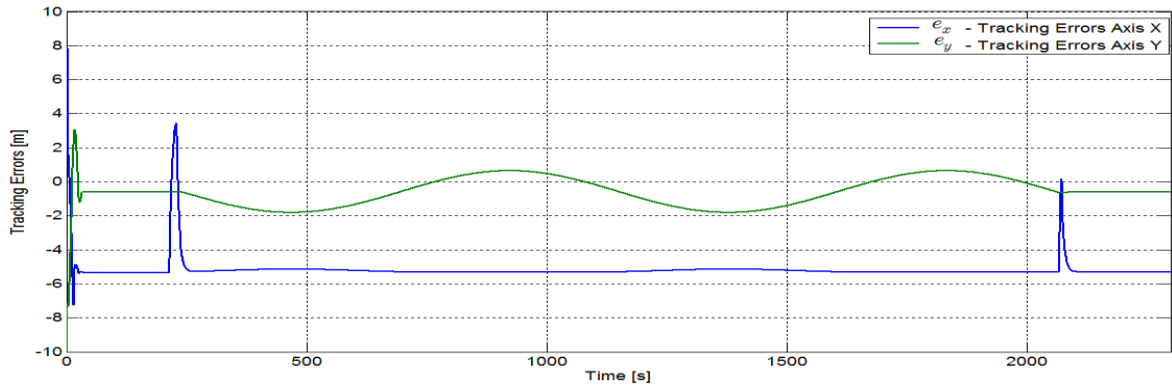
f) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$ , khi có ràng buộc với giả thiết giá trị ràng buộc là  $-8.10^5 (N.m) \leq \tau_r \leq 8.10^5 (N.m)$  – quỹ đạo hình tròn (MPC-S)

Hình 2.7 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình tròn

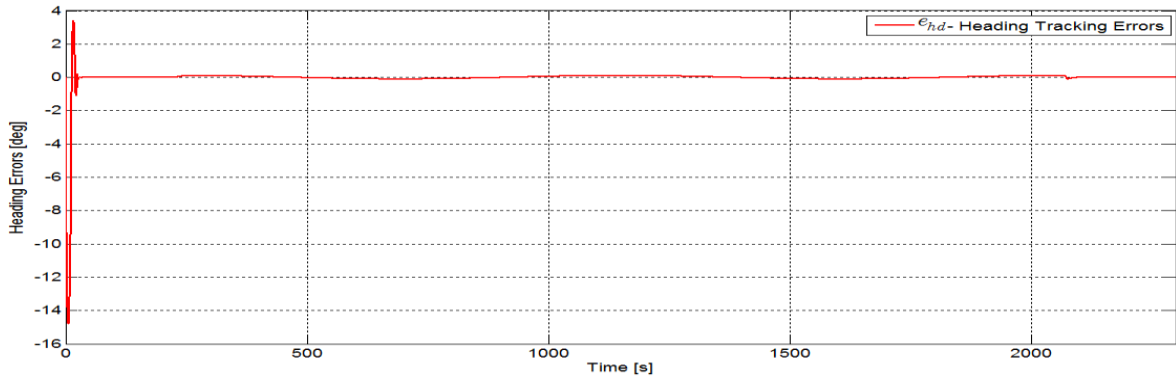
### Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình sin



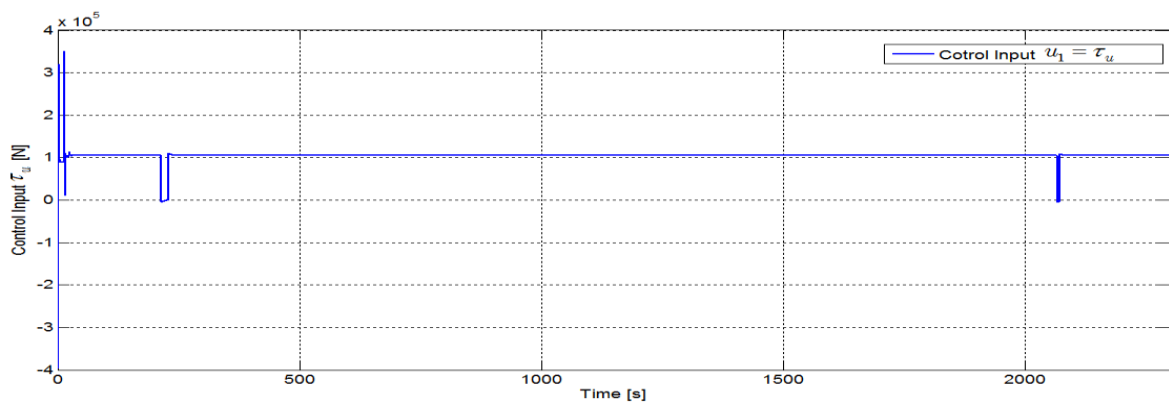
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình sin (MPC-S)



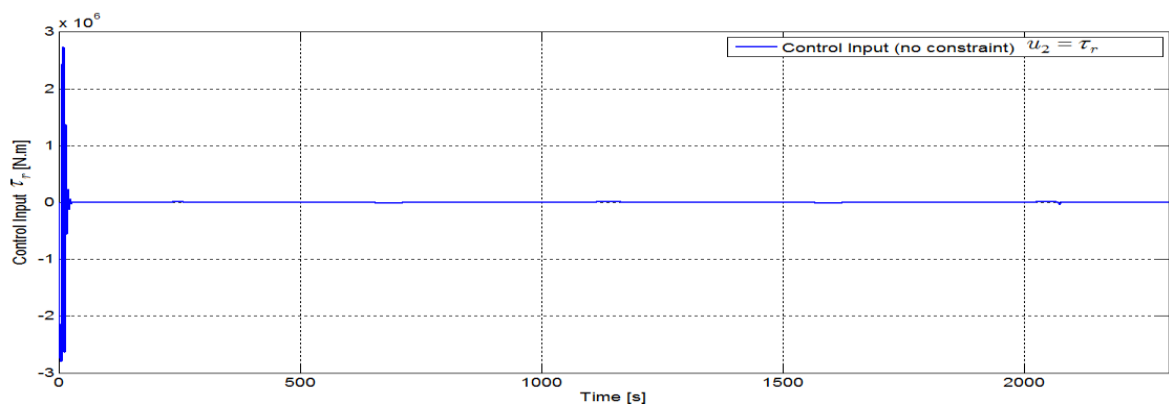
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình sin (MPC-S)



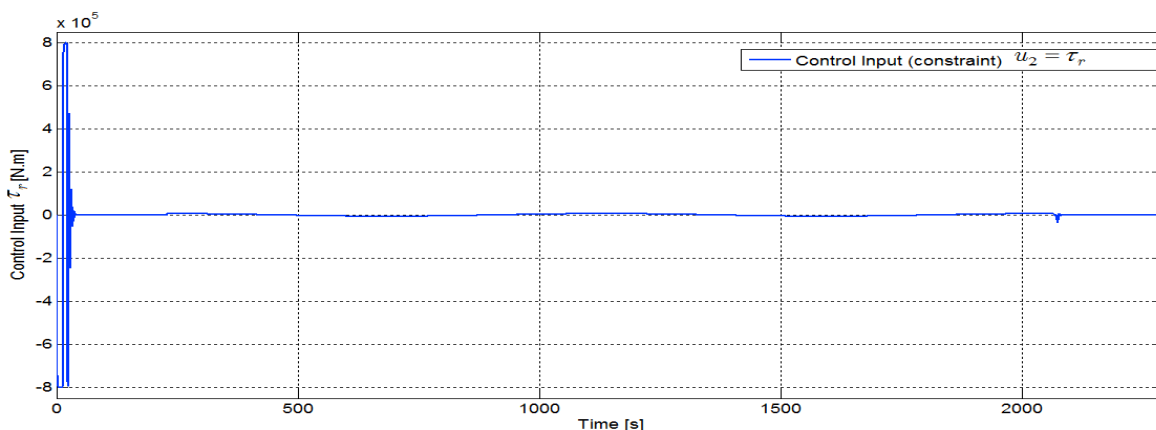
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình sin (MPC-S)



d) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  – quỹ đạo hình sin (MPC-S)



e) Tín hiệu điều khiển mô-men  $\tau_r$ , không ràng buộc – quỹ đạo hình sin (MPC-S)



f) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$ , khi có ràng buộc với giả thiết giá trị ràng buộc là  $-8.10^5 (N.m) \leq \tau_r \leq 8.10^5 (N.m)$  – quỹ đạo hình sin (MPC-S)

Hình 2.8 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-S với quỹ đạo hình sin

### Nhận xét:

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-S cho thấy khi thử nghiệm với hai quỹ đạo đặt là quỹ đạo hình tròn, quỹ đạo hình sin cho tín hiệu quỹ đạo đầu bám theo quỹ đạo đặt với chất lượng tốt khi tín hiệu điều khiển  $u_2 = \tau_r$  có ràng buộc (ràng buộc về giá trị mô-men tương đương với điều kiện ràng buộc về góc bẻ lái).

Sai lệch bám quỹ đạo  $e_x, e_y$ , sai lệch bám hướng  $e_{hd}$  có giá trị nhỏ so với quỹ đạo chuyển động của tàu. Sai lệch bám quỹ đạo lớn nhất là khoảng 8m với quỹ đạo hình tròn, khoảng 5.5m với quỹ đạo hình sin. Sai lệch bám quỹ đạo, bám hướng có xu hướng tăng ở điểm quỹ đạo tàu bắt đầu chuyển động vào quỹ đạo đường tròn và ở điểm quỹ đạo vào, ra với quỹ đạo hình sin bởi vì đây là điểm mà tọa độ quỹ đạo thay đổi nhiều nhất. Sai lệch bám quỹ đạo và hướng ở thời điểm ban đầu phụ thuộc rất nhiều vào việc cài đặt tọa độ vị trí và hướng ban đầu của tàu  $x(0), y(0), \psi(0)$ .

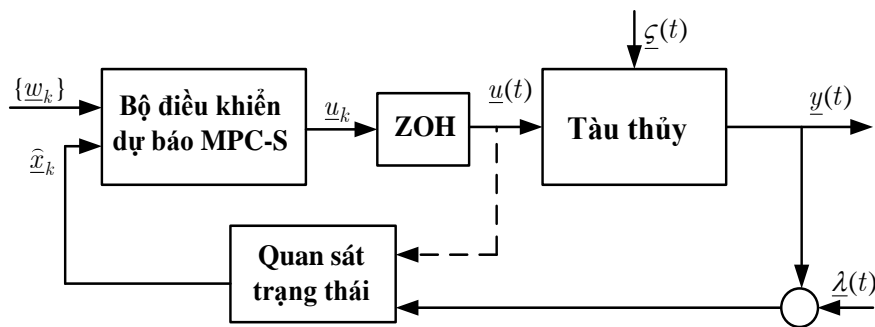
Tín hiệu điều khiển có độ quá điều chỉnh nhỏ. Ở thời điểm ban đầu cả hai tín hiệu điều khiển lớn, bị dao động, độ quá điều chỉnh lớn là do việc cài đặt quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực ở thời điểm ban đầu là khác nhau,  $y_d(0) = 50, y(0) = 30$  với quỹ đạo hình tròn và  $y_d(0) = 30, y(0) = 20$  với quỹ đạo hình sin. Ở thời điểm sau khi quỹ đạo ổn định độ quá chỉnh của tín hiệu điều khiển nhỏ và ổn định.

Chất lượng bộ điều khiển dự báo MPC-S còn phụ thuộc vào việc chọn các giá trị của ma trận xác định dương  $Q, R$  và cửa sổ dự báo  $N$ . Nếu cửa sổ dự báo được chọn càng lớn thì sai lệch bám càng nhỏ nhưng kéo theo khoảng tính toán (thời gian trượt) càng tăng. Việc chọn ma trận xác định dương  $Q, R$  sẽ ảnh hưởng tới độ lớn của tín hiệu điều khiển (như đã được phân tích trong mục 2.2.2)

Bộ điều khiển MPC-S có hạn chế là tất cả các biến trạng thái của đối tượng bao gồm  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}, \underline{x}_2 = \underline{v} = [u \ v \ r]^T$  phải đo đạc xác định được trực tiếp. Thực tế với tàu thủy thì trạng thái  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$  hoàn toàn có thể xác định được nhờ GPS hoặc la bàn điện trên tàu. Hiện nay việc xác định trạng thái  $\underline{x}_2 = \underline{v} = [u \ v \ r]^T$  cũng có thể xác định được bằng DGPS (Differential Global Positioning Systems), nhưng việc áp dụng còn hạn chế. Do vậy để giải quyết hạn chế đó, tiếp theo luận án sẽ tiến hành xây dựng bộ quan sát trạng thái  $\underline{x}_2 = \underline{v} = [u \ v \ r]^T$  từ tín hiệu đầu ra  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$  và thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra.

### 2.3.2 Thiết kế bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách để điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu xác định

Bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách là sự ghép nối giữa bộ điều khiển phản hồi trạng thái MPC-S và một bộ quan sát trạng thái như mô tả trên Hình 2.9.



Hình 2.9 Cấu trúc bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt.

Trong thiết kế điều khiển, các bộ quan sát thường được sử dụng như Luenberger, Kalman-Bucy dùng cho hệ tuyến tính, Kalman mở rộng (EKF) dùng

cho hệ phi tuyến,... Định hướng của luận án sẽ xây dựng một bộ quan sát trạng thái mới cho đối tượng tàu thủy với giả thiết là không có nhiễu đo. Còn nếu như các giá trị đo được từ hệ thống, ở đây là các tín hiệu vào ra, còn bị lẫn nhiễu đo ký hiệu là  $\underline{\lambda}(t)$  và nhiễu hệ thống ký hiệu là  $\underline{\zeta}(t)$  như Hình 2.9 thì một bộ quan sát trạng thái thích hợp có thêm chức năng lọc nhiễu được sử dụng là bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF). Những hệ lẫn nhiễu này còn được gọi là hệ ngẫu nhiên.

### 2.3.2.1 Xây dựng bộ quan sát trực tiếp trạng thái từ mô hình liên tục

Phương pháp quan sát trực tiếp (QSTT) được xây dựng trực tiếp từ mô hình liên tục (2.40), hoặc các dạng tương đương (2.43) và (2.45), của mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang, trên cơ sở giả thiết rằng phép đo tín hiệu đầu ra  $\underline{y}(t) = \underline{\eta}(t)$  là chính xác (thực tế hiện nay thì tín hiệu  $\underline{\eta}(t)$  gồm tọa độ vị trí và hướng đi của tàu trong hệ tọa độ trái đất hoàn toàn được xác định chính xác thông qua thiết bị định vị GPS (Global Positioning System) và la bàn (Gyrocompass) điện gắn trên tàu). Nhiệm vụ của nó là từ đó xác định được các véc-tơ trạng thái  $\underline{x} = \text{col}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  của hệ liên tục tương ứng (2.43) hay (2.45).

Trong hai thành phần  $\underline{\eta}(t)$ ,  $\underline{\nu}(t)$  của véc-tơ trạng thái  $\underline{x}(t) = \text{col}(\underline{\eta}(t), \underline{\nu}(t))$ , thì do có đầu ra  $\underline{y}(t) = \underline{\eta}(t)$ , nên khi đo được tín hiệu đầu ra  $\underline{y}(t)$  một cách chính xác, ta cũng có ngay được thành phần thứ nhất  $\underline{\eta}(t)$ . Bởi vậy nhiệm vụ quan sát lúc này chỉ còn là xác định thành phần thứ hai  $\underline{\nu}(t)$ .

Từ quan hệ giữa hai thành phần trạng thái  $\underline{\eta}(t)$ ,  $\underline{\nu}(t)$  cho ở mô hình (2.40) là:  $\dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\nu}$  thì do đã có  $\underline{\eta}(t) = \underline{y}(t)$  và ma trận  $J(\underline{\eta})$  là trực giao (đặc điểm mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang), nên cũng sẽ có được thành phần trạng thái  $\underline{\nu}(t)$  còn lại thông qua:

$$\underline{\nu}(t) = J(\underline{\eta})^T \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{y})^T \dot{\underline{y}}$$

nếu như đã có được giá trị đạo hàm  $\dot{\underline{y}}(t)$  của tín hiệu đầu ra  $\underline{y}(t)$ . Để làm được điều này ta sẽ sử dụng khâu vi phân quán tính bậc nhất (khâu DT1), là một khâu hợp thức, Causal:

$$D_T(s) = \frac{s}{1+Ts} \text{ với hằng số } T > 0 \text{ rất nhỏ tùy chọn,} \quad (2.58)$$

có đầu vào là  $\underline{y}(t)$ . Do ở đây có  $T \approx 0$  nên đầu ra của nó, ký hiệu bởi  $\underline{\hat{y}}(t)$  sẽ là:

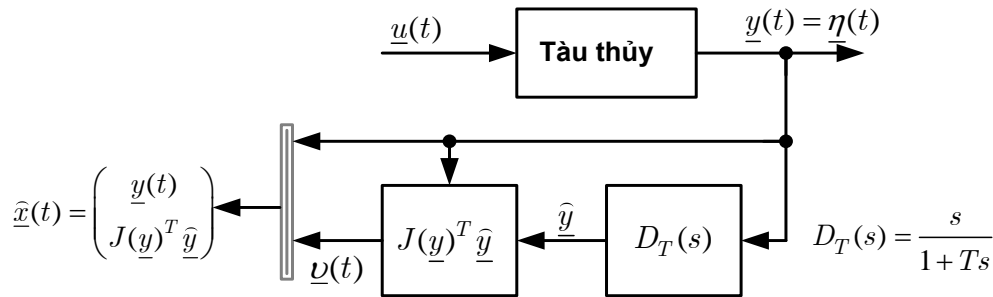
$$\underline{\hat{y}} + T\dot{\underline{\hat{y}}} = \underline{\dot{y}} \text{ hay } \underline{\hat{y}} \approx \underline{\dot{y}} = J(\underline{\eta})\underline{v}.$$

Cuối cùng, ghép chung  $\underline{\eta}(t) = \underline{y}(t)$  đo được từ đầu ra và:

$$\underline{v}(t) = J(\underline{\eta})^T \underline{\dot{\eta}} = J(\underline{y})^T \underline{\dot{y}} \approx J(\underline{y})^T \underline{\hat{y}}$$

với  $\underline{\hat{y}}(t)$  là đầu ra của khâu DT1 cho ở (2.58) có đầu vào là  $\underline{y}(t)$  ta sẽ có được đầy đủ véc-tơ trạng thái  $\underline{\hat{x}}(t) = \text{col}(\underline{y}(t), J(\underline{y})^T \underline{\hat{y}})$  của mô hình tàu thủy ba bậc tự do.

Hình 2.10 mô tả cấu trúc của bộ quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục.



Hình 2.10 Quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục tàu thủy ba bậc tự do.

### a. Cài đặt và mô phỏng kiểm chứng bộ quan sát trực tiếp

Các thông số cài đặt bộ quan sát trực tiếp (QSTT) bao gồm:

Thời gian quan sát của bộ QSTT,  $T_a = 0.01 - 0.1(s)$  và cũng là khoảng thời gian trượt (receding horizon), thời gian quan sát càng ngắn độ chính xác quan sát càng cao, thời gian quan sát được chọn bằng chu kỳ trích mẫu của bộ điều khiển trượt.

Giá trị quan sát ban đầu  $\hat{u}(0), \hat{v}(0), \hat{r}(0)$  của bộ quan sát, giá trị ban đầu nếu được chọn càng gần giá trị thực thì chất lượng quan sát càng tốt.

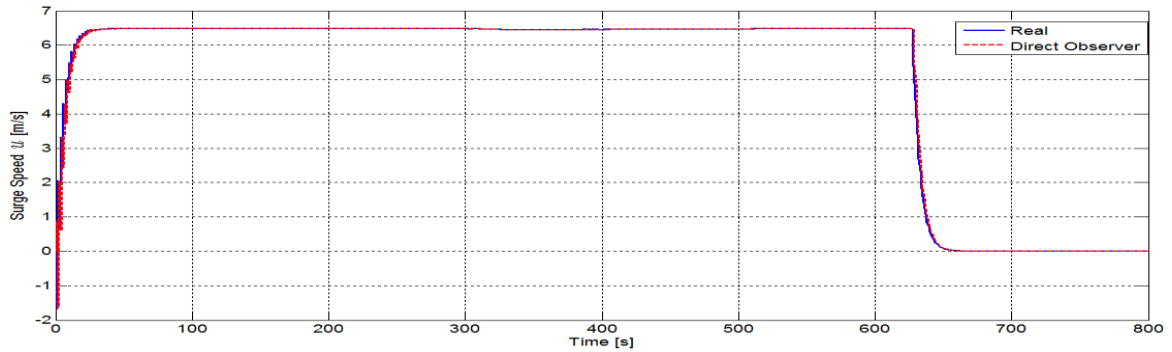
Chất lượng bộ quan sát được đánh giá dựa trên sai lệch giữa tín hiệu quan sát được và tín hiệu thực như sau:

$e_u = u - \hat{u}, e_v = v - \hat{v}, e_r = r - \hat{r}$  - lần lượt là sai lệch bám tốc độ trượt dọc, trượt ngang, tốc độ quay trở. Trong đó  $\hat{u}, \hat{v}, \hat{r}$  - tín hiệu trạng thái quan sát được từ

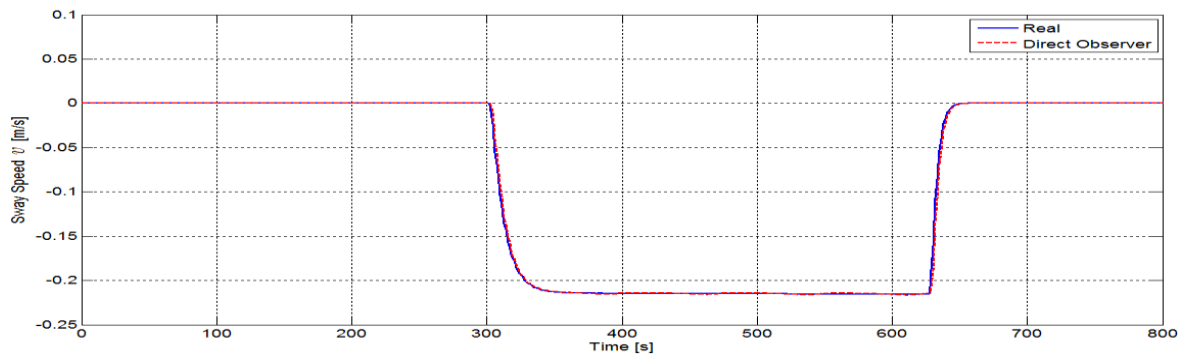


$u, v, r$  của bộ QSTT.

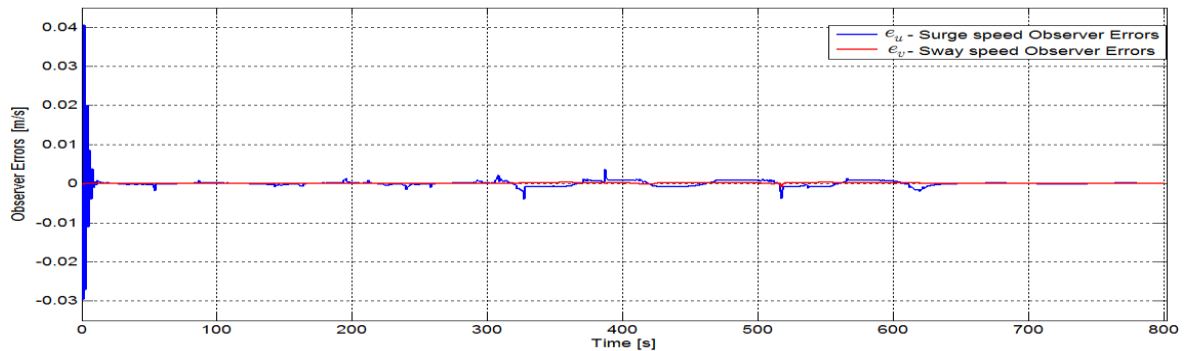
**b. Kết quả mô phỏng, kiểm chứng bộ QSTT với quỹ đạo hình tròn**



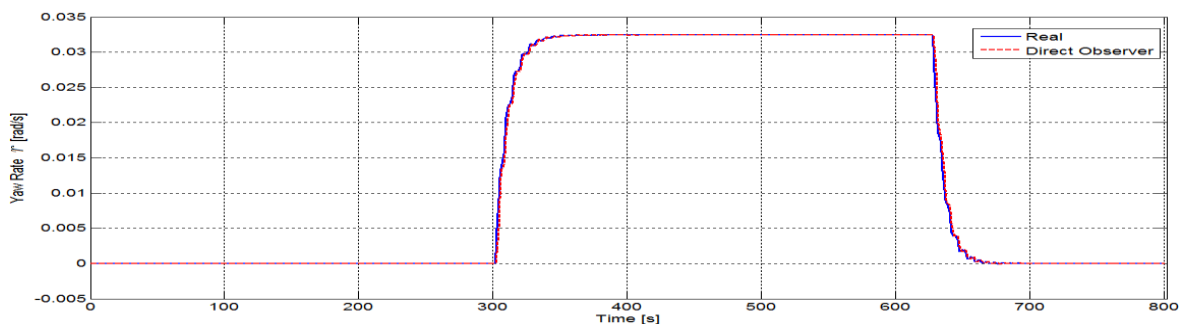
a) Kết quả mô phỏng quan sát trạng thái tốc độ trượt dọc  $\hat{u}$  – quỹ đạo hình tròn



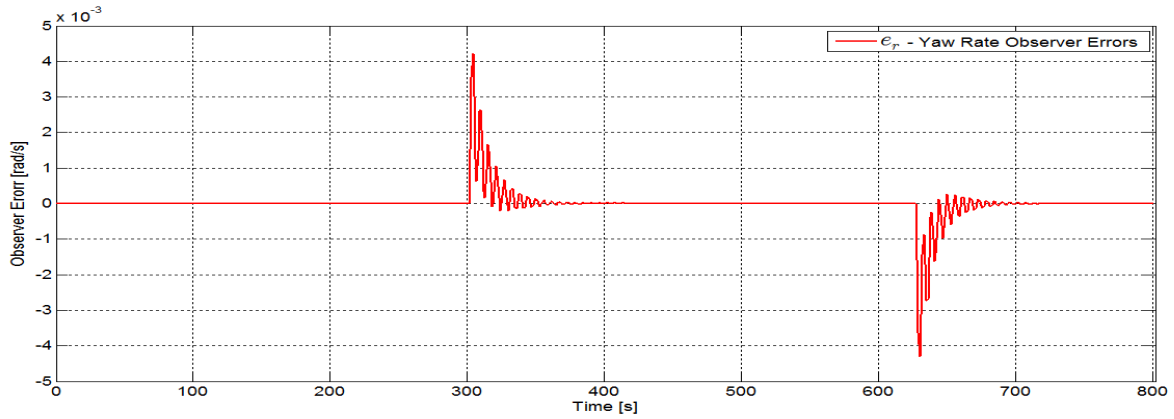
b) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt ngang  $\hat{v}$  – quỹ đạo hình tròn



c) Sai lệch quan sát tốc độ trượt dọc  $e_u$ , trượt ngang  $e_v$  – quỹ đạo hình tròn



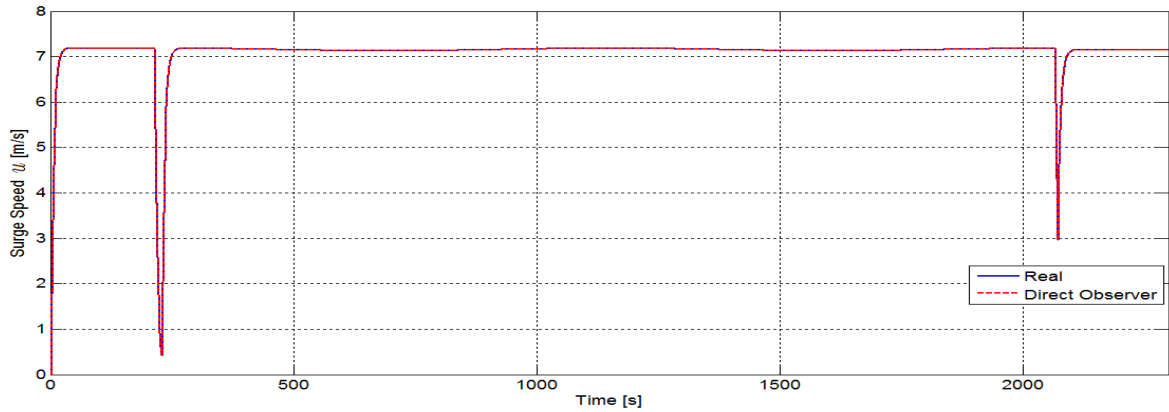
d) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ quay trở  $\hat{r}$  – quỹ đạo hình tròn



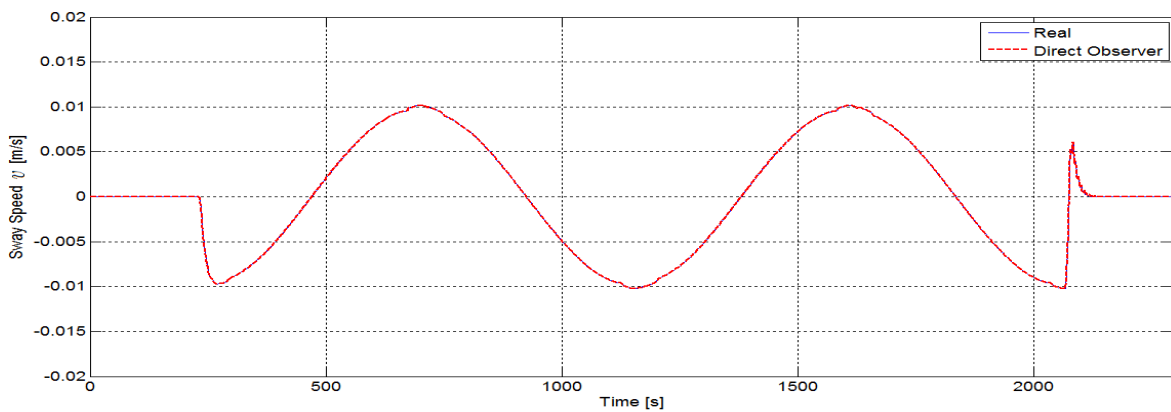
e) Sai lệch quan sát tốc độ quay trở  $e_r$  – quỹ đạo hình tròn

Hình 2.11 Đồ thị mô phỏng kết quả bộ QSTT khi tàu chạy quỹ đạo hình tròn.

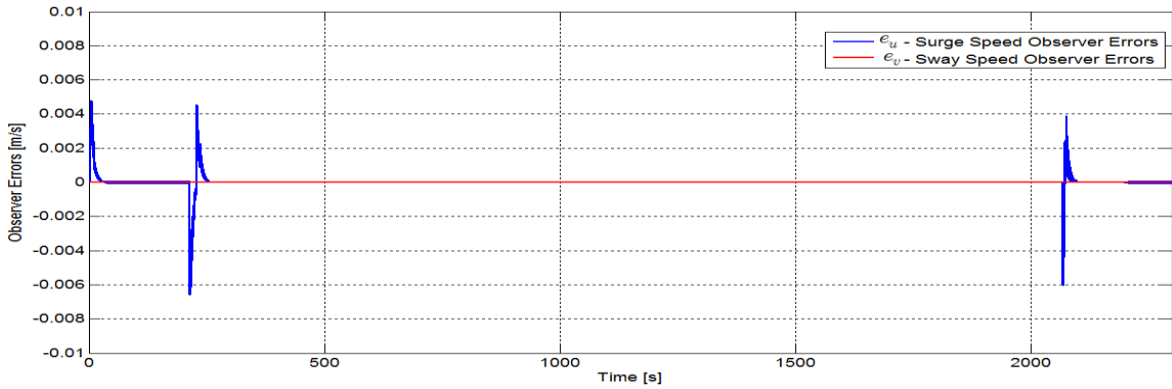
**c. Kết quả mô phỏng, kiểm chứng bộ quan sát với quỹ đạo hình sin**



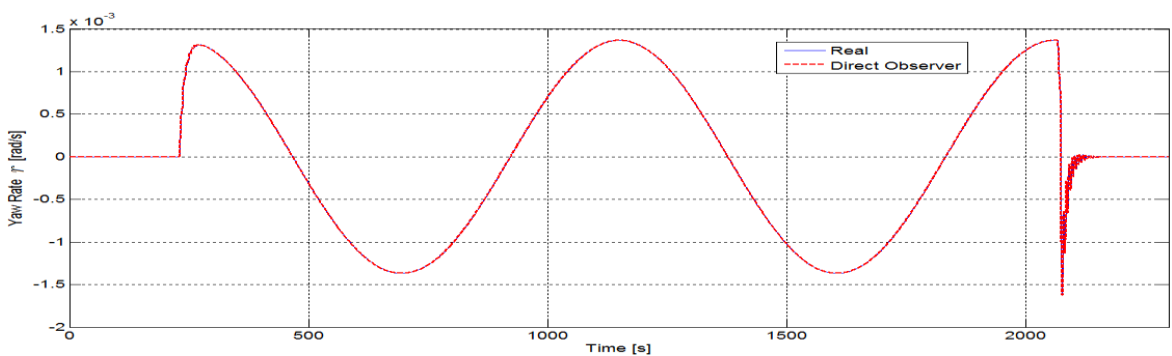
a) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt dọc  $\hat{u}$  – quỹ đạo hình sin



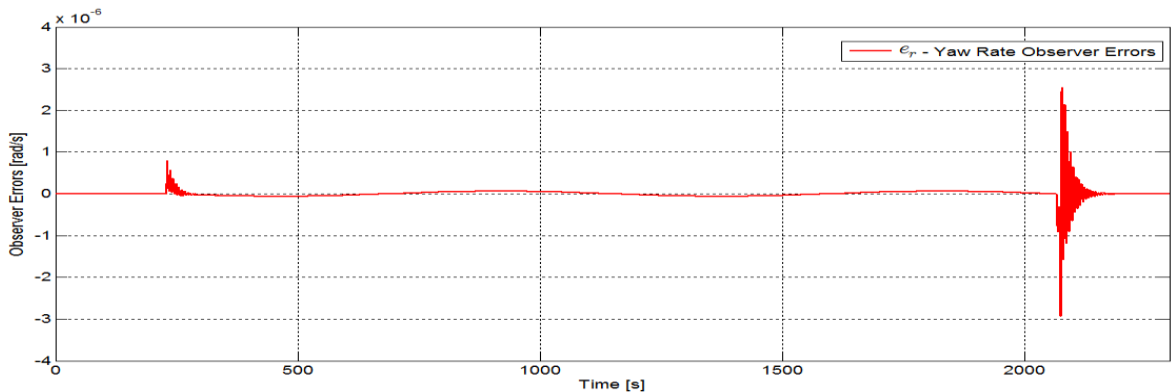
b) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt ngang  $\hat{v}$  – quỹ đạo hình sin



c) Sai lệch quan sát tốc độ trượt dọc  $e_u$ , trượt ngang  $e_v$  – quỹ đạo hình sin



d) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ quay trở  $\hat{r}$  – quỹ đạo hình sin



e) Sai lệch quan sát tốc độ quay trở  $e_r$  – quỹ đạo hình sin

Hình 2.12 Đồ thị mô phỏng kết quả bộ QSTT khi tàu chạy quỹ đạo hình sin

#### d. Nhận xét chất lượng bộ QSTT đã xây dựng

Kết quả mô phỏng cho thấy tín hiệu trạng thái quan sát được từ bộ QSTT bám rất tốt tín hiệu trạng thái thực, sai lệch quan sát giữa tín hiệu quan sát được và tín hiệu thực tương đối nhỏ. Sai lệch quan sát giảm dần và tiệm cận về 0 theo thời gian. Tốc độ hội tụ phụ thuộc vào giá trị đặt ban đầu cho trạng thái quan sát. Sai lệch quan sát ban đầu càng nhỏ thì thời gian tiến về 0 càng nhanh. Nếu như có thể ước

lượng được giá trị quan sát ban đầu gần với giá trị thực của hệ thì thời gian quá độ của bộ quan sát sẽ được cải thiện rất nhiều.

Ngoài ra sai lệch quan sát còn phụ thuộc vào thời gian thực hiện phép tính đạo hàm trong khâu DT1, được ký hiệu là  $T$  trong (2.58), thời gian này càng nhỏ thì chất lượng quan sát càng tốt. Mặc dù bộ QSTT sử dụng khâu DT1 là khâu có trễ song tín hiệu quan sát được bám rất tốt tín hiệu thực, lý do là vì tàu thủy là đối tượng có quán tính và thông số biến đổi chậm. Do đó bộ QSTT có thể sử dụng để quan sát trạng thái khi thiết kế bộ điều khiển dự báo MPC phản hồi đầu ra với giả thiết là không có nhiễu đo, hoặc ảnh hưởng của nhiễu đo là nhỏ. Trong trường hợp tín hiệu trạng thái có lẫn nhiễu đo thì bộ quan sát Kalman mở rộng EKF sẽ được sử dụng.

### 2.3.2.2 Xây dựng bộ quan sát trạng thái và lọc nhiễu nhờ bộ lọc Kalman mở rộng (EKF)

Trong trường hợp có lẫn nhiễu đo ở đầu ra  $\underline{y}(t) = \underline{\eta}(t) + \underline{\lambda}(t)$  cũng như có nhiễu  $\underline{\zeta}(t)$  tác động vào thành phần trạng thái  $\underline{x}(t)$  mà ta vẫn sử dụng phương pháp quan sát trực tiếp như trên, trong kết quả thu được sau này là  $\hat{\underline{x}}(t)$  sẽ vẫn còn sự tham gia của các nhiễu đó. Điều này sẽ ảnh hưởng tới chất lượng điều khiển của bộ điều khiển dự báo. Bởi vậy ta cần tới một bộ quan sát khác, không những xác định được xấp xỉ  $\hat{\underline{x}}(t) \approx \underline{x}(t)$  mà còn có khả năng lọc được nhiễu  $\underline{\zeta}(t), \underline{\lambda}(t)$  có trong  $\hat{\underline{x}}(t)$ . Một bộ quan sát như vậy là bộ quan sát Kalman mở rộng đã được đề cập tới ở mục 2.1.4.2 của chương 2, mà sau đây nó còn có thể được gọi là bộ quan sát gián tiếp, để phân biệt với bộ quan sát trực tiếp ở mục 2.3.2.1.

Bộ quan sát gián tiếp này sử dụng mô hình rời rạc (2.46), nhưng bây giờ có lẫn thêm nhiễu đo  $\underline{\lambda}_k = \underline{\lambda}(kT_a)$  và nhiễu hệ thống  $\underline{\zeta}_k = \underline{\zeta}(kT_a)$ :

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = [I_6 + T_a A(\underline{x}_k)] \underline{x}_k + T_a B \underline{u}_k + \underline{\zeta}_k \\ \underline{y}_k = C \underline{x}_k + \underline{\lambda}_k \end{cases} \quad (2.59)$$

Nhiệm vụ của bộ quan sát này là ở thời điểm  $k$  hiện tại, trên cơ sở các dữ liệu đo được của hệ thống gồm đầu ra  $\underline{y}_k$  cũng như đầu vào và trạng thái đã quan sát được ở thời điểm trước đó là  $\underline{u}_{k-1}, \hat{\underline{x}}_{k-1}$ , cần phải xác định được  $\hat{\underline{x}}_k$  sao cho kỳ vọng sai lệch của nó với giá trị trạng thái thực (không bị lẫn nhiễu) là nhỏ nhất.

Thuật toán quan sát Kalman mở rộng cho hệ phi tuyến (EKF) đã được trình bày ở mục 2.1.4.2, nhưng bây giờ được viết lại riêng cho hệ (2.59), sẽ như sau:

### Thuật toán EKF

1. Khởi tạo với việc xác định các ma trận tương quan  $N_X$  của  $\underline{z}_k$  và  $V$  của  $\underline{\lambda}_k$ .  
Tùy chọn  $K_0$  và  $\hat{\underline{x}}_0$  (hoặc tính  $\hat{\underline{x}}_0$  theo công thức (2.60) dưới đây). Gán  $k=1$ .

2. Đo  $\underline{u}_{k-1}$ ,  $\underline{y}_k$  và tính lần lượt các phép tính sau:

$$\begin{cases} P_k = [I_6 + T_a A(\hat{\underline{x}}_{k-1})] K_{k-1} [I_6 + T_a A(\hat{\underline{x}}_{k-1})]^T + N_X \\ L_k = P_k C^T (C P_k C^T + V)^{-1} \\ K_k = (I - L_k C) P_k \\ \underline{x}'_k = [I_6 + T_a A(\hat{\underline{x}}_{k-1})] \hat{\underline{x}}_{k-1} + T_a B \underline{u}_{k-1} \\ \hat{\underline{x}}_k = \underline{x}'_k + L_k (\underline{y}_k - C \underline{x}'_k) \end{cases}$$

3. Gán  $k := k+1$  và quay về bước 2.

Độ chính xác và tốc độ hội tụ của kết quả  $\hat{\underline{x}}_k$  của thuật toán trên phụ thuộc rất nhiều vào giá trị đầu  $\hat{\underline{x}}_0$  được chọn [31]. Bởi vậy, để tăng tính hiệu quả của thuật toán EKF, luận án đề xuất kết hợp thêm với thuật toán quan sát trạng thái trực tiếp đã trình bày ở trên, chỉ một lần ở bước khởi tạo để xác định  $\hat{\underline{x}}_0$ , thay vì tùy chọn nó.

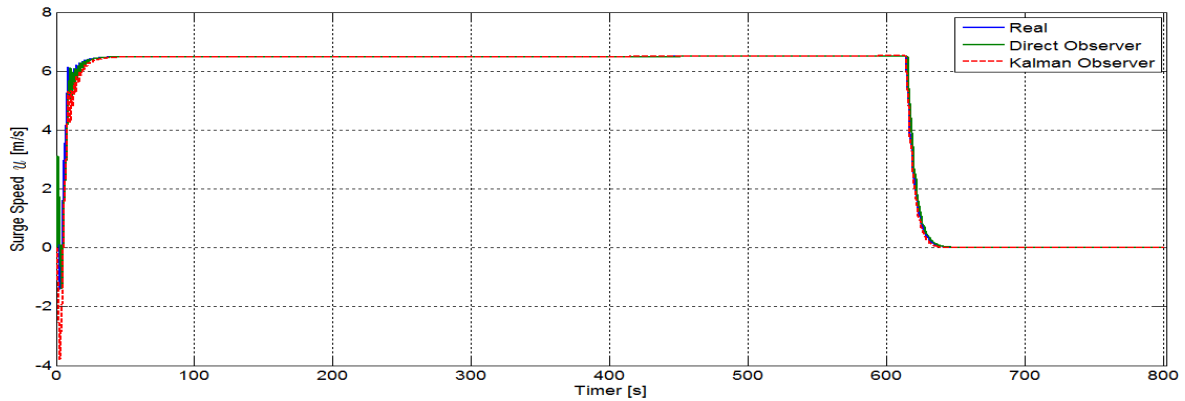
Chẳng hạn, nếu ở hai thời điểm  $k=-1$  và  $k=0$  trước đó ta đã đo được  $\underline{y}_{-1}$ ,  $\underline{y}_0$  cách nhau đúng một chu kỳ trích mẫu  $T_a$  thì giá trị trạng thái  $\hat{\underline{x}}_0$  tính theo phương pháp quan sát trực tiếp sẽ được xấp xỉ bởi:

$$\hat{\underline{x}}_0 = \text{col}\left(\underline{y}_0, J(\underline{y}_0)^T \hat{\underline{y}}_0\right) \text{ với } \hat{\underline{y}}_0 \approx \frac{\underline{y}_0 - \underline{y}_{-1}}{T_a}. \quad (2.60)$$

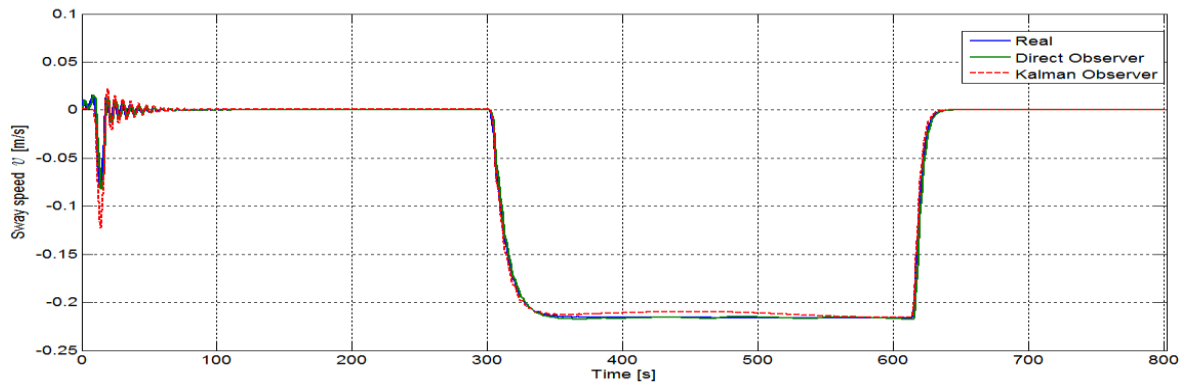
#### a. Mô phỏng kiểm chứng bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF)

Để kiểm tra chất lượng của bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF), luận án so sánh với bộ QSTT đã xây dựng ở trên và tiến hành mô phỏng trong 2 trường hợp không có nhiễu đo và trường hợp có nhiễu đo.

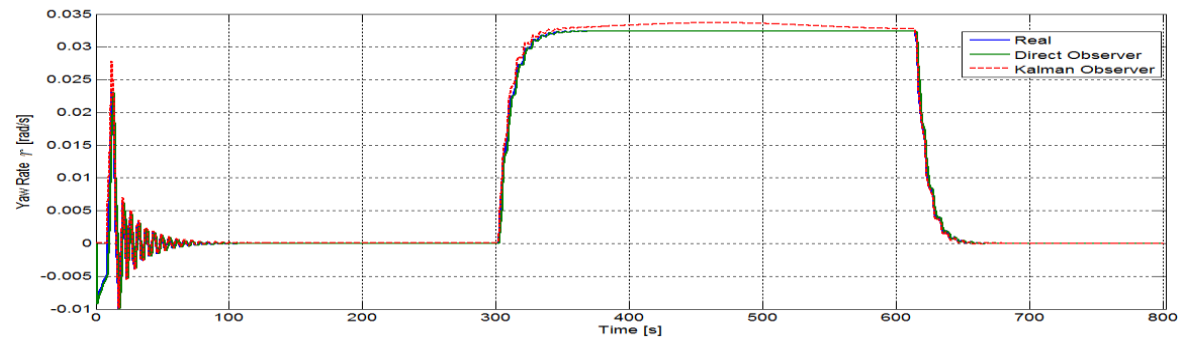
Trường hợp 1: So sánh kết quả mô phỏng bộ QSTT và bộ quan sát EKF với giả thiết mô hình (2.59) không có nhiễu đo.



a) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt dọc  $\hat{u}$  – không có nhiễu đo



b) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt ngang  $\hat{v}$  – không có nhiễu đo



c) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ quay trở  $\hat{r}$  – không có nhiễu đo

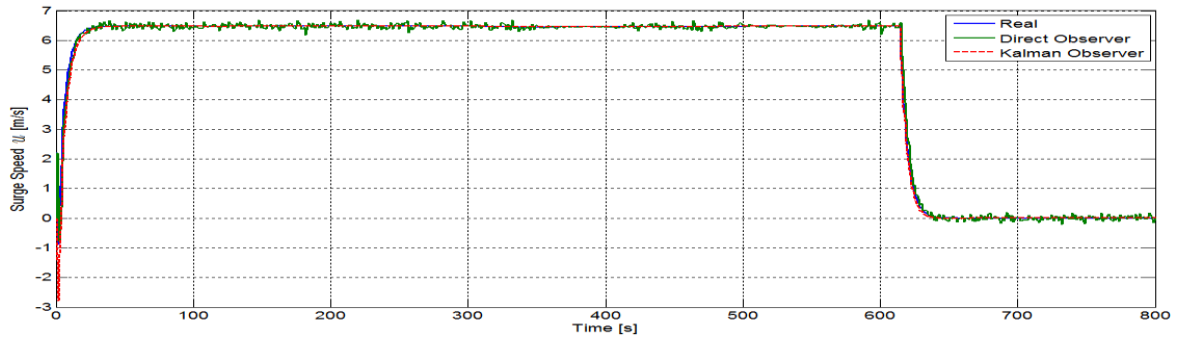
Hình 2.13 Kết quả mô phỏng so sánh bộ QSTT và Kalman (EKF) khi không có nhiễu đo

**Nhận xét:**

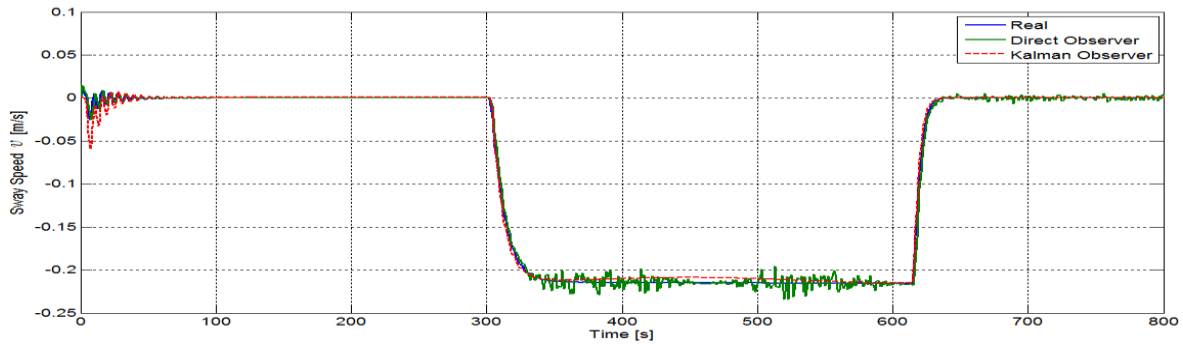
Kết quả mô phỏng cho thấy trong trường hợp giả thiết không có nhiễu đo thì chất lượng bộ QSTT tốt hơn so với bộ quan sát EKF (sai lệch quan sát bộ EKF lớn

hơn bộ QSTT), tín hiệu quan sát được từ bộ QSTT bám tốt tín hiệu thực, với sai lệch bám rất nhỏ.

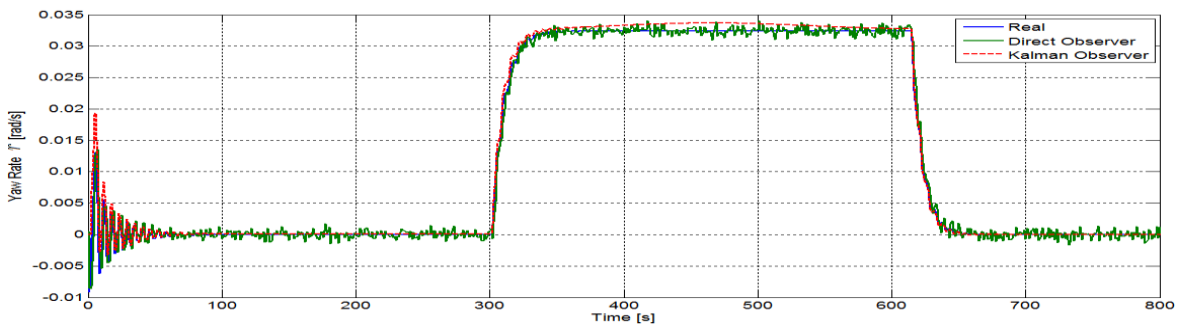
*Trường hợp 2:* So sánh kết quả mô phỏng bộ QSTT và bộ quan sát EKF với giả thiết mô hình (2.59) có nhiễu đo  $\lambda(t) = random('normal', 0, 0.05, 2 * T, 1)$ .



a) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt dọc  $\hat{u}$  – có nhiễu đo



b) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ trượt ngang  $\hat{v}$  – có nhiễu đo



c) Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ quay trở  $\hat{r}$  – có nhiễu đo

Hình 2.14 Kết quả mô phỏng so sánh bộ QSTT và Kalman (EKF) khi có nhiễu đo

**Nhận xét:** Kết quả mô phỏng cho thấy trong trường hợp giả thiết có nhiễu đo thì chất lượng bộ quan sát EKF tốt hơn so với bộ QSTT, tín hiệu quan sát từ bộ QSTT bị ảnh hưởng theo nhiễu đo và dạng tín hiệu thay đổi theo nhiễu đo. Lý do là vì bộ quan sát EKF ngoài chức năng quan sát trạng thái còn có chức năng lọc nhiễu.

Như vậy, bộ quan sát Kalman mở rộng EKF sẽ được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển dự báo trong trường hợp có nhiễu đo.

### 2.3.2.3 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra với bộ QSTT

Hình 2.15 dưới đây mô tả nội dung thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách (kết hợp giữa bộ điều khiển MPC-S và QSTT) để điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt. Điểm khác biệt duy nhất giữa điều khiển dự báo phản hồi đầu ra với bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái là ở thời điểm  $k$  hiện tại ta không có được giá trị trạng thái  $\underline{x}_k$  của hệ mà thay vào đó chỉ đo được giá trị tín hiệu đầu ra  $\underline{y}_k$ . Bởi vậy cần phải xác định  $\hat{\underline{x}}_k$  từ  $\underline{y}_k$  rồi sau đó sử dụng nó thay cho  $\underline{x}_k$ . Chính điều này làm cho các công thức tính  $H_k, \underline{b}_k$  cho ở công thức (2.50) sẽ phải được thay bằng  $\hat{H}_k, \hat{\underline{b}}_k$  như sau:

$$\hat{H}_k = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C}\mathcal{A}_k\bar{B} & \bar{C}\bar{B} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}\mathcal{A}_k^{N-1}\bar{B} & \bar{C}\mathcal{A}_k^{N-2}\bar{B} & \cdots & \bar{C}\bar{B} \end{pmatrix}, \quad \hat{\underline{b}}_k = \begin{pmatrix} \bar{C}\mathcal{A}_k \\ \bar{C}\mathcal{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C}\mathcal{A}_k^N \end{pmatrix} \hat{\underline{z}}_k \quad (2.61)$$

trong đó:

$$\mathcal{A}_k = \begin{pmatrix} I_6 + T_a A(\hat{\underline{x}}_k) & T_a B \\ \mathbf{0}_{2 \times 6} & I_2 \end{pmatrix}, \quad \hat{\underline{z}}_k = \begin{pmatrix} \hat{\underline{x}}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix} = \text{col}(\hat{\underline{x}}_k, \underline{u}_{k-1}). \quad (2.62)$$

Tương ứng, các công thức xác định hàm mục tiêu  $J'_k(\underline{p})$  cho ở (2.54) và tìm nghiệm  $\underline{p}^*$  của nó trong trường hợp bài toán điều khiển không bị ràng buộc cho ở (2.56), để phục vụ việc tính  $\underline{u}_k$ , cũng được sửa đổi thành:

$$J'_k(\underline{p}) = \underline{p}^T \left( \hat{H}_k^T Q_k \hat{H}_k + R_k \right) \underline{p} + 2 \left( \hat{\underline{b}}_k - \underline{r}_k \right)^T Q_k \hat{H}_k \underline{p} \rightarrow \min_{\underline{p}} \quad (2.63)$$

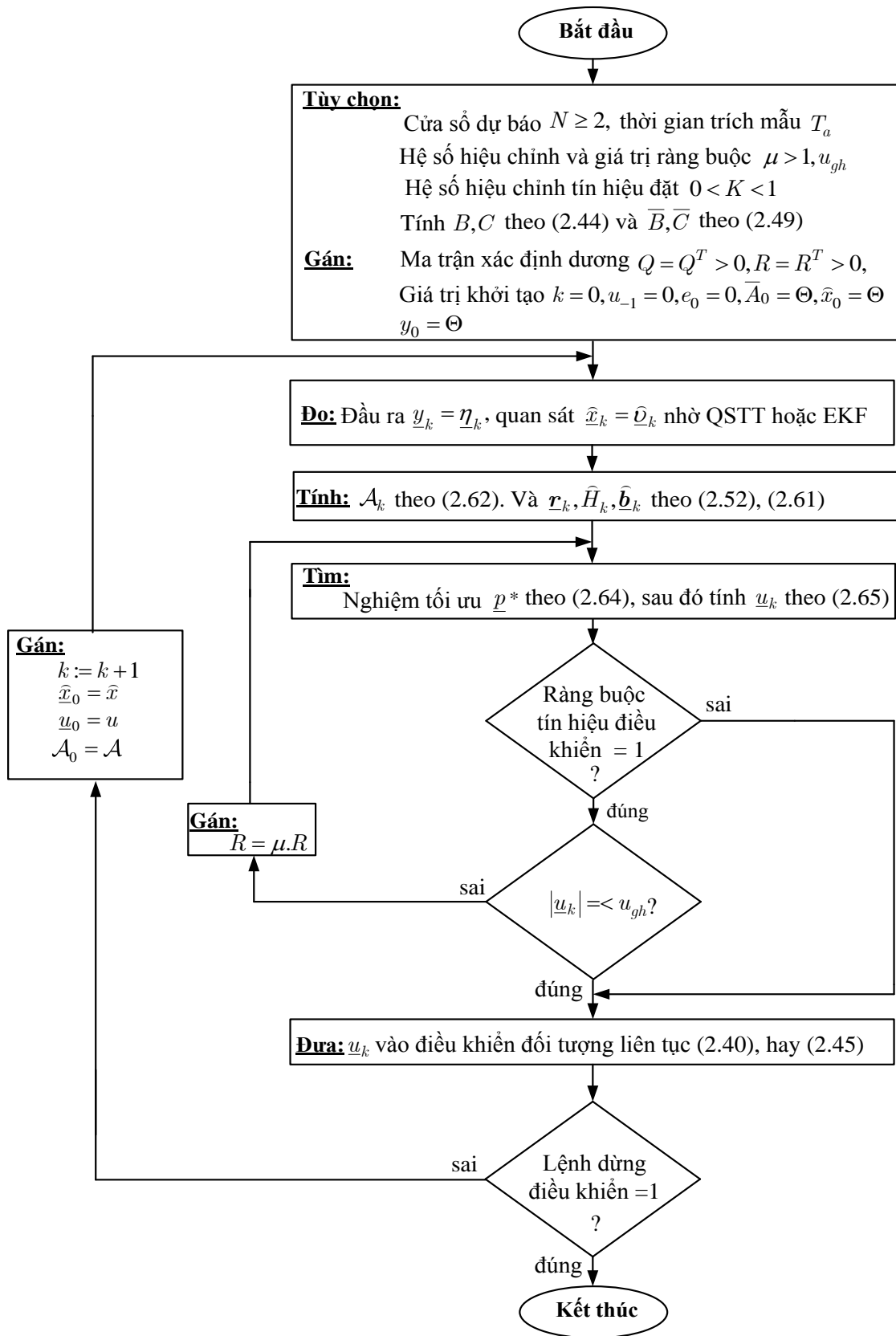
và:

$$\underline{p}^* = \left( \hat{H}_k^T Q_k \hat{H}_k + R_k \right)^{-1} \hat{H}_k^T Q_k \left( \hat{\underline{b}}_k - \underline{r}_k \right). \quad (2.64)$$

Khi đã có  $\underline{p}^*$  ta cũng có được tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k$  tính theo (2.65) như sau:

$$\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} - \left( I_2, \mathbf{0}_{2 \times 2(N-1)} \right) \underline{p}^* \quad (2.65)$$

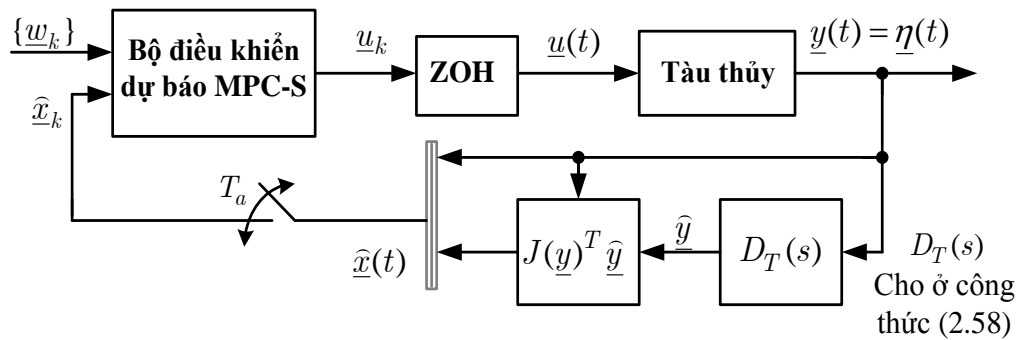




Hình 2.15 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách, điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt (MPC-O).

Tương tự như ở điều khiển phản hồi trạng thái, bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra được luận án ký hiệu là MPC-O, trong đó ký tự O được thêm vào để chỉ rằng nó là bộ điều khiển phản hồi đầu ra (Outputs).

Hình 2.16 dưới đây minh họa cấu trúc điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách sử dụng phương pháp quan sát trạng thái trực tiếp ở Hình 2.10. Để nhấn mạnh rằng bộ điều khiển dự báo này, về bản chất chỉ là sự ghép nối của thuật toán điều khiển phản hồi trạng thái (thuật toán MPC-S) và bộ quan sát trạng thái trực tiếp, nên ở Hình 2.16 thuật toán MPC-O ở trên đã được tách thành hai khối riêng biệt, gồm một là thuật toán MPC-S phản hồi trạng thái và hai là bộ quan sát trạng thái trực tiếp ở Hình 2.10.



Hình 2.16 Cấu trúc điều khiển MPC-O với bộ quan sát trạng thái trực tiếp.

### 2.3.2.4 Kết quả mô phỏng bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra MPC-O

#### a. Cài đặt thuật toán điều khiển MPC-O-QSTT

Các tham số bộ điều khiển MPC-O được cài đặt như sau:

Cửa sổ dự báo:  $N \geq 2$  (cài đặt  $N = 5$ )

Thời gian trượt (receding horizon)  $T_a = 0.1(s)$

Tham số hiệu chỉnh tín hiệu đặt  $0 < K < 1$  (cài đặt  $K = 0.5$ )

Tín hiệu điều khiển ban đầu  $u_{-1}$  ở thời điểm  $t_{-1}$  (đặt  $u_{-1} = 0$ )

Ma trận xác định dương  $Q, R$ , (đặt  $Q = \text{diag}([50; 50; 100])$ ,  $R = \text{diag}([1; 1])$ )

Cài đặt ràng buộc tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $u_{gh}$ , giả thiết độ lớn ràng buộc là  $u_{gh} = \tau_{r.gh} = 1,7 \cdot 10^5 (N.m)$  với quỹ đạo hình tròn,

$$u_{gh} = \tau_{r.gh} = 1,7 \cdot 10^4 (N.m) \text{ với quỹ đạo hình sin.}$$

Giá trị ban đầu của quỹ đạo đặt và quỹ đạo vị trí tàu:

Quỹ đạo hình tròn:  $x_d(0) = 0, y_d(0) = 50, \psi_d(0) = 0$

$x(0) = 0, y(0) = 50, \psi(0) = 0, u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$

Quỹ đạo hình sin:  $x_d(0) = 5, y_d(0) = 30, \psi_d(0) = 0$

$x(0) = 5, y(0) = 30, \psi(0) = 0, u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$

Giá trị quan sát trạng thái ban đầu  $\hat{u}(0), \hat{v}(0), \hat{r}(0)$  của bộ QSTT:

Quỹ đạo hình tròn:  $\hat{u}(0) = 0, \hat{v}(0) = 0, \hat{r}(0) = 0$

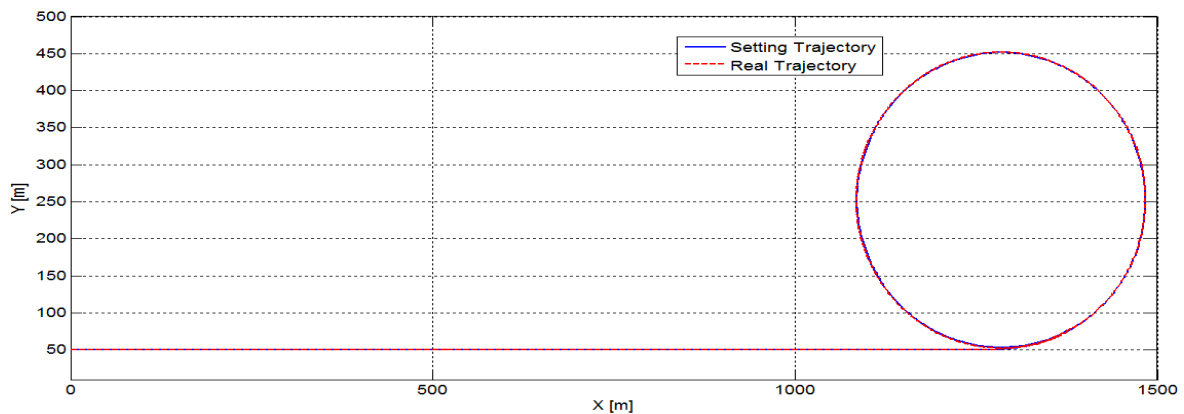
Quỹ đạo hình sin:  $\hat{u}(0) = 0, \hat{v}(0) = 0, \hat{r}(0) = 0$

(trong đó  $\hat{u}, \hat{v}, \hat{r}$  là giá trị trạng thái quan sát được từ  $u, v, r$  bởi bộ QSTT)

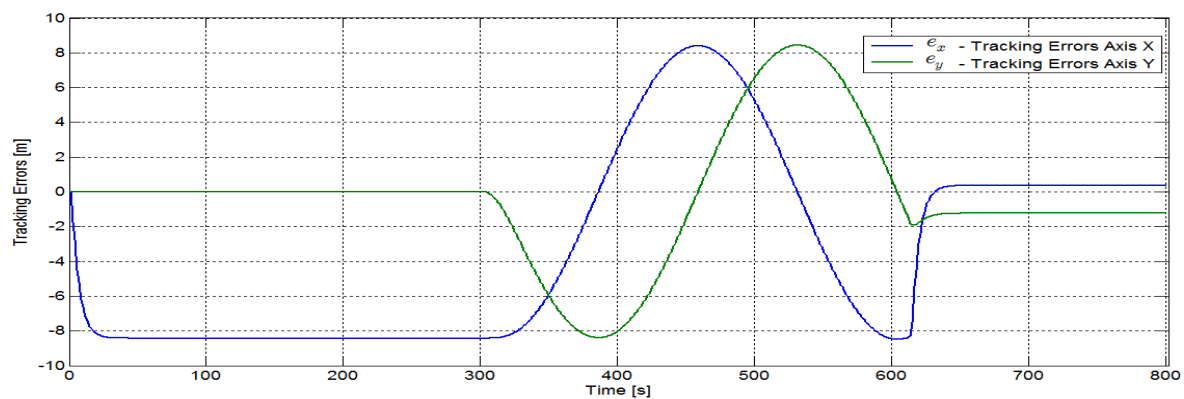
Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển MPC-O được đưa ra trong phần phụ lục 3 của luận án.

## b. Kết quả mô phỏng và đánh giá chất lượng

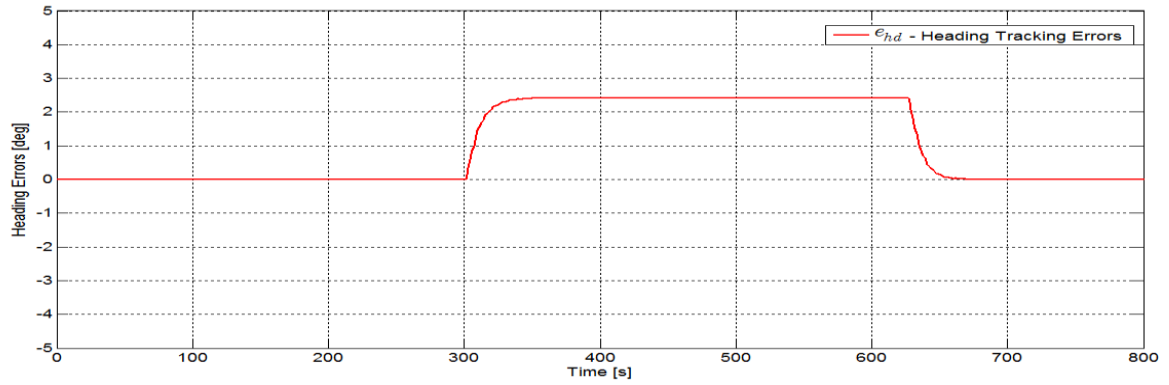
### Kết quả mô phỏng với quỹ đạo hình tròn



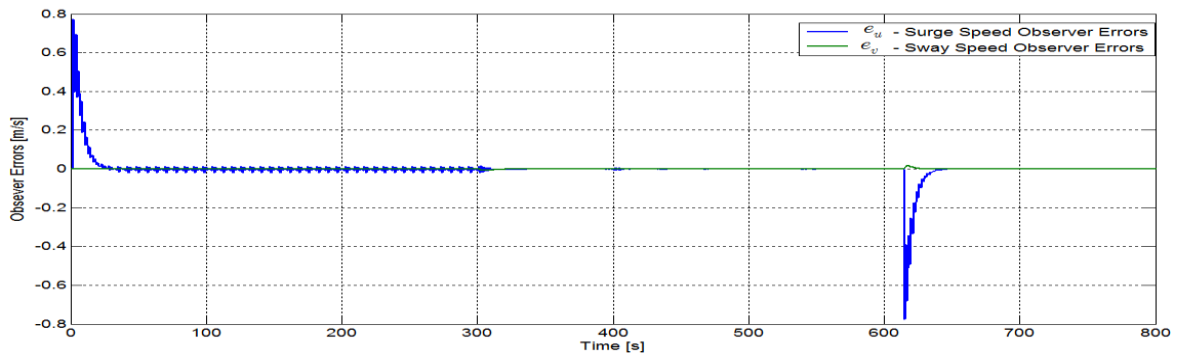
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



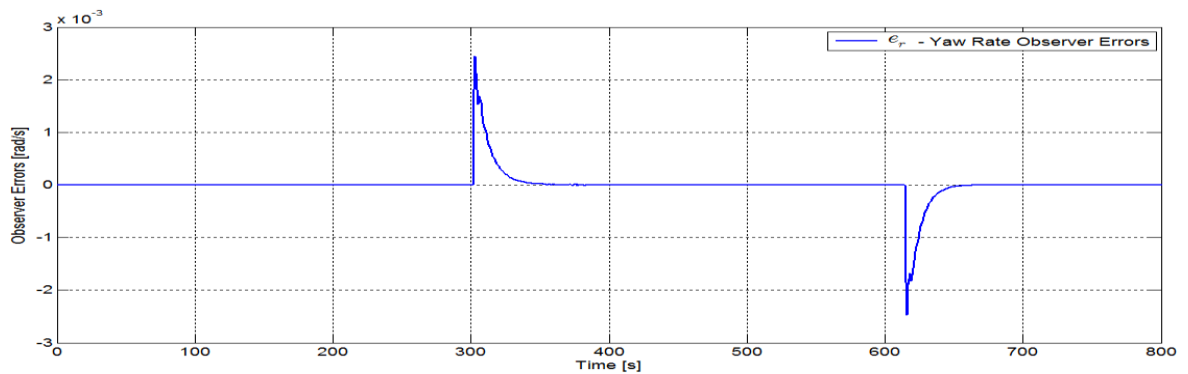
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



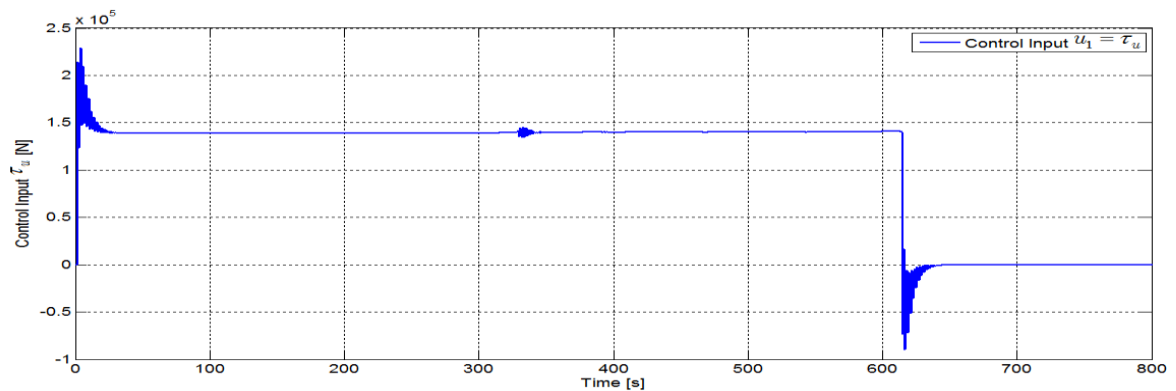
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



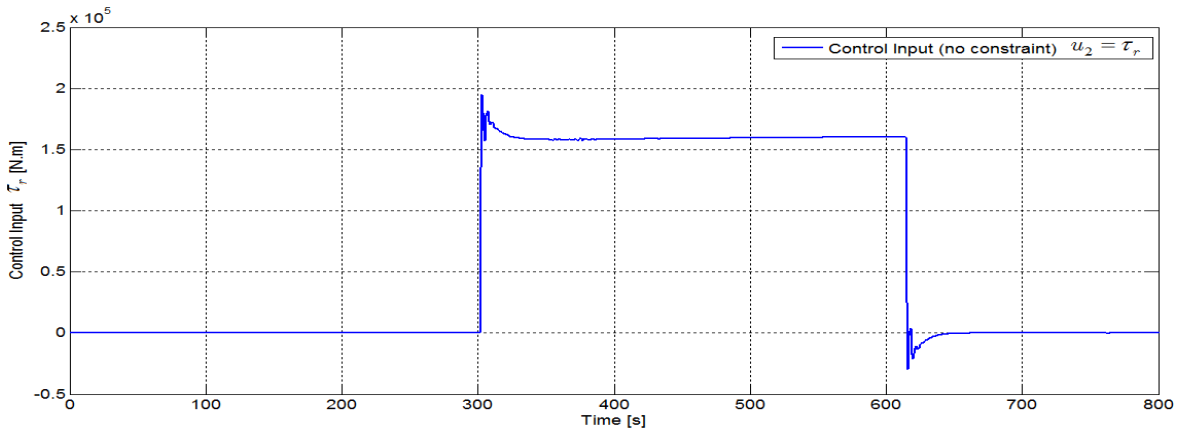
d) Sai lệch bám quan sát tốc độ trượt dọc, ngang – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



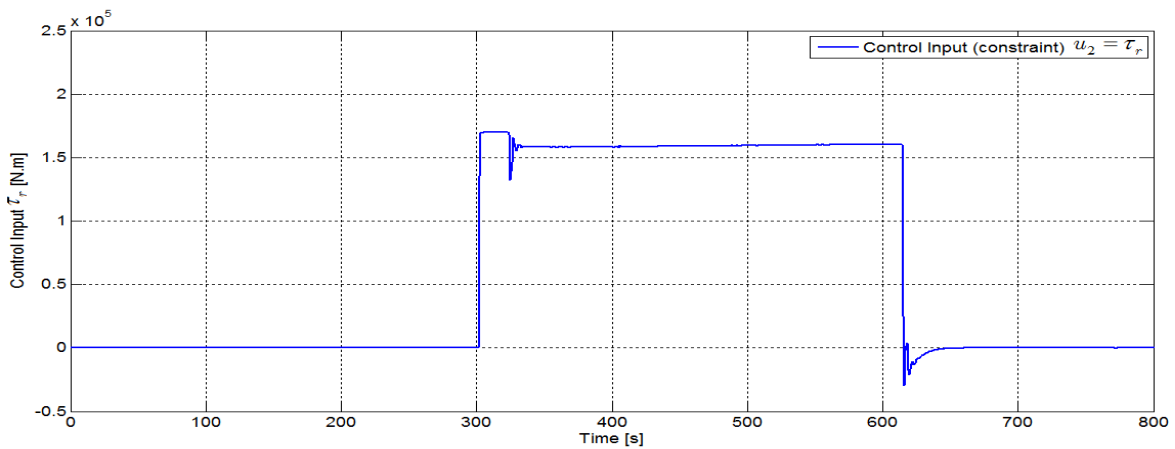
e) Sai lệch bám quan sát tốc độ quay trở – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



f) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



g) Tín hiệu điều khiển mô-men  $\tau_r$  không ràng buộc – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)



h) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  có ràng buộc với giả thiết giá trị ràng buộc  $-1,7.10^5 (N.m) \leq \tau_r \leq 1,7.10^5 (N.m)$  – quỹ đạo hình tròn (MPC-O)

Hình 2.17 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-O-QSTT với quỹ đạo hình tròn

**Nhận xét:**

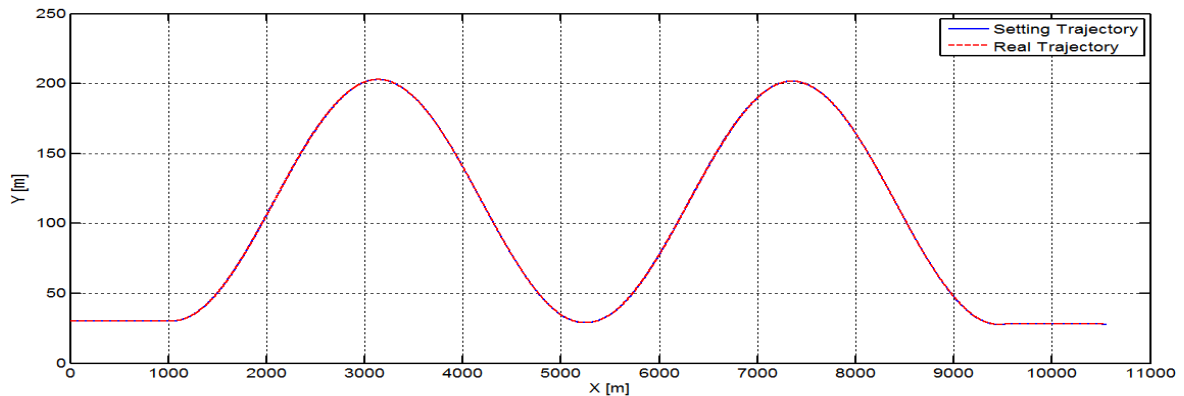
Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-O-QSTT với quỹ đạo hình tròn cho thấy tín hiệu quỹ đạo đầu ra bám tốt theo quỹ đạo đặt kể cả khi tín hiệu điều khiển  $u_2 = \tau_r$  có ràng buộc với giả thiết giá trị ràng buộc là:

$$-1,7.10^5 (N.m) \leq \tau_r \leq 1,7.10^5 (N.m).$$

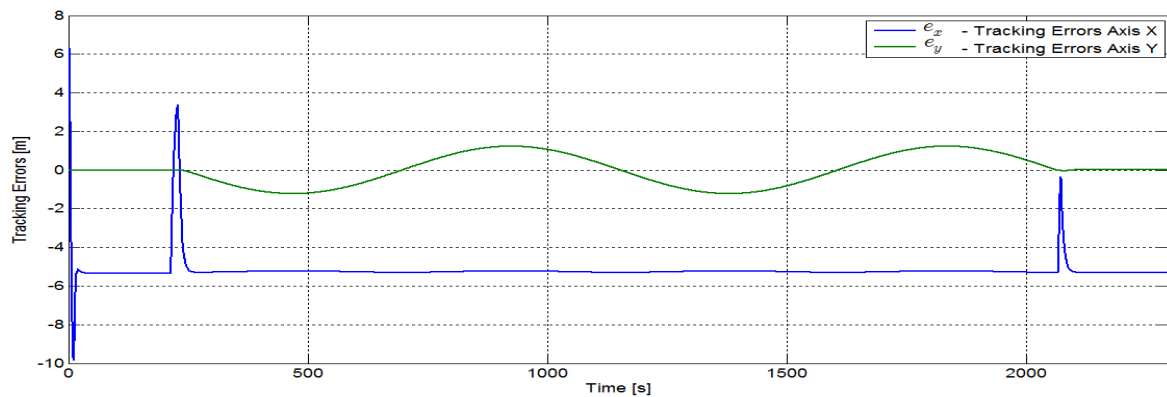
Sai lệch bám quỹ đạo  $e_x, e_y$ , sai lệch bám hướng  $e_{hd}$  nhỏ. Sai lệch bám quỹ đạo lớn nhất khoảng 8.5m, sai lệch bám hướng lớn nhất khoảng 2,5 độ. Các sai lệch này là nhỏ so với quỹ đạo chuyển động của tàu (đường tròn bán kính 200m). Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở có dao động và độ quá chỉnh nhỏ ở thời điểm tàu

vào và ra khỏi quỹ đạo hình tròn, lý do bởi vì trạng thái  $\underline{x}_2 = \underline{v} = [u \ v \ r]^T$  trong bộ điều khiển MPC-O-QSTT không đo đạc được mà có được thông qua bộ QSTT. Số lần mô-men quay trở thay đổi ở thời điểm từ 300s đến 400s và từ 620s đến 720s nằm trong giới hạn quy định số lần bẻ lái (trùng đương với số lần mô-men quay trở thay đổi) trên một đơn vị thời gian ở chế độ lái tự động tàu thủy (số lần bẻ lái tối đa 350 lần/1 giờ).

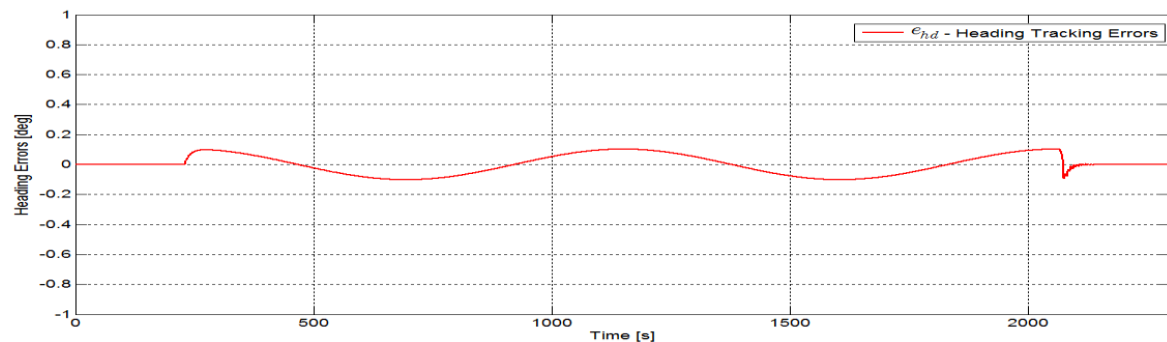
### Kết quả mô phỏng với quỹ đạo hình sin



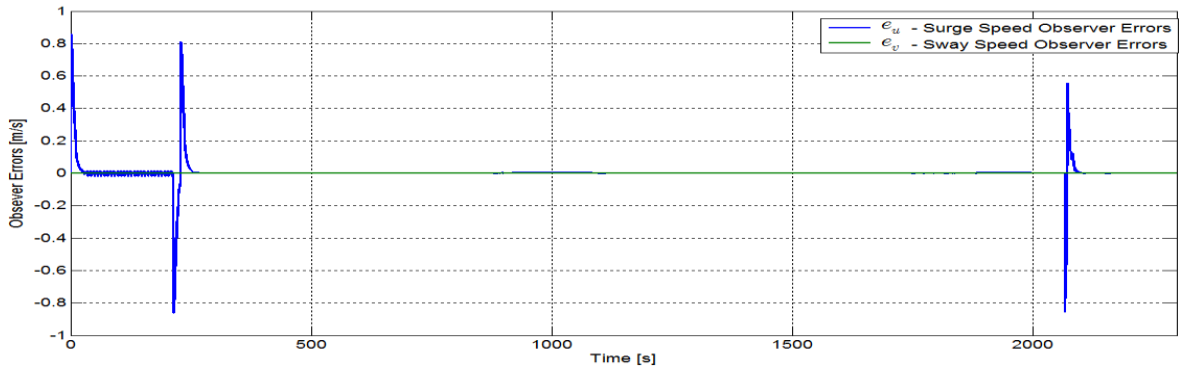
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



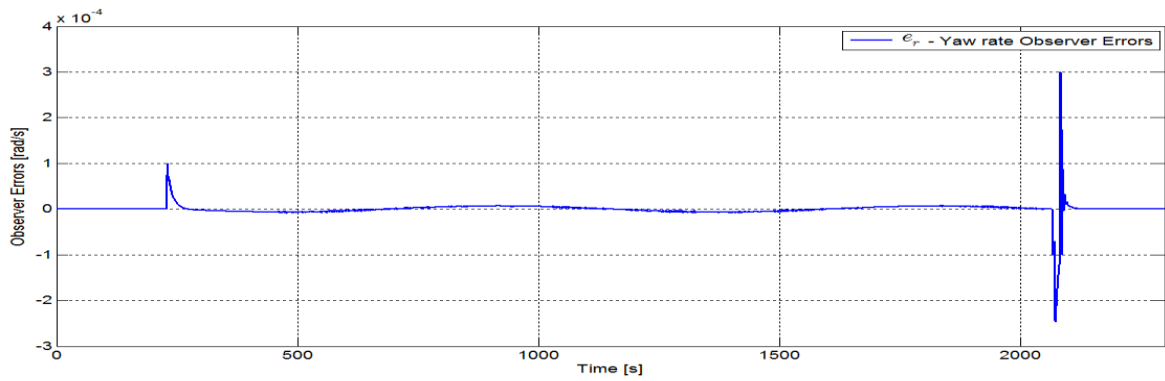
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



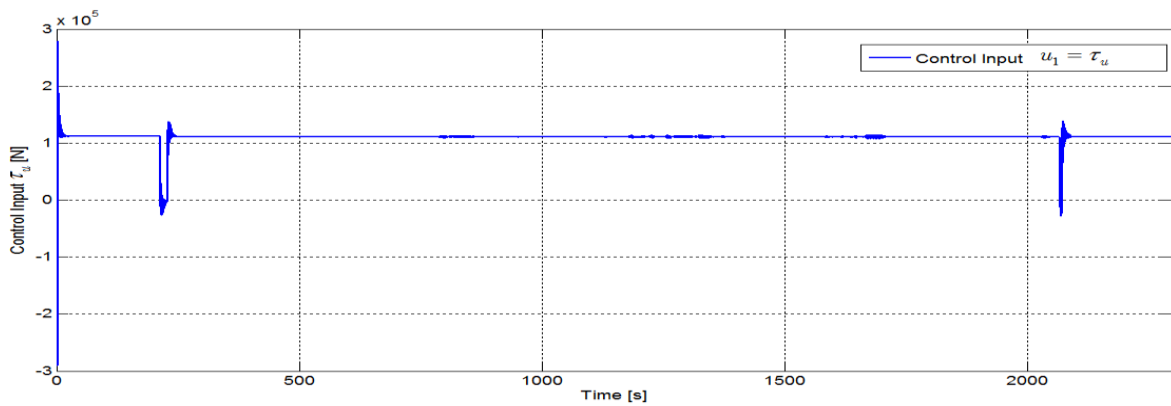
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



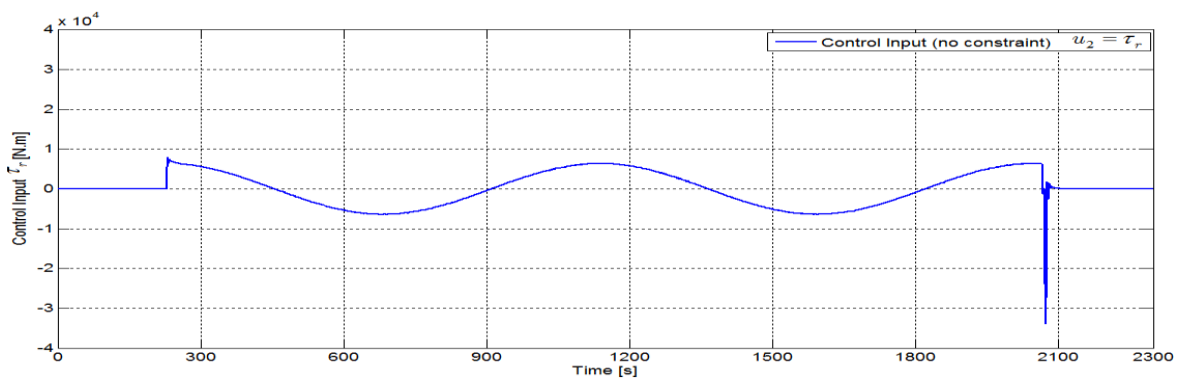
d) Sai lệch bám quan sát tốc độ trượt dọc, ngang – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



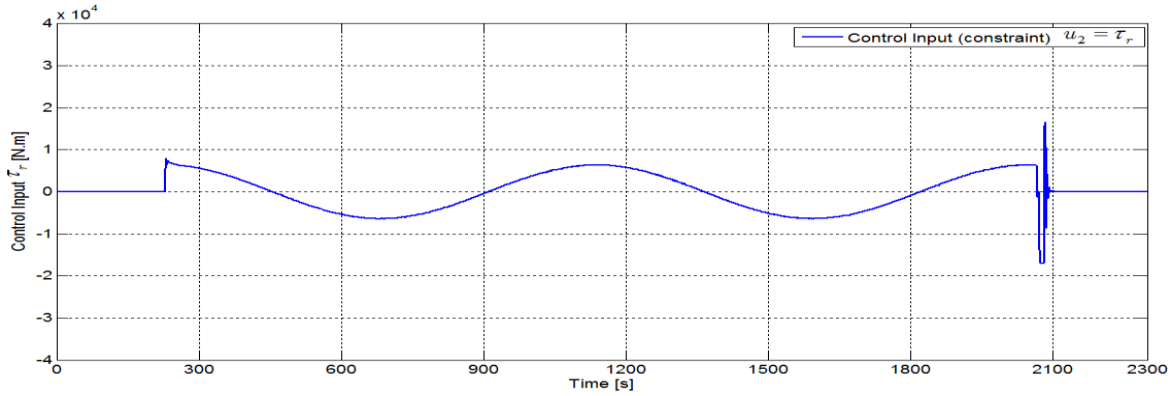
e) Sai lệch bám quan sát tốc độ quay trở – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



f) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



g) Tín hiệu điều khiển mô-men  $\tau_r$  không ràng buộc – quỹ đạo hình sin (MPC-O)



h) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  có ràng buộc với giả thiết giá trị ràng buộc  $-1,7 \cdot 10^4 (N.m) \leq \tau_r \leq 1,7 \cdot 10^4 (N.m)$  – quỹ đạo hình sin (MPC-O)

Hình 2.18 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC-O-QSTT với quỹ đạo hình sin.

#### Nhận xét:

Từ kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-O-QSTT với quỹ đạo hình sin cho thấy tín hiệu quỹ đạo đầu ra bám tốt theo quỹ đạo đặt khi tín hiệu điều khiển  $u_2 = \tau_r$  có ràng buộc với giả thiết ràng buộc  $-1,7 \cdot 10^4 (N.m) \leq \tau_r \leq 1,7 \cdot 10^4 (N.m)$ .

Sai lệch bám quỹ đạo  $e_x, e_y$  lớn nhất khoảng 5.5m, sai lệch này là nhỏ so với quỹ đạo chuyển động của tàu, sai lệch bám hướng  $e_{hd}$  (lớn nhất là 0,1 độ) nhỏ. Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở có dao động nhỏ, số lần mô-men thay đổi nằm trong giới hạn cho phép về số lần bẻ lái trên một đơn vị thời gian.

Chất lượng bộ điều khiển MPC-O-QSTT còn phụ thuộc vào việc chọn ma trận xác định dương  $R, Q$ , cửa sổ dự báo  $N$  và khoảng thời gian trượt  $T_a$ .

Như vậy, trường hợp các biến trạng thái  $u, v, r$  trong mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang không đo đạc hay xác định được trực tiếp thì việc sử dụng bộ điều khiển MPC-O (kết hợp giữa MPC-S và bộ quan sát trạng thái trực tiếp) để điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo cũng cho kết quả tốt.



## 2.4 Chứng minh tính ổn định hệ điều khiển dự báo đề xuất

Quay lại xét bộ điều khiển phản hồi trạng thái  $\underline{u}_k(z_k)$  được xây dựng theo thuật toán MPC đã trình bày ở mục trên để điều khiển hệ phi tuyến (2.66) (có cấu trúc song tuyến – bilinear giống như cấu trúc mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt ngang):

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k \end{cases} \quad (2.66)$$

sao cho đầu ra  $\underline{y}_k$  của nó bám theo được quỹ đạo tín hiệu mẫu  $\underline{w}_k$  cho trước. Khác với những thuật toán điều khiển dự báo phi tuyến khác, thuật toán MPC đề xuất của luận án được xây dựng trên nền tuyến tính hóa từng đoạn trên trục thời gian hệ song tuyến trên tại từng thời điểm  $k = 0, 1, \dots$  thành:

$$\begin{cases} z_{k+1} = \mathcal{A}_k z_k + \mathcal{B}_k \Delta u_k \\ \underline{y}_k = \mathcal{C}_k z_k \end{cases} \quad (2.67)$$

với  $z_k = \begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix}$ ,  $\mathcal{A}_k = \begin{pmatrix} A(\underline{x}_k) & B(\underline{x}_k) \\ 0 & I \end{pmatrix}$ ,  $\mathcal{B}_k = \begin{pmatrix} B(\underline{x}_k) \\ I \end{pmatrix}$ ,  $\mathcal{C}_k = (C, 0)$

rồi sau đó sử dụng thuật toán MPC tuyến tính trong cửa sổ dự báo hiện tại để xác định tín hiệu điều khiển  $\underline{u}_k(z_k)$  ở thời điểm  $k$  đó.

Điều này cho phép số các phép tính phải thực hiện trong một vòng lặp ứng với  $k = 0, 1, \dots$  giảm đi đáng kể, mà nhất là thay vì phải tìm nghiệm bài toán tối ưu phi tuyến thì ở đây ta chỉ cần tìm nghiệm của bài toán tối ưu tuyến tính.

Tiếp theo, ta sẽ chứng minh bộ điều khiển MPC của luận án, khi đã làm cho đầu ra của hệ tuyến tính hóa từng đoạn (2.67) tiệm cận được tới dãy giá trị tín hiệu đặt  $\underline{w}_k$ ,  $k = 0, 1, \dots$  thì nó cũng làm cho đầu ra của hệ song tuyến (2.66) ban đầu cũng tiệm cận tới tín hiệu đặt đó. Lời chứng minh sau đây sẽ được chia làm hai phần:

*Thứ nhất*, là chứng minh bộ điều khiển MPC đề xuất trong luận án sẽ làm đầu ra của hệ (2.67) tiệm cận tới được dãy giá trị đặt  $\underline{w}_k$ ,  $k = 0, 1, \dots$

*Thứ hai*, ta sẽ chứng minh khi đầu ra của hệ (2.67) bám tiệm cận theo được  $\underline{w}_k$ ,  $k = 0, 1, \dots$  thì đầu ra của hệ (2.66) cũng tiến được về một lân cận nhỏ của dãy giá trị đặt đó.

Trước tiên, ta chứng minh bộ điều khiển dự báo MPC phản hồi trạng thái của luận án, ký hiệu bởi  $\underline{u}_k(z_k)$ , sẽ làm đầu ra của hệ (2.67) tiệm cận tới được  $\underline{w}_k$ ,  $k = 0, 1, \dots$ . Ở đây, do hệ (2.67) có chứa thành phần tích phân, nên một khi có một bộ điều khiển nào đó đã làm hệ kín ổn định tiệm cận thì nó cũng sẽ làm đầu ra  $\underline{y}_k$  của hệ đó bám tiệm cận theo được  $\underline{w}_k$ . Bởi vậy sẽ là đủ nếu ta chỉ cần chứng minh được rằng bộ điều khiển dự báo (thiết kế theo thuật toán MPC ở mục trên) có tín hiệu điều khiển  $\Delta \underline{u}_k$  ở các thời điểm  $k = 0, 1, \dots$  được xác định theo tiêu chuẩn tối ưu trong cửa sổ dự báo tương ứng:

$$J_k = \min \sum_{i=k}^{k+N} \left( z_i^T Q_i z_i + \Delta \underline{u}_i^T R_i \Delta \underline{u}_i \right) \rightarrow \min \text{ với } k = 0, 1, \dots \quad (2.68)$$

sẽ làm ổn định tiệm cận cho riêng thành phần trạng thái của hệ (2.67):

$$z_{k+1} = \mathcal{A}_k z_k + \mathcal{B}_k \Delta \underline{u}_k \quad (2.69)$$

trong đó tất cả các ma trận  $Q_i, R_i$  đều là đối xứng và xác định dương (và tùy chọn).

Không mất tính tổng quát, sau đây ta sẽ chỉ xét trường hợp bài toán tối ưu (2.68) có các ma trận  $Q_i, R_i$  là giống nhau trong tất cả các vòng lặp  $k = 0, 1, \dots$ , tức là có:

$$Q_i = Q_{i+N+1} \text{ và } R_i = R_{i+N+1} \text{ với mọi } i \quad (2.70)$$

Vì bài toán tối ưu (2.68) với tất cả các cặp ma trận  $Q_i, R_i$  xác định dương, có quan hệ  $z_i, \Delta \underline{u}_i$  cho ở (2.69) là tuyến tính, nên nó là bài toán tối ưu toàn phương chặt. Do đó, nó luôn có nghiệm và nghiệm đó là duy nhất. Điều đó nói rằng tín hiệu điều khiển dự báo  $\Delta \underline{u}_k$  của nó ở thời điểm  $k$  hiện tại cũng phải thỏa mãn các tính chất của nguyên lý tối ưu Bellman, tức là nó cũng phải thỏa mãn:

$$\Delta \underline{u}_k = -\mathcal{R}_k z_k \text{ với } \mathcal{R}_k = \left( R_k + \mathcal{B}_k^T L_k \mathcal{B}_k \right)^{-1} \mathcal{B}_k^T L_k \mathcal{A}_k \quad (2.71)$$

trong đó ma trận  $L_k$  là ma trận được xác định ngược từng bước từ điểm cuối  $i = k + N$  tới điểm đầu  $i = k$  trong mỗi vòng lặp theo công thức:

$$L_i = Q_{k+i} + \mathcal{A}_k^T L_{i+1} \mathcal{A}_k - \mathcal{A}_k^T L_{i+1} \mathcal{B}_k \left( R_{k+i} + \mathcal{B}_k^T L_{i+1} \mathcal{B}_k \right)^{-1} \mathcal{B}_k^T L_{i+1} \mathcal{A}_k \quad (2.72)$$

mà ở đó  $i = k + N, \dots, k$  và điều kiện biên ở cuối vòng lặp là  $L_{k+N+1} = \mathbf{0}$  (ma trận có tất cả các phần tử bằng 0).

Có thể thấy từ công thức (2.72) rằng do  $Q_{k+i}, R_{k+i}$  xác định dương nên các nghiệm lặp  $L_i$ ,  $k \leq i \leq k+N-1$  cũng đều là ma trận đối xứng xác định dương, trong đó tất nhiên là có cả  $L_k$ . Khi đó, nếu sử dụng hàm xác định dương:

$$V_k(z_k) = z_k^T L_k z_k \quad (2.73)$$

thì theo nguyên lý quy hoạch động, cũng như với quy ước (2.70), bộ điều khiển phản hồi trạng thái tối ưu (2.71) sẽ thỏa mãn:

$$\begin{aligned} V_k(z_k) &= z_k^T L_k z_k = \min_{\underline{u}_k, \dots, \underline{u}_{k+N}} \sum_{i=k}^{k+N} \left( z_i^T Q_i z_i + \Delta \underline{u}_i^T R_i \Delta \underline{u}_i \right) \\ &= z_k^T Q_k z_k + \Delta \underline{u}_k^T R_k \Delta \underline{u}_k + \min_{\underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N}} \sum_{i=k+1}^{k+N} \left( z_i^T Q_i z_i + \Delta \underline{u}_i^T R_i \Delta \underline{u}_i \right) \\ &= \left[ z_k^T Q_k z_k + \Delta \underline{u}_k^T R_k \Delta \underline{u}_k - \left( z_{k+N+1}^T Q_{k+N+1} z_{k+N+1} + \Delta \underline{u}_{k+N+1}^T R_{k+N+1} \Delta \underline{u}_{k+N+1} \right) \right] + \\ &+ \left[ z_{k+N+1}^T Q_{k+N+1} z_{k+N+1} + \Delta \underline{u}_{k+N+1}^T R_{k+N+1} \Delta \underline{u}_{k+N+1} + \min_{\underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N}} \sum_{i=k+1}^{k+N} \left( z_i^T Q_i z_i + \Delta \underline{u}_i^T R_i \Delta \underline{u}_i \right) \right] \\ &\geq \left[ (z_k - z_{k+N+1})^T Q_k (z_k - z_{k+N+1}) + (\Delta \underline{u}_k - \Delta \underline{u}_{k+N+1})^T R_k (\Delta \underline{u}_k - \Delta \underline{u}_{k+N+1}) \right] + \\ &+ \min_{\underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N+1}} \sum_{i=k+1}^{k+N+1} \left( z_i^T Q_i z_i + \Delta \underline{u}_i^T R_i \Delta \underline{u}_i \right) \\ &= \alpha_k(z_k) + V_{k+1}(z_{k+1}) \end{aligned}$$

trong đó:

$$\alpha(z_k) = (z_k - z_{k+N+1})^T Q_k (z_k - z_{k+N+1}) + (\Delta \underline{u}_k - \Delta \underline{u}_{k+N+1})^T R_k (\Delta \underline{u}_k - \Delta \underline{u}_{k+N+1})$$

Nhưng vì  $Q_k, R_k$  là hai ma trận xác định dương, nên  $\alpha_k(z_k)$  là hàm xác định dương. Suy ra:

$$-\alpha_k(z_k) \geq V_{k+1}(z_{k+1}) - V_k(z_k)$$

là hàm xác định âm. Vậy theo tiêu chuẩn Lyapunov, hệ kín gồm đối tượng điều khiển tuyến tính hóa từng đoạn trên trục thời gian, mô tả bởi mô hình (2.69) và bộ điều khiển dự báo  $\Delta \underline{u}_k(z_k)$  phản hồi trạng thái, là ổn định tiệm cận.

Bây giờ ta chuyển sang bước 2 là chứng minh bộ điều khiển dự báo  $\Delta \underline{u}_k(z_k)$  cũng sẽ làm đầu ra  $\underline{y}_k$  của hệ song tuyến gốc ban đầu cho ở công thức (2.66) bám

theo được tín hiệu đặt  $\underline{w}_k$ ,  $k = 0, 1, \dots$ . Ký hiệu sai lệch trạng thái khi tuyến tính hóa từng đoạn mô hình trong từng khoảng cửa sổ dự báo là  $\underline{\Delta}_k$ . Khi đó thành phần trạng thái của hệ (2.66) sẽ biểu diễn được chính xác bởi:

$$\underline{z}_{k+1} = \mathcal{A}_k \underline{z}_k + \mathcal{B}_k \underline{\Delta} \underline{u}_k + \underline{\Delta}_k \quad (2.74)$$

Với mô hình thay thế chính xác (2.74) này (mà bản chất chính là mô hình tương đương) thì việc chứng minh đầu ra  $\underline{y}_k$  của hệ (2.66) bám theo được tín hiệu đặt  $\underline{w}_k$  cũng sẽ được thay tương đương bằng việc chứng minh tính ổn định của hệ (2.74) khi sử dụng bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái  $\underline{\Delta} \underline{u}_k(\underline{z}_k)$ .

Lại sử dụng ứng hàm Lyapunov (2.73) nhưng bây giờ là cho hệ (2.74), ta sẽ có:

$$V_k(\underline{z}_k) \geq \alpha_k(\underline{z}_k) + \underline{\Delta}_k^T L_k \underline{\Delta}_k + V_{k+1}(\underline{z}_{k+1})$$

$$\text{Hay } V_{k+1}(\underline{z}_{k+1}) - V_k(\underline{z}_k) \leq -\alpha_k(\underline{z}_k) - \underline{\Delta}_k^T L_k \underline{\Delta}_k \leq -\alpha_k(\underline{z}_k) + \lambda_{\max} |\underline{\Delta}_k|^2 \quad (2.75)$$

với  $\lambda_{\max} > 0$  là giá trị riêng lớn nhất của  $L_k$ . Điều này chứng tỏ rằng khi véc-tơ trạng thái  $\underline{z}_k$  của hệ (2.74) còn nằm xa gốc tọa độ để có:

$$-\alpha_k(\underline{z}_k) + \lambda_{\max} |\underline{\Delta}_k|^2 < 0 \text{ hay } \alpha_k^{-1}(\lambda_{\max} |\underline{\Delta}_k|^2) < |\underline{z}_k|$$

thì với  $V_{k+1}(\underline{z}_{k+1}) - V_k(\underline{z}_k) < 0$ , trạng thái  $\underline{z}_k$  của hệ (2.76) vẫn có xu hướng tiến về gốc. Nói cách khác, không phụ thuộc giá trị đầu, quỹ đạo trạng thái  $\underline{z}_k$  luôn có xu hướng tiến về một lân cận gốc, ký hiệu bởi  $\mathcal{O}$ , được xác định như sau:

$$\mathcal{O} = \left\{ \underline{z}_k \mid |\underline{z}_k| \leq \alpha_k^{-1}(\lambda_{\max} |\underline{\Delta}_k|^2) \right\} \quad (2.76)$$

Vậy hệ bây giờ là ổn định ISS với tập hút (2.76). Kích thước của tập hút này chỉ phụ thuộc vào sai lệch trạng thái của hai mô hình (2.66) và (2.67) nên chất lượng ổn định ISS trên là chấp nhận được. Trong trường hợp hệ song tuyến (2.66) có các ma trận tham số  $A(\underline{x}_k)$ ,  $B(\underline{x}_k)$  liên tục theo  $\underline{x}_k$  thì khi chu kỳ trích mẫu càng nhỏ, sai lệch trạng thái  $\underline{\Delta}_k$  sẽ càng bé.

## 2.5 Kết luận chương 2

Chương 2 luận án đã trình bày được nguyên lý của điều khiển trượt dọc trên trục thời gian trên nền điều khiển dự báo MPC, các phương pháp nâng cao chất lượng của điều khiển dự báo và tối ưu hóa có ràng buộc.

Đưa ra giải pháp xây dựng bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (MPC-S) và phản hồi đầu ra (MPC-O) cho đối tượng tàu thủy khi mô hình xác định dạng song tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC-S và MPC-O cho chất lượng bám quỹ đạo tốt.

Xây dựng được bộ quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục của đối tượng với giả thiết không có nhiễu đo cho kết quả quan sát bám tốt với tín hiệu thực. Xây dựng thuật toán bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF), đề xuất giải pháp sử dụng bộ quan sát EKF có kết hợp với bộ quan sát trực tiếp trong việc lựa chọn tín hiệu trạng thái chỉ ở bước khởi tạo ban đầu  $x(0)$ . Kết quả mô phỏng cho thấy trong trường hợp tín hiệu trạng thái không có nhiễu đo thì chất lượng bộ quan sát trực tiếp tốt hơn bộ quan sát EKF, còn trường hợp tín hiệu trạng thái có lẫn nhiễu đo thì phương án sẽ sử dụng bộ quan sát EKF.

Chứng minh được tính ổn định của bộ điều khiển dự báo đề xuất trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc trục thời gian.

Tiếp sau đây luận án sẽ mở rộng kết quả của bộ điều khiển MPC-S và MPC-O đã xây dựng khi mô hình xác định để thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định như đã đề cập trong định hướng nghiên cứu của luận án.

### CHƯƠNG 3 ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BÁM QUỠ ĐẠO ĐẶT VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO KHI MÔ HÌNH TÀU CÓ CHỨA THÀNH PHẦN BẤT ĐỊNH

Nội dung chính của chương này, luận án sẽ giải quyết vấn đề thiết kế bộ khiển dự báo trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian để điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định (mô hình bất định).

Từ mục tiêu đó nội dung sẽ nghiên cứu bao gồm: xây dựng mô hình bù bất định và đề xuất thiết kế bộ ước lượng, bù bất định mới. Kết hợp bộ ước lượng, bù thành phần bất định với thuật toán của bộ điều khiển dự báo MPC-S, MPC-O đã xây dựng ở chương 2 để thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám theo quỹ đạo đặt khi mô hình tàu có chứa thành phần bất định.

#### 3.1 Cấu trúc mô hình bù thành phần bất định

Khi phân tích về động lực học tàu thủy trên mặt phẳng ngang, để có thể mô tả được đầy đủ tính chất động lực học của tàu thủy, thì mô hình toán mô tả chuyển động tàu thủy phải xét đến các yếu tố bất định trong mô hình và các thành phần nhiễu ngẫu nhiên từ môi trường tác động tới chuyển động tàu thủy. Các yếu tố bất định trong mô hình đã được phân tích trong mục 1.1.5.2 của luận án. Mô hình tàu có xét đến thành phần bất định như phân tích ở chương 1 được viết lại như sau:

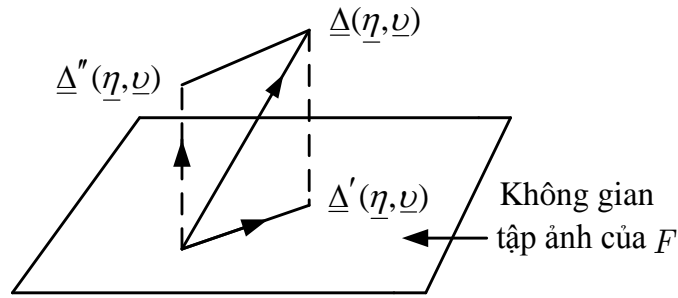
$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = F\underline{\tau} + \underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{v}) \end{cases} \quad (3.1)$$

Trong đó:  $F$  – ma trận phân bố lực, với mô hình toán tàu thủy có dạng thiếu cơ cấu chấp hành như (3.1) thì ma trận phân bố lực đưa ra như sau:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  – là những thành phần bất định (không xác định) trong mô hình toán và nhiễu ngẫu nhiên (được ký hiệu là  $\underline{\tau}_w$  trong (1.21)) từ môi trường tác động vào đối tượng.

Tiếp theo luận án sẽ mở rộng các kết quả từ bộ điều khiển MPC-S, MPC-O đã có ở chương 2 cho trường hợp mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang có chứa thêm thành phần bất định  $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  như mô tả trong (3.1). Thành phần bất định  $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  có thể được biểu diễn trong không gian ảnh như Hình 3.1. Đối tượng nghiên cứu của luận án là mô hình toán tàu thủy dạng thiếu cơ cấu chấp hành, và trong giới hạn luận án chỉ xét đến những thành phần bất định  $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  nào thuộc không gian tập ảnh của  $F$  ký hiệu là  $\underline{\Delta}'(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ , tức là  $\underline{\Delta}'(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \in \text{Im}(F)$  và không xét đến những thành phần bất định nằm ngoài không gian tập ảnh của  $F$ , chẳng hạn như  $\underline{\Delta}''(\underline{\eta}, \underline{\nu}) \notin \text{Im}(F)$ .



Hình 3.1 Biểu diễn không gian ảnh của thành phần bất định  $\underline{\Delta}(\underline{\eta}, \underline{\nu})$ .

Với định hướng đó, mô hình tàu thủy (3.1) được chuyển về dạng song tuyến như đã thực hiện với mô hình tàu xác định trong chương 2 như sau:

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{\eta}} \\ \dot{\underline{\nu}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{\eta}) \\ -G(\underline{\eta}) & -M^{-1}[C(\underline{\nu}) + D(\underline{\nu})] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\eta} \\ \underline{\nu} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix} (\underline{\tau} + \underline{\Delta}'(\underline{\eta}, \underline{\nu})) \quad (3.2)$$

trong đó  $\mathbf{0}_{3 \times 3}$  là ma trận không kiểu  $3 \times 3$  (3 hàng 3 cột).

Đặt các biến mới  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$ ,  $\underline{x}_2 = \underline{\nu}$ ,  $\underline{u} = \underline{\tau}$ ,  $\underline{x} = \text{col}(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$  và  $\underline{d}(\underline{x}, t) = \underline{\Delta}'(\underline{\eta}, \underline{\nu})$  với ngụ ý thành phần bất định là hàm theo thời gian  $\underline{d}(\underline{x}, t)$ : disturbances, và ký hiệu:

$$A(\underline{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{x}_1) \\ -G(\underline{x}_1) & -M^{-1}[C(\underline{x}_2) + D(\underline{x}_2)] \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix}, \quad C = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3}) \quad (3.3)$$

với  $A(\underline{x})$ ,  $B(\underline{x})$  là các ma trận có kiểu lần lượt là  $6 \times 6$  và  $6 \times 2$ , khi đó (3.2) sẽ được viết lại thành:

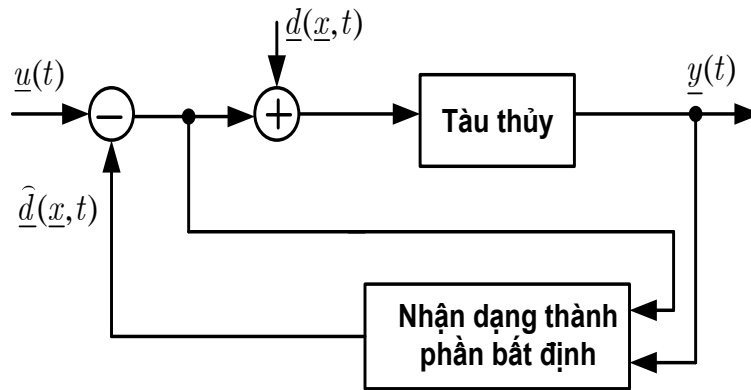
$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B[\underline{u} + \underline{d}(\underline{x}, t)] \\ \underline{y} = C\underline{x} = \underline{\eta} \end{cases} \quad (3.4)$$

trong đó các tham số mô hình  $A(\underline{x}), B, C$  được suy ra từ mô hình gốc ban đầu (3.1).

Nếu so sánh mô hình (3.4) với mô hình xác định đã có ở (2.45) thì ở mô hình có chứa thành phần bất định (3.4) có thêm thành phần bất định  $\underline{d}(\underline{x}, t)$ . Giải pháp của luận án là sẽ nhận dạng và bù thành phần bất định này. Khi đó, nếu ký hiệu kết quả nhận dạng thành phần bất định đó là:

$$\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t) \approx \underline{d}(\underline{x}, t) \text{ với sai lệch } \|\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t) - \underline{d}(\underline{x}, t)\| \leq \delta_e \text{ vô cùng nhỏ,} \quad (3.5)$$

thì sau khi bù  $\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t)$  ở đầu vào cho hệ bất định (3.4), nó sẽ trở về gần giống như hệ có mô hình xác định (2.45) mà luận án đã xây dựng các bộ điều khiển dự báo cho nó. Nói cách khác, sau khi bù bất định ta lại hoàn toàn áp dụng được các thuật toán điều khiển MPC-S hay MPC-O đã có để điều khiển hệ có mô hình bất định như mô tả ở Hình 3.2 dưới đây, mà lúc này được xem như hệ có mô hình xác định (chỉ sai khác một lượng vô cùng bé là  $\delta_e$  ở đầu vào).



Hình 3.2 Bù thành phần bất định cho hệ có mô hình bất định để nó tương đương như hệ có mô hình xác định.



## 3.2 Giải pháp bù thành phần bất định

Thông thường, khi gặp thành phần bất định  $\underline{d}(\underline{x}, t)$  trong mô hình đối tượng điều khiển, phương pháp phổ thông nhất hiện nay được áp dụng là dùng mạng Neural, tức là khối nhận dạng thành phần bất định mô tả trong Hình 3.2 ở trên là một mạng Neural. Ngay cả ở bài toán điều khiển tàu thủy thì cũng đã có rất nhiều tài liệu công bố về ứng dụng mạng Neural RBF (Radial Basis Function) để nhận dạng thành phần bất định  $\underline{d}(\underline{x}, t)$ , kể cả mô hình đủ và thiếu cơ cấu chấp hành giống như đối tượng nghiên cứu của luận án, ví dụ như gần đây nhất là các công trình [14], [63], [68] sử dụng mạng Neural RBF để nhận dạng thành phần nhiễu bất định. Bởi vậy, việc áp dụng mạng Neural để bù bất định sẽ không còn mang tính thời sự và không hứa hẹn có tính mới của luận án.

### 3.2.1 Bù thành phần bất định

Như đã phân tích ở trên, thay vì việc áp dụng mạng Neural để bù thành phần bất định, sau đây luận án sẽ đề xuất riêng một phương pháp ước lượng xấp xỉ  $\widehat{\underline{d}}(\underline{x}, t) \approx \underline{d}(\underline{x}, t)$  trên cơ sở sử dụng mô hình không liên tục của đối tượng, phương pháp này cũng đã được đề cập trong [6]. Cơ sở cho việc đề xuất này dựa trên nhận xét rằng tàu thủy không phải là một hệ biến đổi nhanh, nên giữa hai lần khoảng thời gian trượt (khoảng thời gian này rất nhỏ) ta có thể xem thành phần bất định đó là hằng số, tức là trong suốt quá trình điều khiển  $\underline{d}(\underline{x}, t)$  sẽ được xem như là hàm bất định hằng số từng đoạn.

Xét mô hình tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang dạng mô hình liên tục (3.1). Bây giờ được viết dưới dạng không liên tục ở thời điểm  $k$  hiện tại (nhờ phép biến đổi rời rạc hóa và tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc trục thời gian như đã thực hiện ở chương 2 với mô hình xác định) với thành phần bất định hàm  $\underline{d}_k$  ở đầu vào, nhưng đã được bù bất định bởi tín hiệu bất định đã ước lượng được  $\widehat{\underline{d}}_{k-1}$  có từ vòng điều khiển trước đó như mô tả ở Hình 3.2. Nó sẽ có mô hình là:

$$\underline{v}_k = \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \widehat{B}\left[\underline{u}_{k-1} + \underline{d}_k - \widehat{\underline{d}}_{k-1}\right] \quad (3.6)$$

trong đó:

$$\begin{aligned} \widehat{A}(\underline{v}_k) &= I_3 - T_a M^{-1} [C(\underline{v}_k) + D(\underline{v}_k)] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, \\ \widehat{B} &= T_a M^{-1} F \in \mathbb{R}^{3 \times 2}, \quad \underline{u}_k = \underline{\tau}_k = \underline{\tau}(kT_a), \quad \underline{d}_k = \underline{d}(kT_a) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ký hiệu tiếp mô hình mẫu lý tưởng tương ứng (không chứa thành phần bất định) cũng ở thời điểm  $k$  là:

$$\underline{v}_k = \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \widehat{B}(\underline{u}_{k-1} - \widehat{d}_{k-1}). \quad (3.8)$$

trong đó  $\underline{v}_k$  là trạng thái của mô hình mẫu lý tưởng (không chứa thành phần bất định). Khi đó, do có cùng đầu vào  $\underline{u}_{k-1}$  nên sai lệch  $\underline{\varepsilon}_k = \underline{v}_k - \underline{v}_k$  giữa hai mô hình này hoàn toàn phụ thuộc vào thành phần bất định  $\underline{d}_k$ . Điều đó giúp ta có thể xác định xấp xỉ  $\widehat{\underline{d}}_k \approx \underline{d}_k$  từ sai lệch mô hình  $\underline{\varepsilon}_k$  phục vụ việc bù bất định ở vòng lặp sau, tức là ở thời điểm  $k+1$ .

Từ (3.6) và (3.8) có được sai lệch mô hình  $\underline{\varepsilon}_k = \underline{v}_k - \underline{v}_k$  như sau:

$$\begin{aligned} \underline{\varepsilon}_k &= \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \widehat{B}[\underline{u}_{k-1} + \underline{d}_k - \widehat{d}_{k-1}] - \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} - \widehat{B}(\underline{u}_{k-1} - \widehat{d}_{k-1}) \\ &= \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} - \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \widehat{B}\underline{d}_k \end{aligned} \quad (3.9)$$

Suy ra, trong trường hợp ma trận  $\widehat{B}$  có đủ hạng là 2, thì:

$$\underline{d}_k \approx \widehat{\underline{d}}_k = \left(\widehat{B}^T \widehat{B}\right)^{-1} \widehat{B}^T \left[\underline{\varepsilon}_k - \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1} + \widehat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1}\right] \quad (3.10)$$

và đó chính là công thức xác định xấp xỉ bất định  $\widehat{\underline{d}}_k \approx \underline{d}_k$  từ sai lệch mô hình  $\underline{\varepsilon}_k = \underline{v}_k - \underline{v}_k$ , véc-tơ trạng thái đối tượng  $\underline{v}_{k-1}$  và véc-tơ trạng thái mô hình mẫu  $\underline{v}_{k-1}$ . Trong đó  $\underline{v}_k, \underline{v}_{k-1}$  là đo hoặc quan sát được từ hệ thống và  $\underline{v}_{k-1}, \underline{v}_k$  có từ (3.8). Sau khi có được  $\widehat{\underline{d}}_k$  ta sẽ tiến hành bù đầu vào của hệ (3.4) ở thời điểm  $k+1$  như minh họa ở Hình 3.2.

Ta có thể thấy việc đưa ra mô hình bất định (3.4) không hạn chế nhiều về tính tổng quát của nó, khi mà thành phần bất định lại nằm trong ma trận tham số  $A(\underline{x})$ , tức là khi đó có  $A(\underline{x}, \underline{d})$  thay vì chỉ có  $A(\underline{x})$  trong mô hình (3.4). Đây là trường hợp mà ma trận  $D(\underline{v})$  hoặc cũng có thể là ma trận  $M, C(\underline{v})$  trong mô hình liên tục (3.1) của mô hình tàu ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang có chứa thêm tham số bất định như luận án đã đề cập trong chương 1. Lúc này, trong trường hợp hệ là thiếu cơ cấu chấp hành, song nếu thành phần bất định  $\underline{d}$  đó lại thuộc không gian ảnh  $\text{Im}(B)$ , tức là  $\underline{d} \in \text{Im}(B)$ , thì ta luôn viết lại hệ đã cho thành:

$$\begin{aligned}
A(\underline{x}, \underline{d})\underline{x} &= A'(\underline{x})\underline{x} + \left[ A(\underline{x}, \underline{d}) - A'(\underline{x}) \right] \underline{x} \\
&= A'(\underline{x})\underline{x} + \underline{d}
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

với  $\underline{d} = B\underline{d}' = \left[ A(\underline{x}, \underline{d}) - A'(\underline{x}) \right] \underline{x}$ ,

trong đó  $\underline{d}'$  là thành phần bất định mới thay cho  $\underline{d}$  ban đầu và  $A'(\underline{x})$  là thành phần ma trận tham số không chứa  $\underline{d}$  của  $A(\underline{x}, \underline{d})$ . Vậy khi đó bài toán lại trở về dạng có bất định nằm ở kênh đầu vào như của mô hình (3.4).

### 3.2.2 Mô phỏng bộ ước lượng bù bất định

#### Cài đặt tham số bộ ước lượng bù bất định

Các thông số cài đặt bộ ước lượng bù bất định bao gồm:

Thời gian lấy mẫu  $T_a = 0.01 - 0.2$  (s), và cũng là khoảng thời gian trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển (receding horizon), thời gian lấy mẫu càng ngắn thì độ chính xác ước lượng càng cao.

Giá trị ước lượng ban đầu  $\underline{\hat{d}}(0)$ . Trong đó  $\underline{\hat{d}}$  là giá trị bất định ước lượng được từ tín hiệu bất định  $\underline{d}$  của bộ ước lượng bất định.

Để kiểm tra chất lượng bộ ước lượng thành phần bất định đã xây dựng. Luận án tiến hành thử nghiệm với hai trường hợp tín hiệu bất định khác nhau.

*Thứ nhất:* tín hiệu bất định hàm ở đầu vào là các nhiễu bất định từ bên ngoài môi trường tác động vào (bất định này tương đương với các tác động của sóng, gió, dòng chảy...). Dạng tín hiệu bất định này được thử nghiệm gồm các loại: hình sin (giống như các tài liệu [14] và [21] đã thử nghiệm), dạng bất định ngẫu nhiên (random), dạng bất định xung vuông.

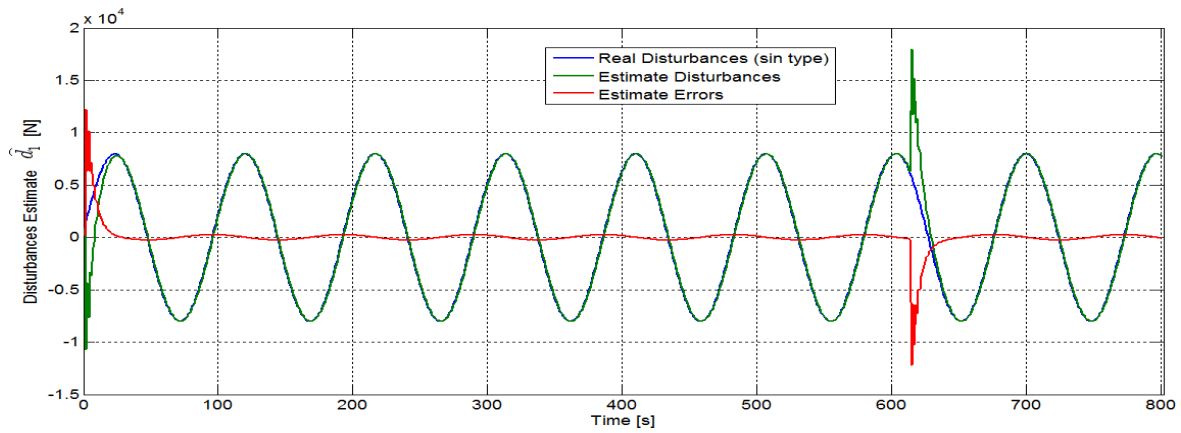
*Thứ hai:* tín hiệu bất định là thành phần sinh ra từ mô hình do sự thay đổi của ma trận thủy động lực học  $D(\underline{v})$  (tức là trường hợp bất định nằm ở ma trận  $A(\underline{x}, \underline{d})$  của (3.4)) như đã đề cập trong mục 1.1.5.2 chương 1 của luận án.

### 3.2.2.1 Mô phỏng kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định dạng hàm bất định tác động từ bên ngoài

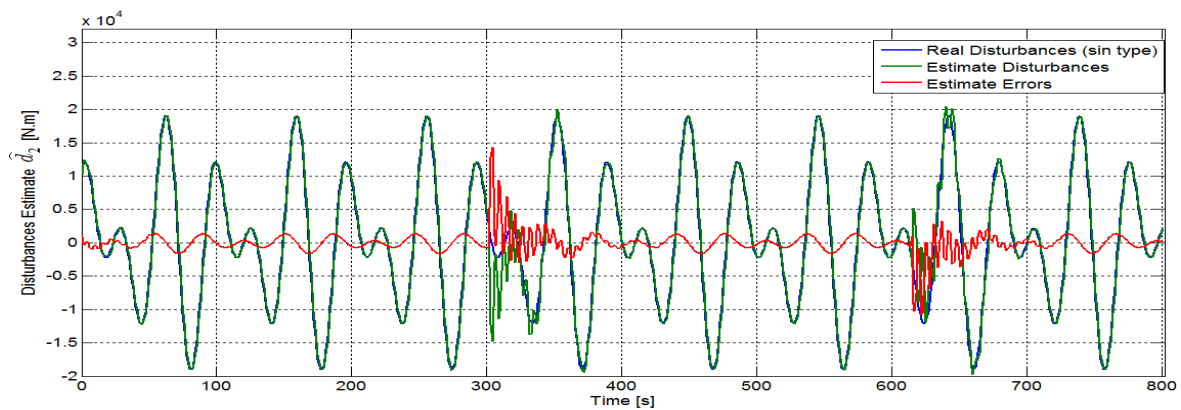
#### Kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định dạng hình sin

Giả thiết tín hiệu bất định gồm 2 thành phần  $d = (d_1, d_2)$ ,  $d_1$  có tác động tương đương với lực gây ra trượt dọc ( $\tau_u$ ) và  $d_2$  có tác động tương đương với mô-men quay trở ( $\tau_r$ ) có độ lớn và dạng như sau:  $d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01).10^6$  (N),

$$d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)).10^6$$
 (N.m)



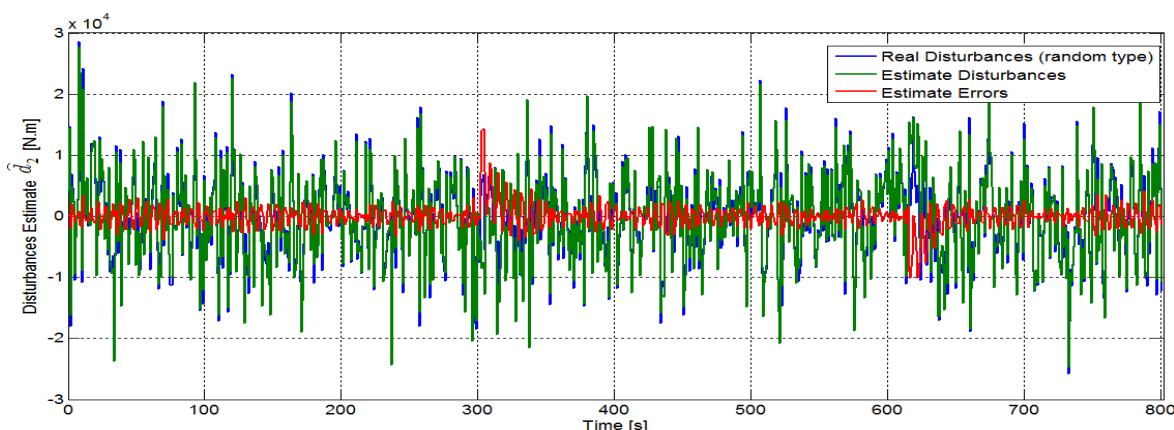
a) Kết quả mô phỏng tín hiệu ước lượng được  $\hat{d}_1$  từ thành phần bất định  $d_1$



b) Kết quả mô phỏng tín hiệu ước lượng được  $\hat{d}_2$  từ thành phần bất định  $d_2$

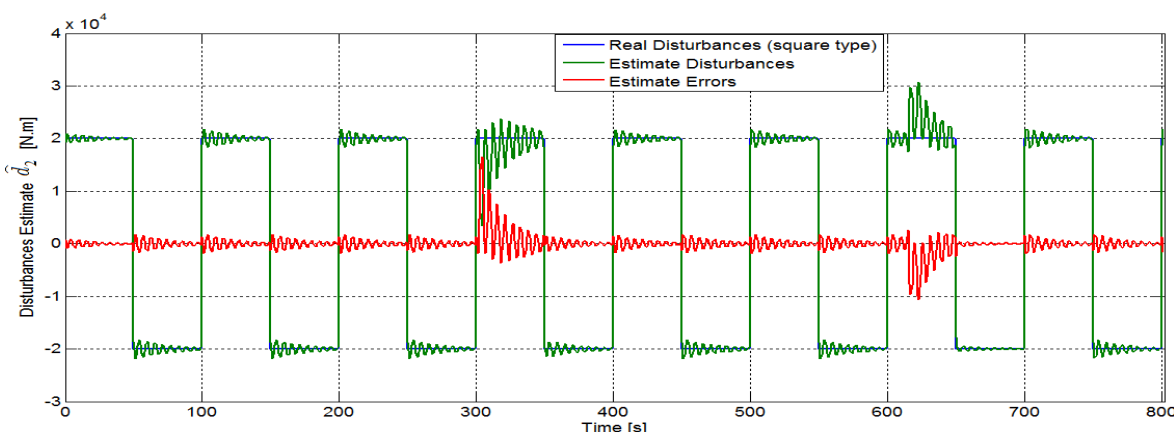
Hình 3.3 Kết quả mô phỏng ước lượng  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  từ thành phần bất định  $d_1, d_2$  với tín hiệu bất định giả thiết dạng sóng hình Sin.

### Kiểm chứng bộ ước lượng khi tín hiệu bất định dạng ngẫu nhiên (random)



Hình 3.4 Kết quả mô phỏng tín hiệu ước lượng được  $\hat{d}_2$  từ thành phần bất định  $d_2$  với tín hiệu bất định giả thiết dạng tín hiệu Random

### Kiểm chứng bộ ước lượng khi tín hiệu bất định dạng xung vuông



Hình 3.5 Kết quả mô phỏng tín hiệu ước lượng được  $\hat{d}_2$  từ thành phần bất định  $d_2$  với tín hiệu bất định giả thiết dạng xung vuông

#### Nhận xét

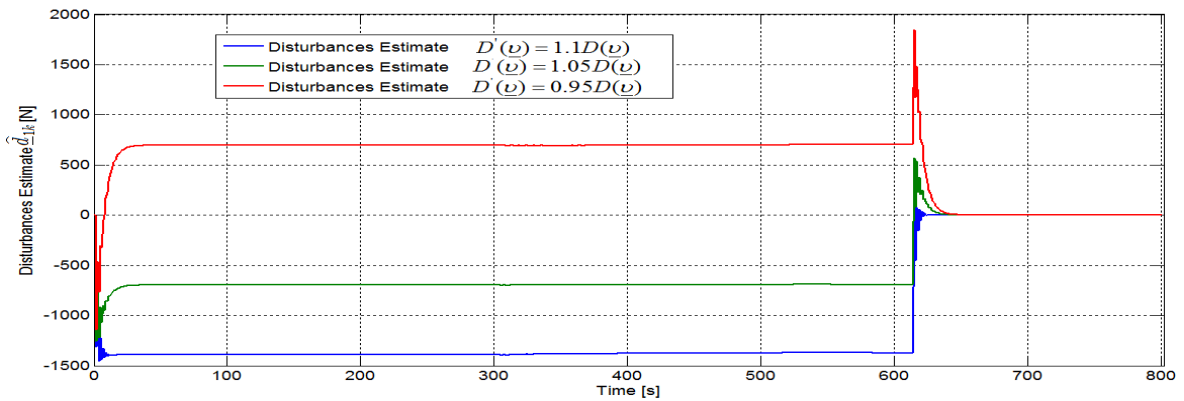
Từ kết quả mô phỏng bộ ước lượng bất định với các tín hiệu bất định tác động từ bên ngoài khác nhau cho thấy, tín hiệu bất định ước lượng được  $\hat{d}$  từ bộ ước lượng bám tốt tín hiệu bất định giả thiết  $d$ , với sai lệch bám ước lượng nhỏ.

#### 3.2.2.2 Mô phỏng kiểm chứng bộ ước lượng với tín hiệu bất định sinh ra từ mô hình đối tượng

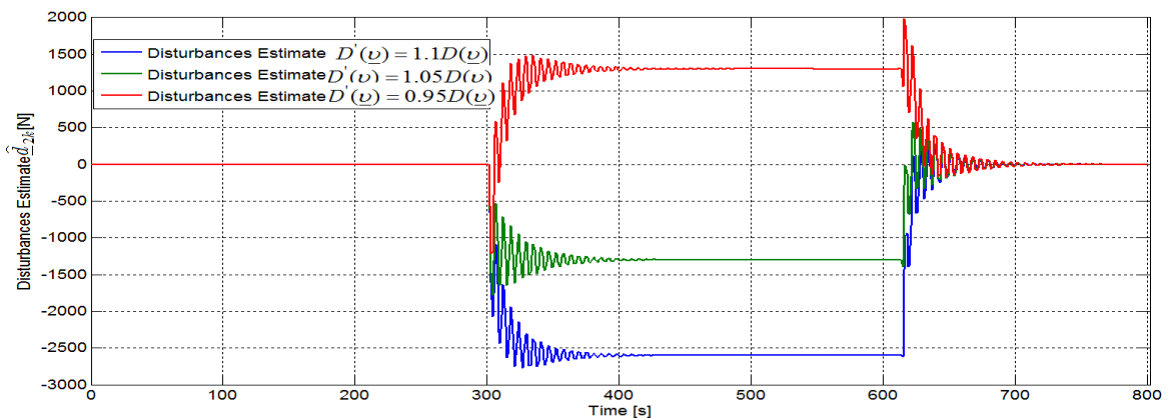
Để kiểm chứng bộ ước lượng trong trường hợp tín hiệu bất định sinh ra từ mô hình do sự thay đổi của ma trận thủy động lực học  $D(\underline{v})$ , giống như trường hợp thành phần bất định nằm ở ma trận  $A(\underline{x}, \underline{d})$  của (3.4) như đã đề cập ở trên. Luận án

tiến hành kiểm tra thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  từ bộ ước lượng khi thay đổi tăng, giảm hệ số ma trận thủy động lực học  $D(\underline{v})$  trong mô hình liên tục của đối tượng với các trường hợp như sau:

$$D'(\underline{v}) = 1.1D(\underline{v}), D'(\underline{v}) = 1.05D(\underline{v}), D'(\underline{v}) = 0.95D(\underline{v}).$$



a) Kết quả ước lượng thành phần bất định  $\hat{d}_1$  từ sự thay đổi ma trận  $D(\underline{v})$



b) Kết quả ước lượng thành phần bất định  $\hat{d}_2$  từ sự thay đổi ma trận  $D(\underline{v})$

Hình 3.6 Kết quả ước lượng thành phần bất định  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  khi thay đổi hệ số ma trận thủy động lực học  $D(\underline{v})$  trong mô hình.

### Nhận xét:

Kết quả mô phỏng bộ ước lượng trong trường hợp thay đổi hệ số ma trận giảm chấn thủy động lực học  $D(\underline{v})$  cho thấy bộ ước lượng đã ước lượng được lượng bất định sinh ra từ sự thay đổi hệ số ma trận  $D(\underline{v})$  của mô hình. Tín hiệu bất định ước lượng được thay đổi theo hệ số mô hình đối tượng, tức là khi hệ số của mô hình tàu tăng lên, thành phần bất định sẽ tăng theo và ngược lại. Điều này đúng với bản chất vật lý của mô hình đối tượng.

### 3.2.2.3 Đánh giá bộ ước lượng bù bất định

Kết quả mô phỏng của hai trường hợp trên còn cho thấy chất lượng của bộ ước lượng bất định phụ thuộc vào giá trị ước lượng ban đầu  $\hat{d}(0)$ . Nếu nó được chọn ban đầu càng gần giá trị thực thì chất lượng ước lượng càng tốt. Tuy nhiên, không phụ thuộc vào giá trị ban đầu được chọn, sai lệch ước lượng luôn giảm dần và tiệm cận về 0.

Chất lượng bộ ước lượng bất định còn phụ thuộc vào độ lớn và dạng của tín hiệu bất định, nếu biên độ tín hiệu bất định càng lớn thì sai lệch ước lượng cũng lớn theo. Kết quả ước lượng bất định tốt khi tín hiệu bất định là dạng hàm, trơn. Ngoài ra nó còn phụ thuộc vào thời gian trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển. Với những tín hiệu bất định không lớn thì bộ ước lượng bất định đề xuất này hoàn toàn có thể áp dụng để ước lượng chúng.

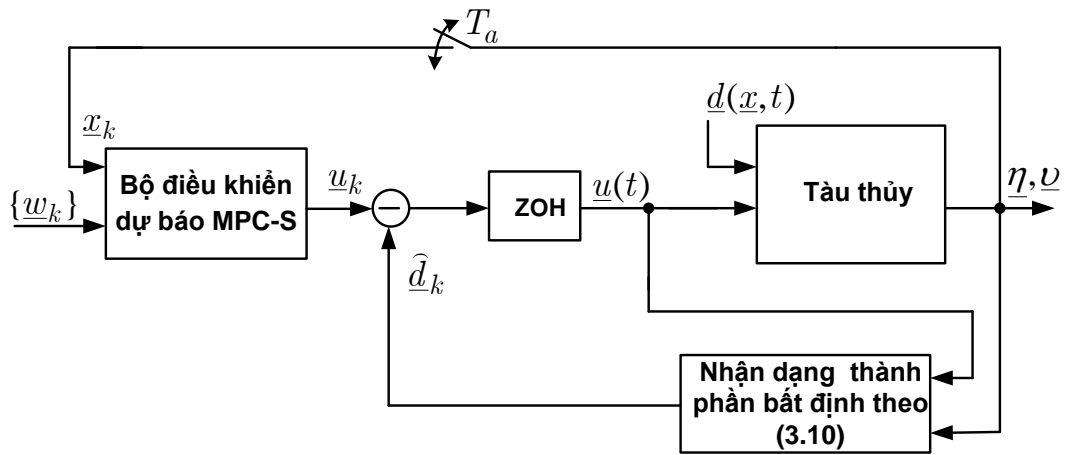
Sau đây, luận án sẽ sử dụng kết hợp phương pháp ước lượng này với bộ điều khiển dự báo MPC-S, MPC-O đã xây dựng ở chương 2 để thiết kế bộ điều khiển dự báo điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy khi mô hình tàu có chứa bất định hàm ở đầu vào.

## 3.3 Thiết kế bộ điều khiển dự báo điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt khi mô hình có bất định hàm ở đầu vào

### 3.3.1 Thiết kế bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái

#### 3.3.1.1 Thuật toán điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái

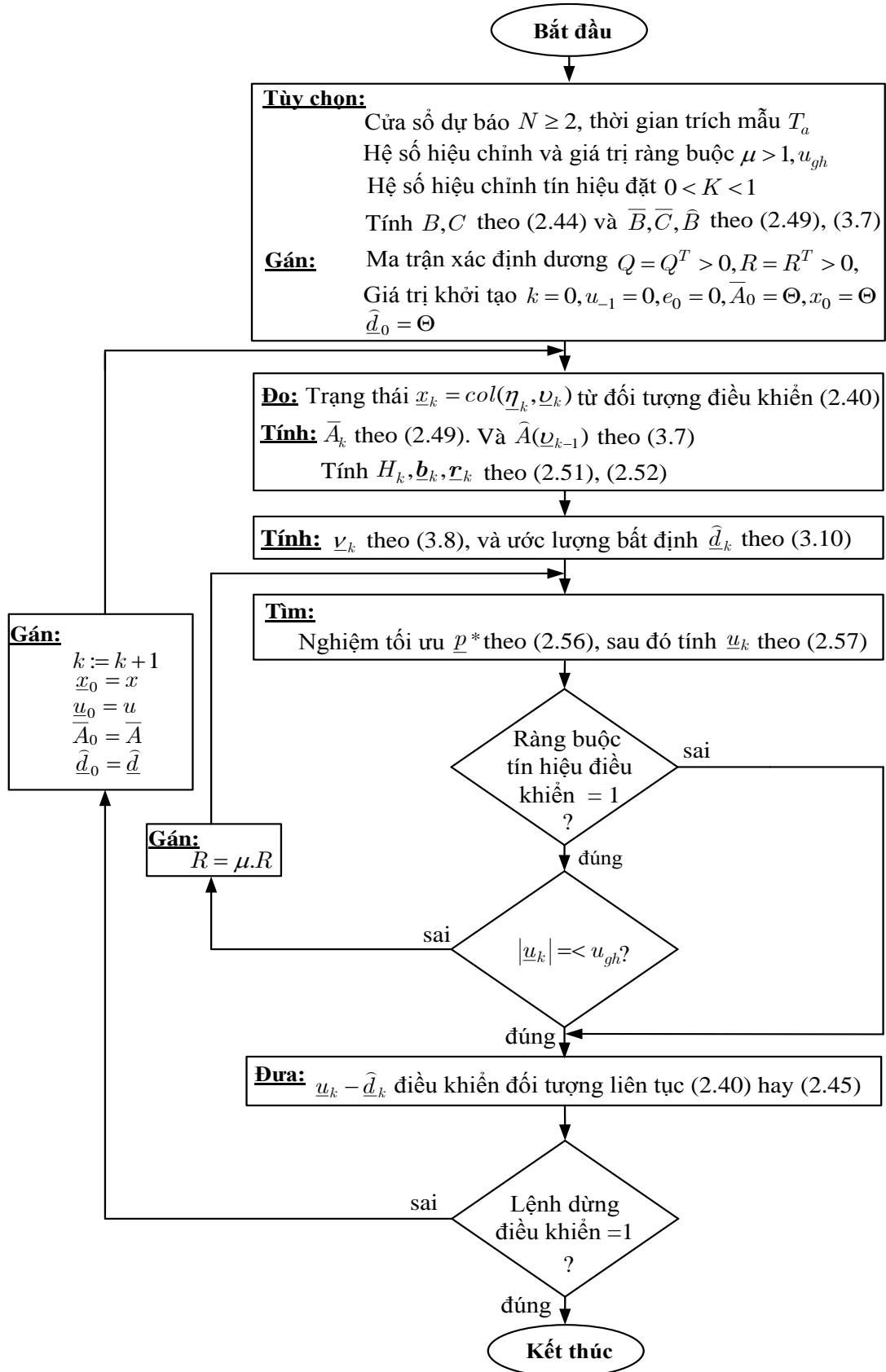
Khi kết hợp thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái (thuật toán MPC-S) đã có ở mục 2.3.1.4 cho hệ có mô hình tàu xác định cùng với cơ cấu bù bất định mô tả ở Hình 3.2, ta sẽ được thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái tương ứng, nhưng bây giờ ứng dụng được cho cả hệ có thành phần bất định hàm ở kênh đầu vào. Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định được minh họa như Hình 3.7 dưới đây.



Hình 3.7 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định

Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định được trình bày trên hình Hình 3.8 dưới đây và được luận án ký hiệu là DMPC-S, trong đó ký tự D được thêm ở đầu tên gọi để ngụ ý rằng thuật toán này áp dụng được cho hệ có chứa thành phần bất định (Disturbances).





Hình 3.8 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi trạng thái có bù bất định DMPC-S

### 3.3.1.2 Cài đặt bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái DMPC-S

Các tham số bộ điều khiển DMPC-S được cài đặt như sau:

Cửa sổ dự báo:  $N \geq 2$  (cài đặt  $N = 5$ )

Thời gian trượt (receding horizon)  $T_a = 0.1(s)$

Tham số hiệu chỉnh tín hiệu đặt  $0 < K < 1$  (cài đặt  $K = 0.5$ )

Tín hiệu điều khiển ban đầu  $u_{-1}$  ở thời điểm  $t_{-1}$  (cài đặt  $u_{-1} = 0$ )

Ma trận xác định dương  $Q, R$ , (đặt  $Q = \text{diag}([50; 50; 100])$ ,  $R = \text{diag}([1; 1])$ )

Giá trị ban đầu của quỹ đạo:

Quỹ đạo hình tròn:  $x_d(0) = 0, y_d(0) = 50, \psi_d(0) = 0$

$$x(0) = 0, y(0) = 30, \psi(0) = 0, u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$$

Quỹ đạo hình sin:  $x_d(0) = 5, y_d(0) = 30, \psi_d(0) = 0,$

$$x(0) = 5, y(0) = 30, \psi(0) = 0, u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$$

Cài đặt ràng buộc tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $u_{gh} = \tau_{r.gh}$

Giá trị ước lượng ban đầu  $\hat{d}(0)$  của bộ ước lượng bù bất định, (trong đó  $\hat{d}$  là giá trị ước lượng được từ tín hiệu bất định  $d$ ), (cài đặt  $\hat{d}(0) = 0$ )

Tín hiệu bất định hàm đầu vào được giả thiết gồm 2 thành phần  $\underline{d} = (d_1, d_2)$ :

*Thành phần thứ nhất:* nhiễu bất định tác động theo chiều chuyển động trượt dọc của tàu với giá trị giả thiết  $d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01).10^6 (N)$ , làm cho tàu trượt dọc.

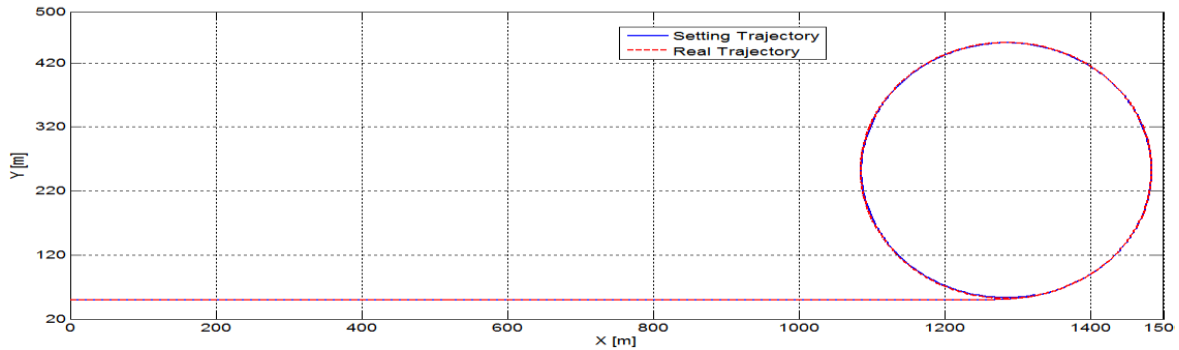
*Thành phần thứ hai:* nhiễu bất định tác động theo chiều chuyển động trượt ngang của tàu với giá trị giả thiết:

$d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)).10^6 (N.m)$  làm cho tàu dạt ngang và thay đổi hướng đi.

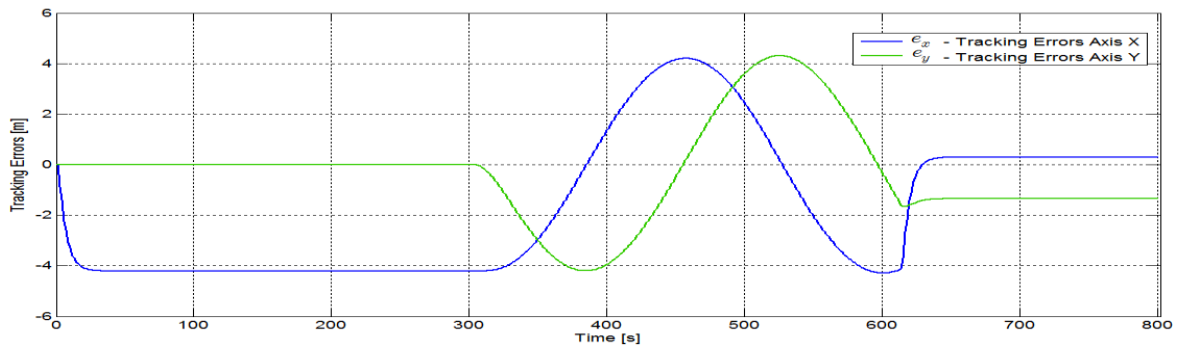
Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển DMPC-S được đưa ra trong phần phụ lục 3 của luận án.

### 3.3.1.3 Kết quả mô phỏng, đánh giá chất lượng bộ điều khiển DMPC-S

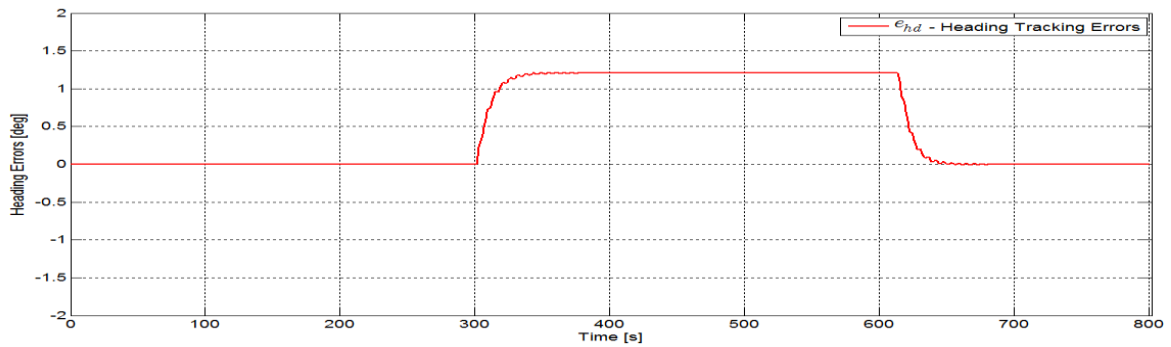
#### a. Kết quả mô phỏng với quỹ đạo hình tròn



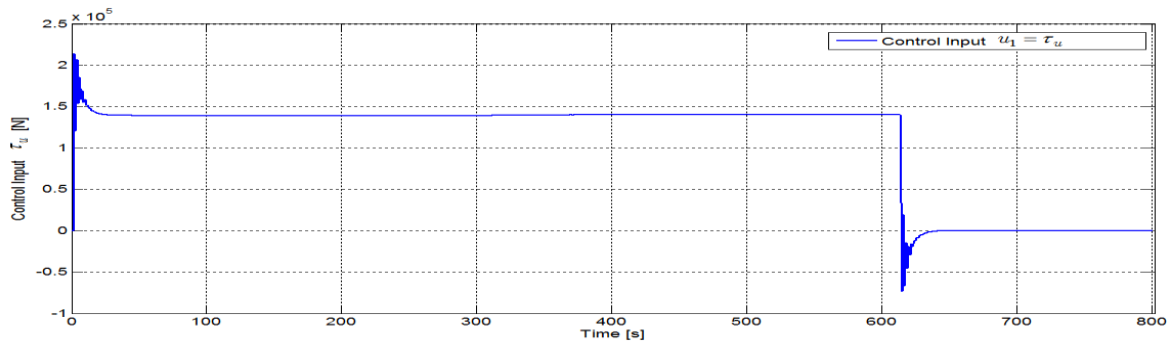
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



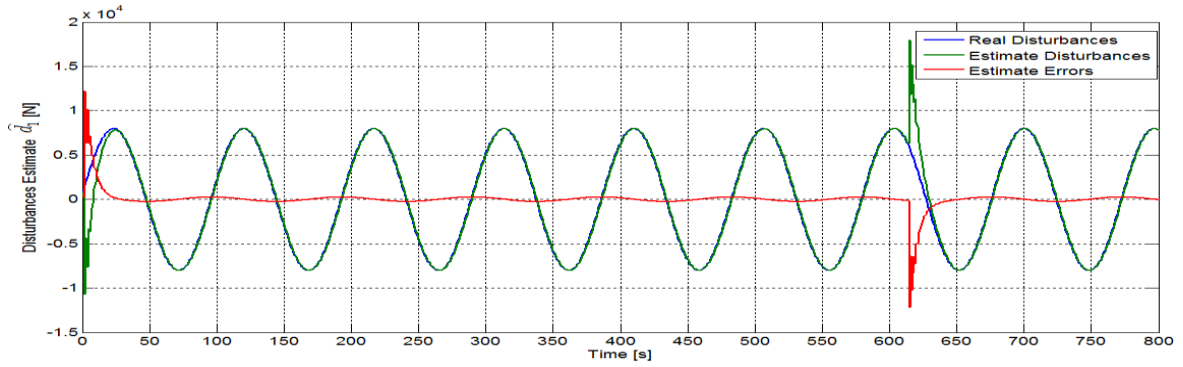
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



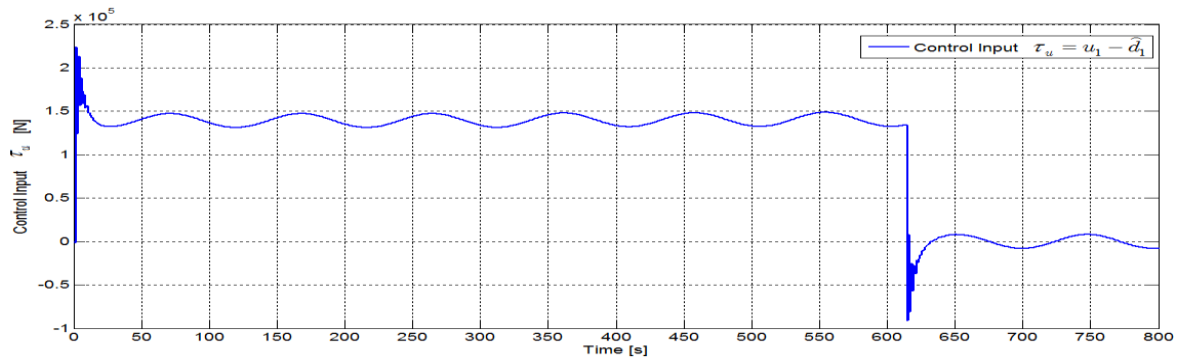
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



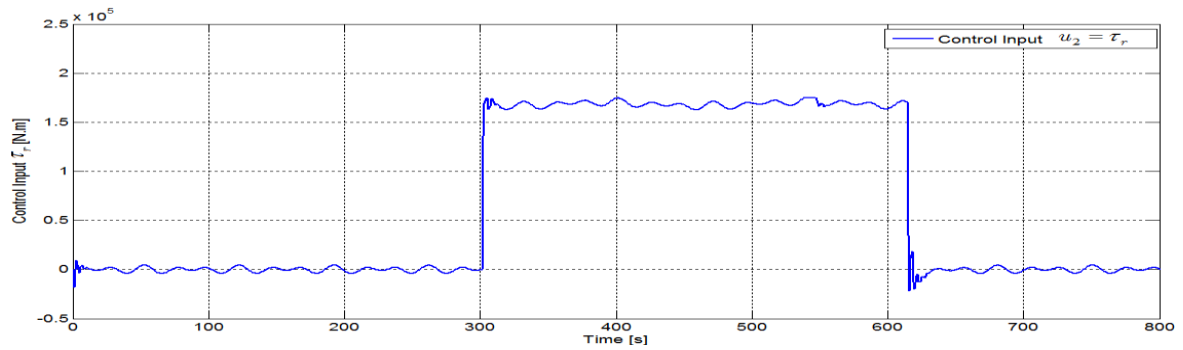
d) Tín hiệu điều khiển lực  $\tau_u$  khi chưa bù bất định – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



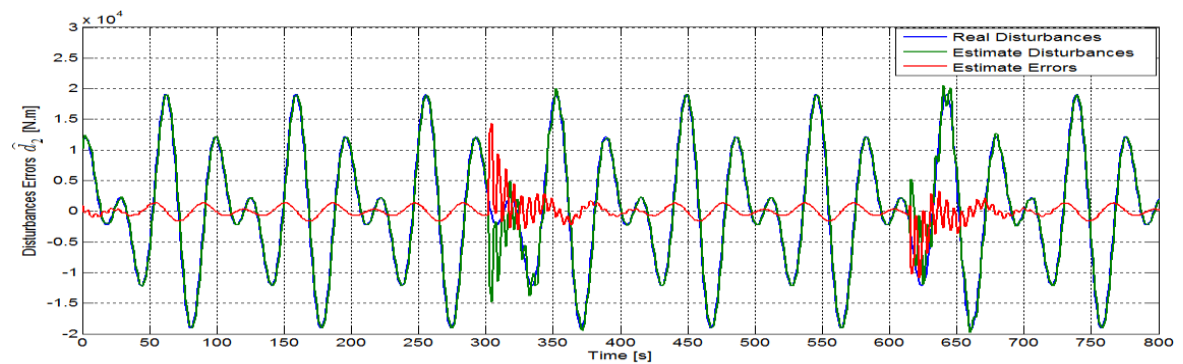
e) Thành phần bất định  $\hat{d}_1$  ước lượng được từ  $d_1$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



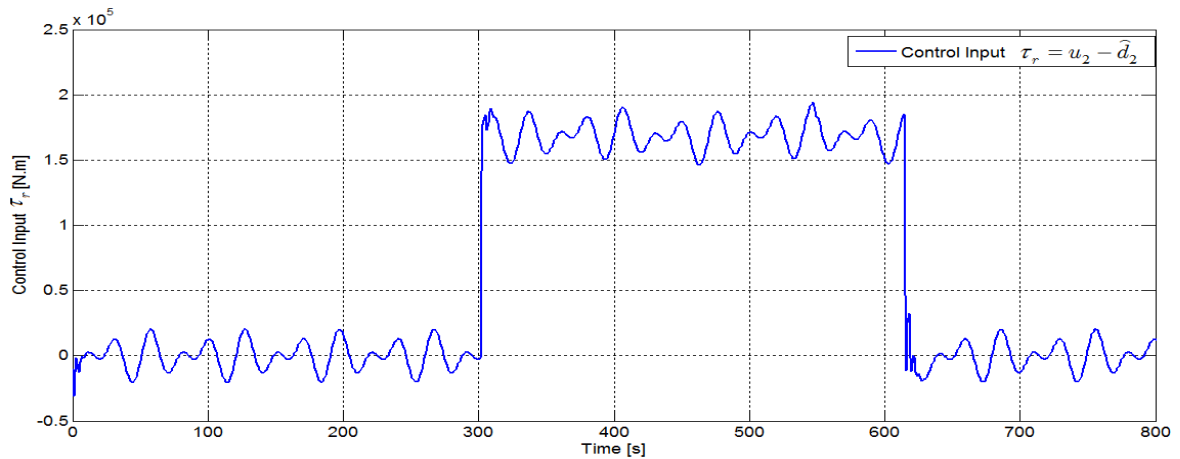
f) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_1$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



g) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_r$  khi chưa bù bất định – quỹ đạo hình tròn



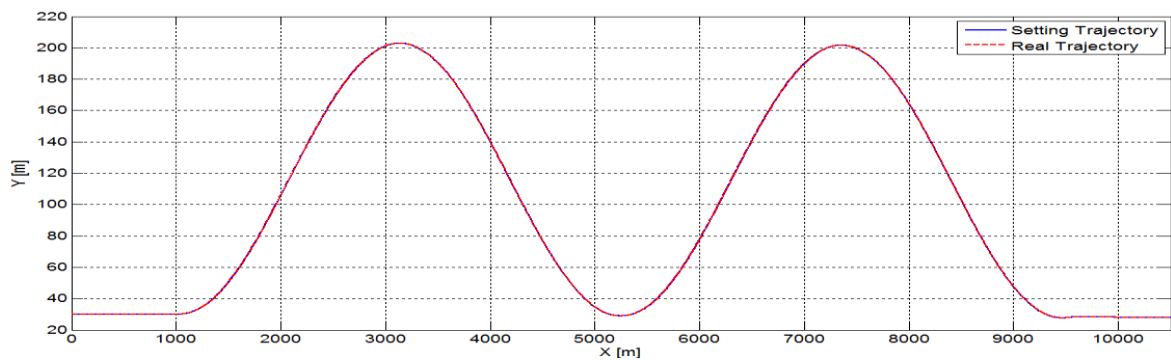
h) Thành phần bất định  $\hat{d}_2$  ước lượng được từ  $d_2$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)



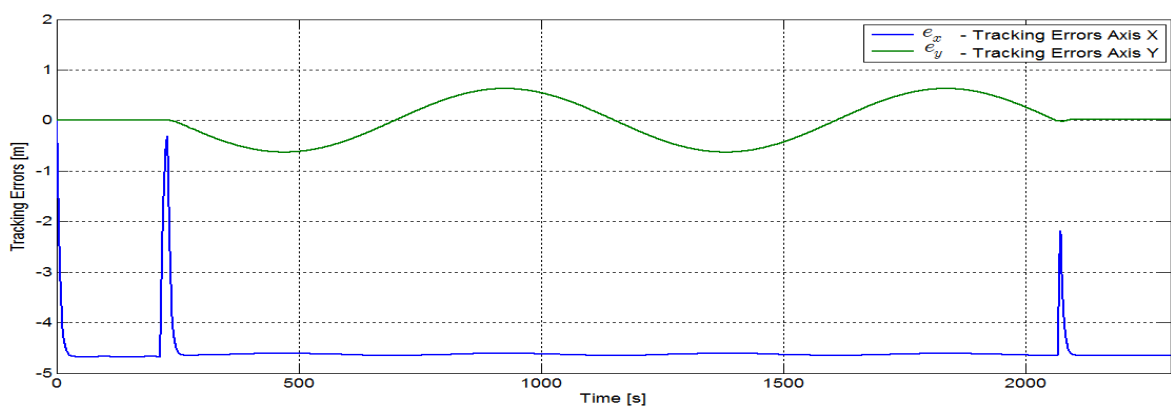
i) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_2$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-S)

Hình 3.9 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-S với quỹ đạo hình tròn

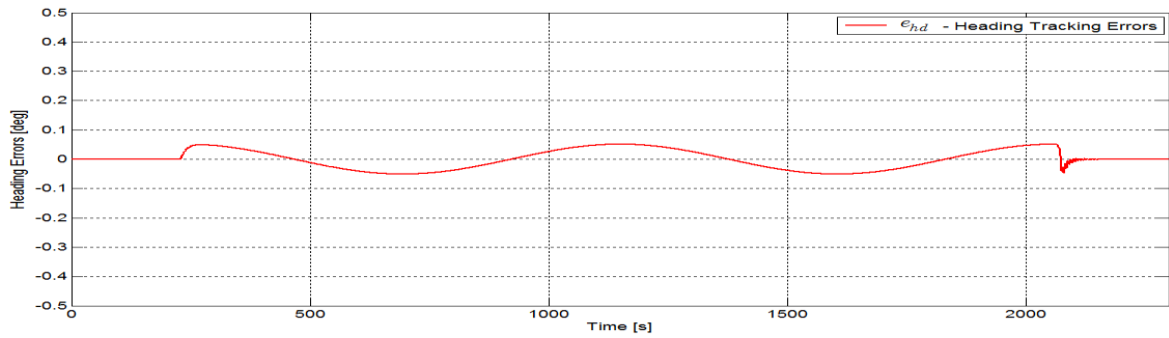
### b. Kết quả mô phỏng với quỹ đạo hình sin



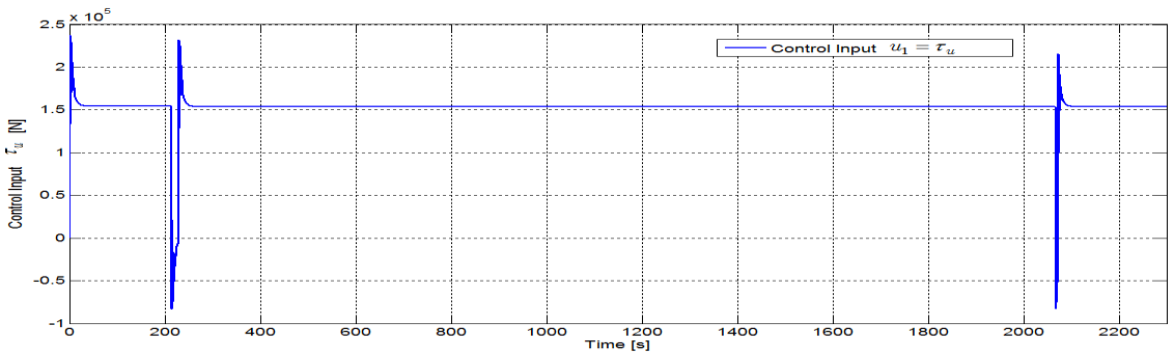
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



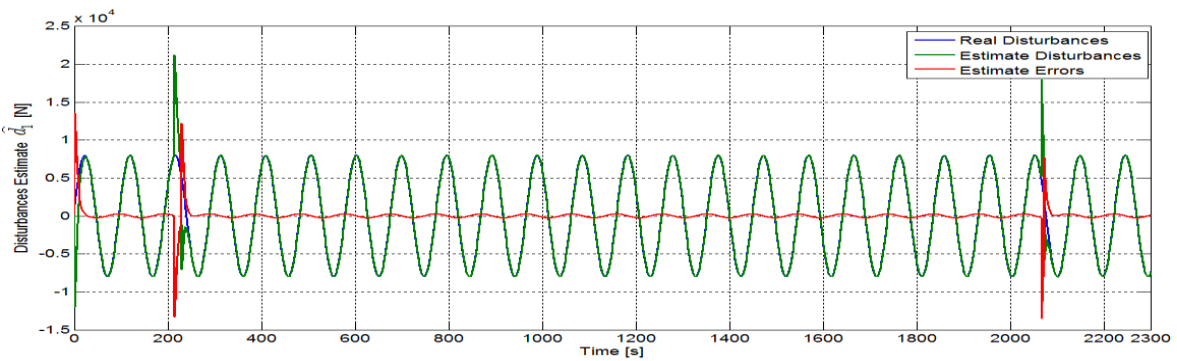
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



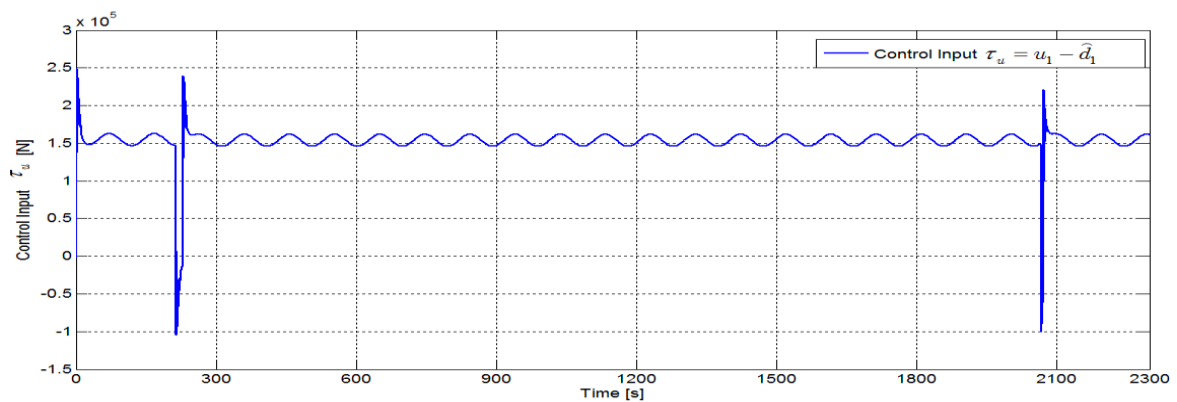
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



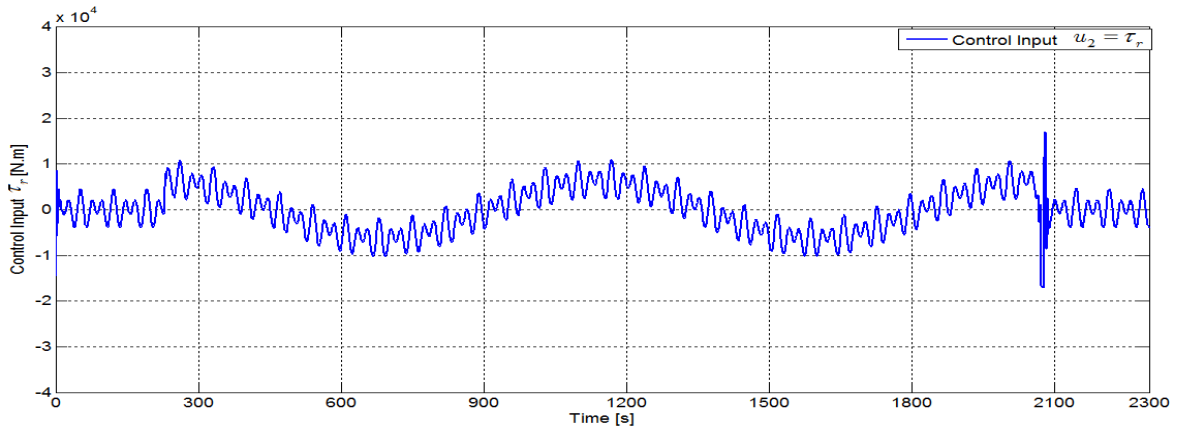
d) Tín hiệu điều khiển lực  $\tau_u$  khi chưa bù bất định – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



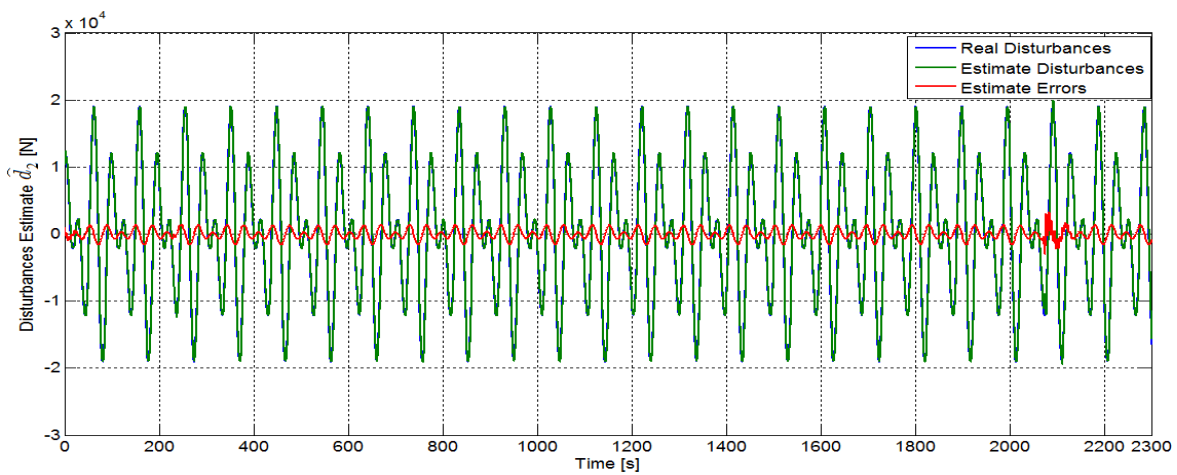
e) Thành phần bất định  $\hat{d}_1$  ước lượng từ  $d_1$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



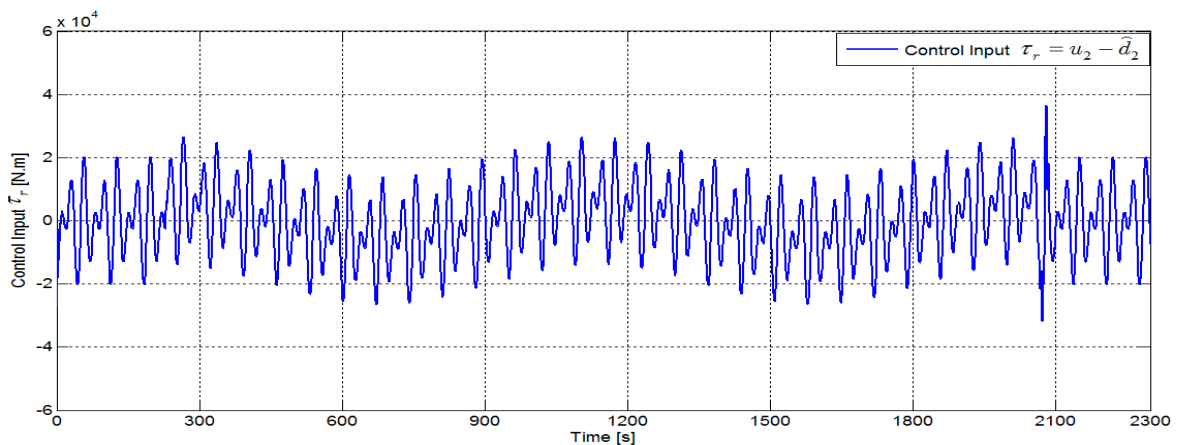
f) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_1$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



g) Tín hiệu điều khiển mô-men  $\tau_r$  chưa bù bất định – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



h) Thành phần bất định  $\hat{d}_2$  ước lượng từ  $d_2$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)



i) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_2$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-S)

Hình 3.10 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-S với quỹ đạo hình sin

### c. Nhận xét:

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển DMPC-S với quỹ đạo đặt hình tròn và hình sin, khi có tín hiệu bất định hàm ở đầu vào, bất định được giả thiết với giá trị:

$$d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01) \cdot 10^6 \text{ (N)}, d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)) \cdot 10^6 \text{ (N.m)}$$

cho kết quả tín hiệu quỹ đạo đầu ra của bộ điều khiển DMPC-S vẫn bám tốt theo quỹ đạo đặt, điều này chứng tỏ tín hiệu bất định đã được ước lượng và bù tốt vào tín hiệu điều khiển.

Sai lệch bám quỹ đạo  $e_x, e_y$  lớn nhất 4.2 m với quỹ đạo hình tròn và 4.5m với quỹ đạo hình sin, sai lệch bám hướng  $e_{hd}$  tương đối nhỏ khoảng 1.5 độ.

Tín hiệu bất định ước lượng được  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  từ tín hiệu bất định giả thiết  $d_1, d_2$  có sai lệch bám nhỏ (sai lệch bám ước lượng được thể hiện trên hình Hình 3.9e, Hình 3.9h với quỹ đạo hình tròn và Hình 3.10e, Hình 3.10h với quỹ đạo hình sin).

Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $u_1 = \tau_u$ , mô-men quay trở  $u_2 = \tau_r$  có độ quá điều chỉnh nhỏ. Hai tín hiệu điều khiển  $u_1, u_2$  có sự khác nhau giữa trường hợp chưa bù và khi bù thành phần bất định. Sự khác nhau là do trong trường hợp có thành phần bất định thì tín hiệu điều khiển được bù thêm một lượng bất định ước lượng được từ bộ ước lượng. Tín hiệu điều khiển khi được bù thay đổi theo tín hiệu bất định. Dấu và độ lớn tín hiệu điều khiển  $\tau_u, \tau_r$  khi được bù bất định luôn có xu hướng bù (khử) thành phần bất định giả thiết tác động vào đối tượng. Điều này được thể hiện rõ trên đặc tính mô phỏng Hình 3.9d, e, f với tín hiệu  $\tau_u$  và g, h, i với tín hiệu  $\tau_r$  khi quỹ đạo đặt hình tròn và Hình 3.10d, e, f với tín hiệu  $\tau_u$  và g, h, i với tín hiệu  $\tau_r$  khi quỹ đạo đặt hình sin.

Chất lượng bộ điều khiển DMPC-S cũng phụ thuộc vào việc chọn ma trận xác định dương  $Q, R$ , số cửa sổ dự báo  $N$  và khoảng thời gian trượt  $T_a$  (receding horizon).

### 3.3.2 Thiết kế bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra

#### 3.3.2.1 Thuật toán điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra

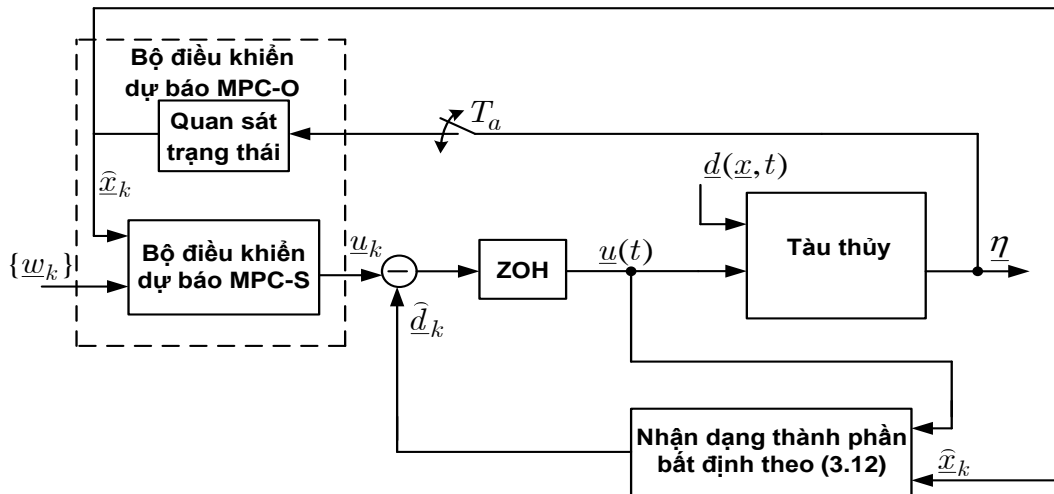
Giống như DMPC-S, thuật toán phản hồi đầu ra có bù bất định là sự ghép nối của bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách MPC-O và bộ ước lượng bù



bất định theo (3.10). Tuy nhiên, do ở đây ta không có được trạng thái  $\underline{v}_k = [u \ v \ r]^T$  từ hệ thống (không đo được), mà chỉ có thể quan sát được hoặc nhờ bộ quan sát trực tiếp (Hình 2.10), hoặc nhờ bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) đã được trình bày tại mục 2.3.2.2, tức là chỉ có được  $\hat{\underline{v}}_k \approx \underline{v}_k$ , với  $\hat{\underline{v}}_k$  là trạng thái quan sát được từ  $\underline{v}_k$  bởi bộ quan sát trạng thái nên công thức xác định tín hiệu bù bất định cho ở (3.10) được viết lại thành:

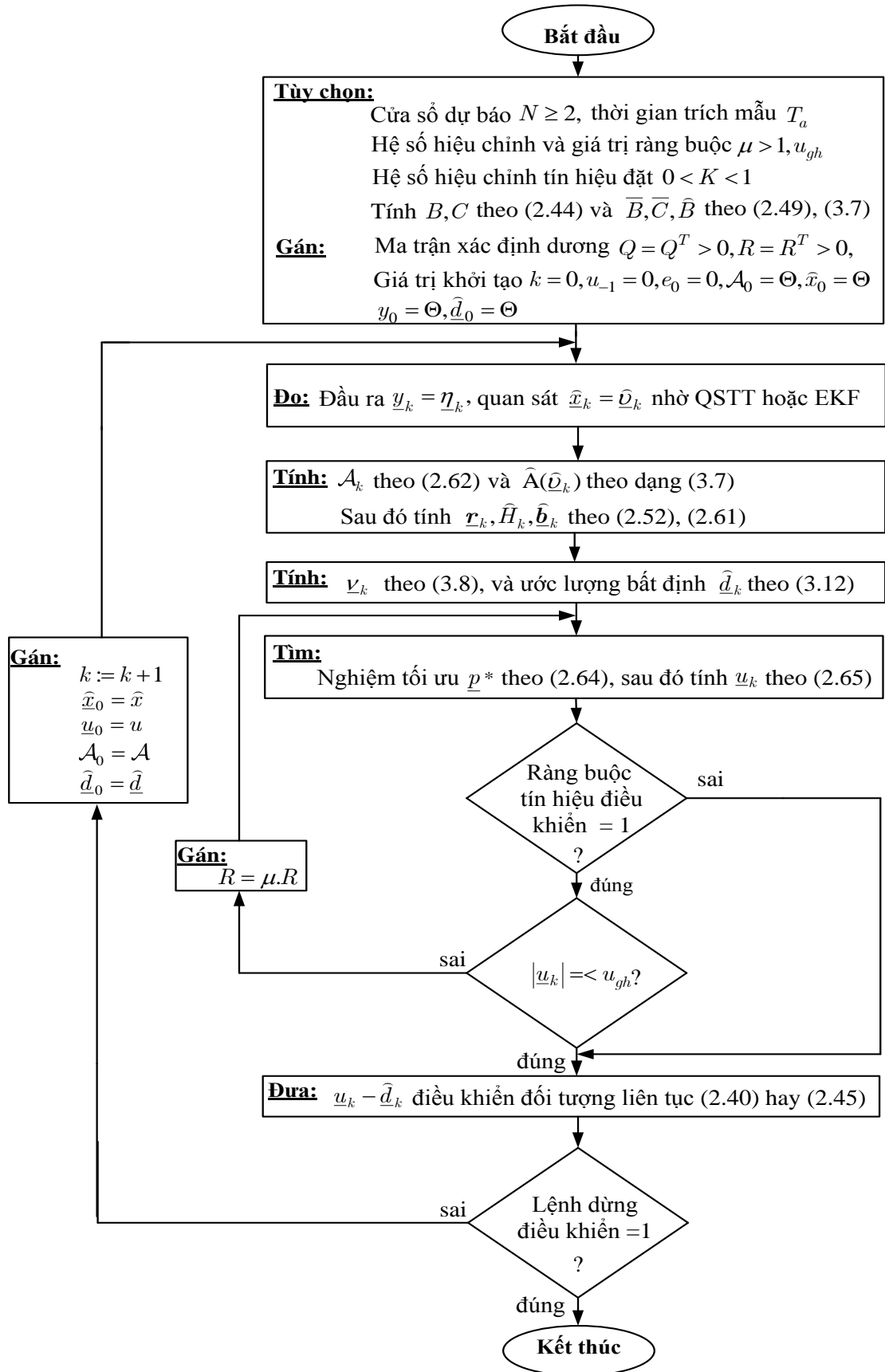
$$\hat{\underline{d}}_k = (\hat{B}^T \hat{B})^{-1} \hat{B}^T [(\hat{\underline{v}}_k - \underline{v}_k) - \hat{A}(\hat{\underline{v}}_{k-1})\hat{\underline{v}}_{k-1} + \hat{A}(\underline{v}_{k-1})\underline{v}_{k-1}]. \quad (3.12)$$

Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định được minh họa như Hình 3.11 dưới đây.



Hình 3.11 Cấu trúc bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định

Tương ứng ta có thuật toán điều khiển phản hồi đầu ra có bù bất định, ký hiệu là DMPC-O, trong đó ký tự D được thêm ở đầu tên gọi để ngụ ý rằng thuật toán này áp dụng được cho hệ có chứa thành phần bất định (disturbances) như Hình 3.12 dưới đây:



Hình 3.12 Thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra có bù bất định DMPC-O

### 3.3.2.2 Mô phỏng bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi đầu ra DMPC-O

Các tham số được cài đặt bộ điều khiển DMPC-O như sau:

Cửa sổ dự báo:  $N \geq 2$  (cài đặt  $N = 5$ )

Thời gian trượt (receding horizon)  $T_a = 0.1(s)$

Tham số hiệu chỉnh tín hiệu đặt  $0 < K < 1$  (đặt  $K = 0.5$ )

Tín hiệu điều khiển ban đầu  $u_{-1}$  ở thời điểm  $t_{-1}$  (đặt  $u_{-1} = 0$ )

Ma trận xác định dương  $Q, R$ , (đặt  $Q = \text{diag}([50; 50; 100]); R = \text{diag}([1; 1])$ )

Giá trị ban đầu của quỹ đạo:

Quỹ đạo hình tròn:  $x_d(0) = 0, y_d(0) = 50, \psi_d(0) = 0$

$$x(0) = 0, y(0) = 50, \psi(0) = 0, u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$$

Quỹ đạo hình sin:  $x_d(0) = 5, y_d(0) = 30, \psi_d(0) = 0$

$$x(0) = 5, y(0) = 30, \psi(0) = 0, u(0) = 0, v(0) = 0, r(0) = 0$$

Giá trị ban đầu  $\hat{u}(0), \hat{v}(0), \hat{r}(0)$  của bộ QSTT:

Quỹ đạo hình tròn:  $\hat{u}(0) = 0, \hat{v}(0) = 0, \hat{r}(0) = 0$

Quỹ đạo hình sin:  $\hat{u}(0) = 0, \hat{v}(0) = 0, \hat{r}(0) = 0$

(trong đó  $\hat{u}, \hat{v}, \hat{r}$  là giá trị trạng thái quan sát được từ  $u, v, r$ )

Cài đặt ràng buộc tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $u_{gh} = \tau_{r.gh}$

Giá trị ước lượng bất định ban đầu  $\hat{d}(0)$  của bộ bù bất định, (đặt  $\hat{d}(0) = 0$ )

Tín hiệu bất định hàm đầu vào được giả thiết với 2 thành phần  $\underline{d} = (d_1, d_2)$ .

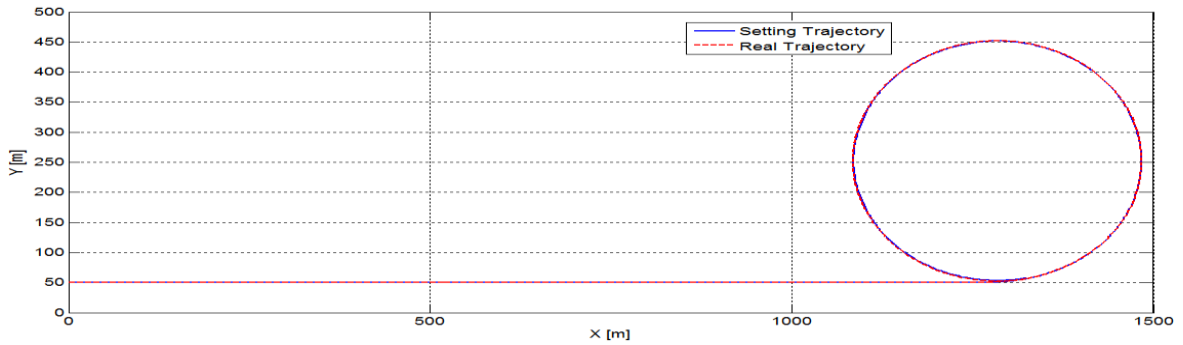
*Thành phần thứ nhất:* nhiễu bất định tác động theo chiều chuyển động trượt dọc của tàu, giả thiết  $d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01) \cdot 10^6 (N)$ , làm cho tàu trượt dọc

*Thành phần thứ hai:* nhiễu bất định tác động theo chiều chuyển động trượt ngang của tàu, giả thiết  $d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)) \cdot 10^6 (N.m)$  làm cho tàu dạt ngang và thay đổi hướng đi.

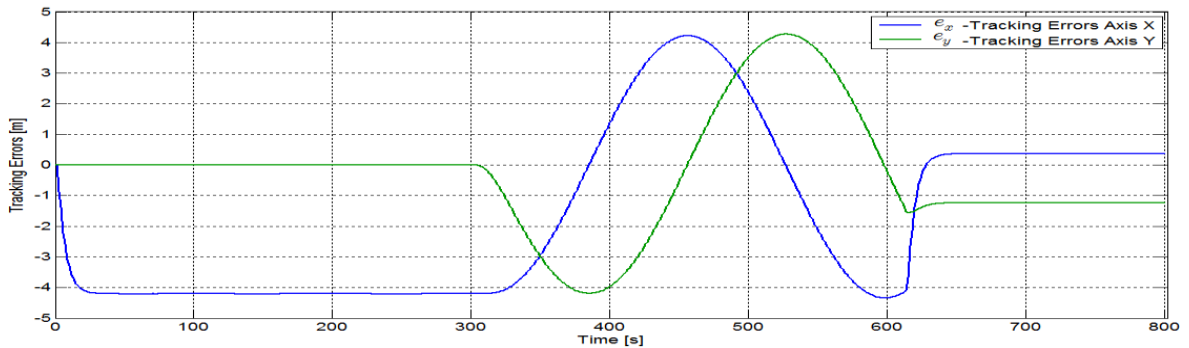
Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển DMPC-O trong phần phụ lục 3 của luận án.

### 3.3.2.3 Kết quả mô phỏng, đánh giá chất lượng bộ điều khiển DMPC-O

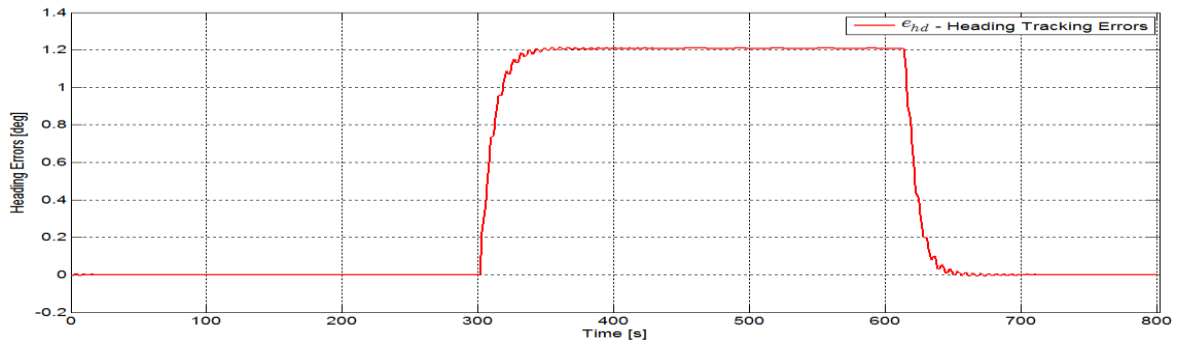
#### a. Kết quả mô phỏng với quỹ đạo hình tròn



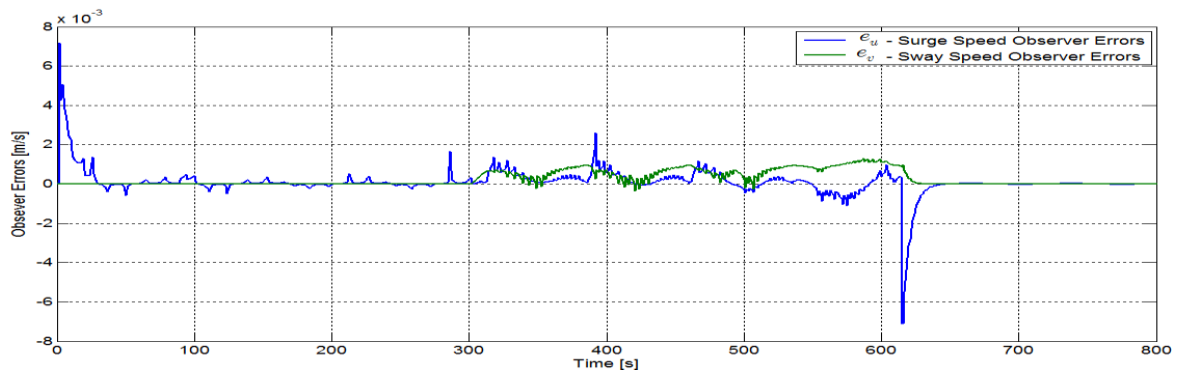
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



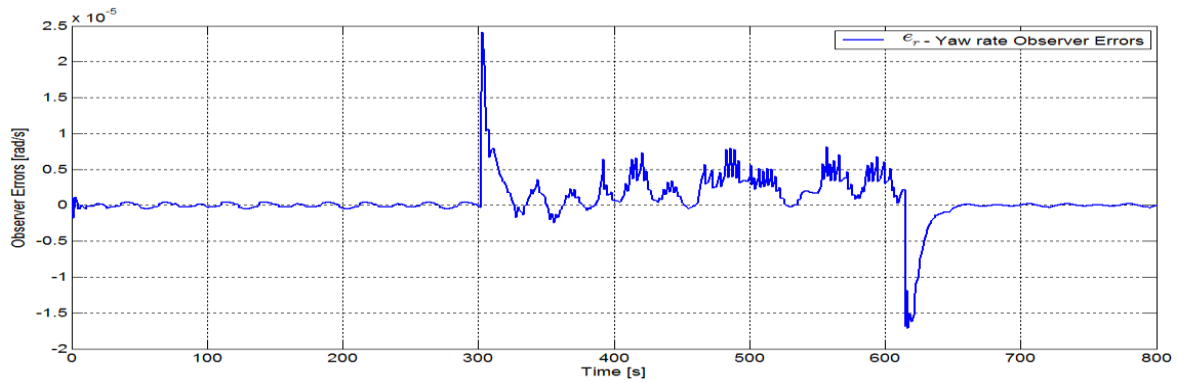
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



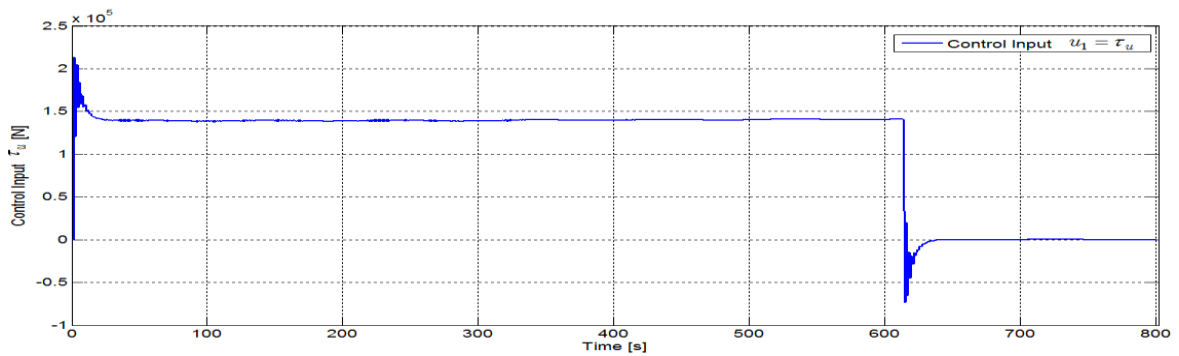
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



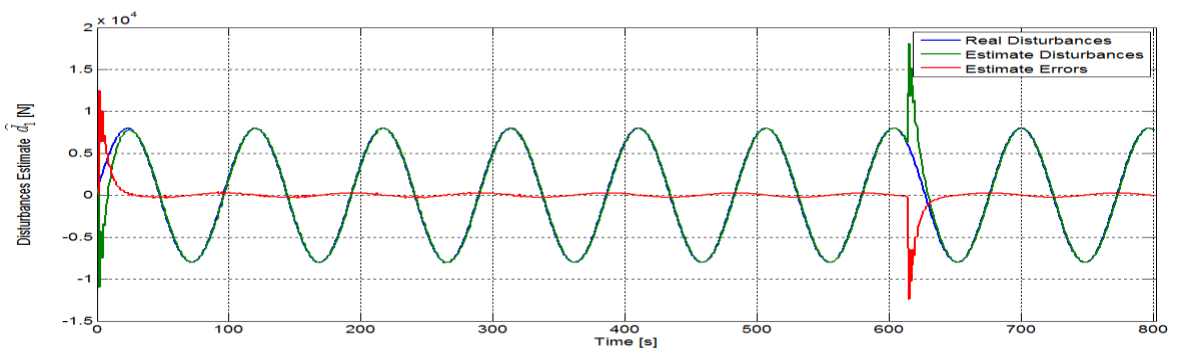
d) Sai lệch bám tốc độ trượt dọc, ngang từ bộ QSTT–quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



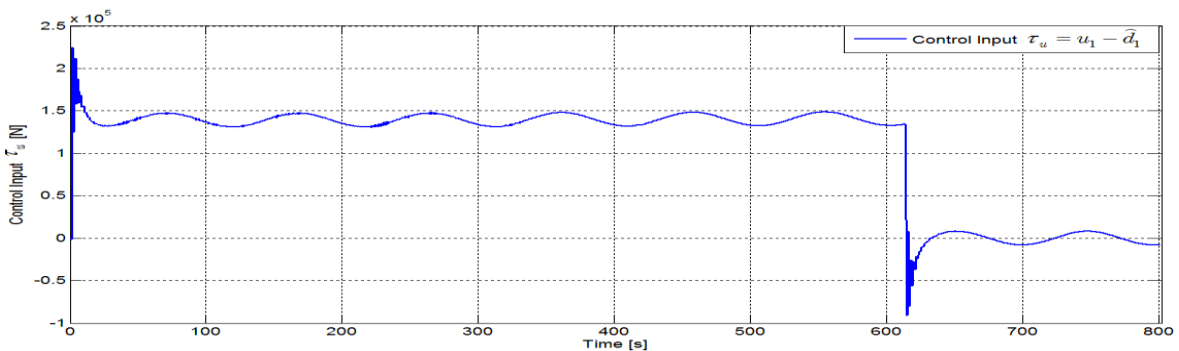
e) Sai lệch bám tốc độ quay trở từ bộ QSTT – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



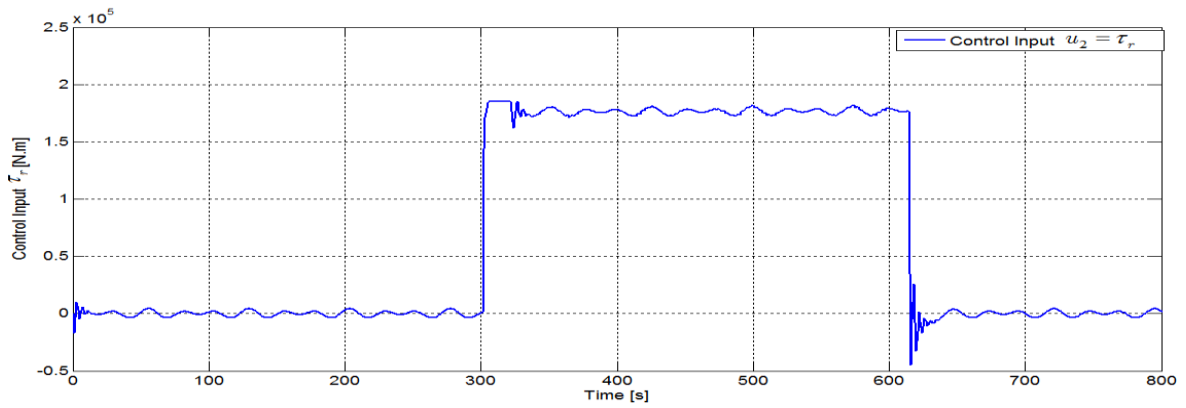
f) Tín hiệu điều khiển lực  $\tau_{u1}$  khi chưa bù bất định – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



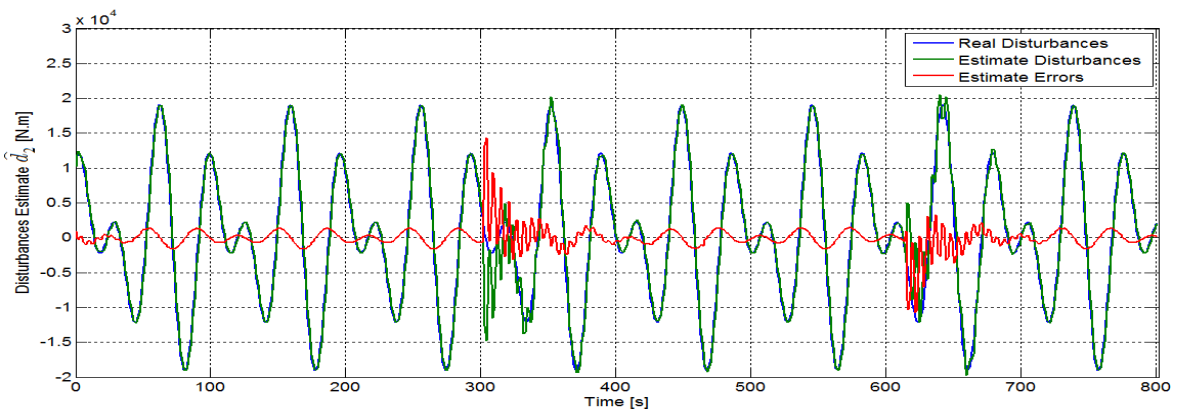
g) Thành phần bất định  $\hat{d}_1$  ước lượng từ  $d_1$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



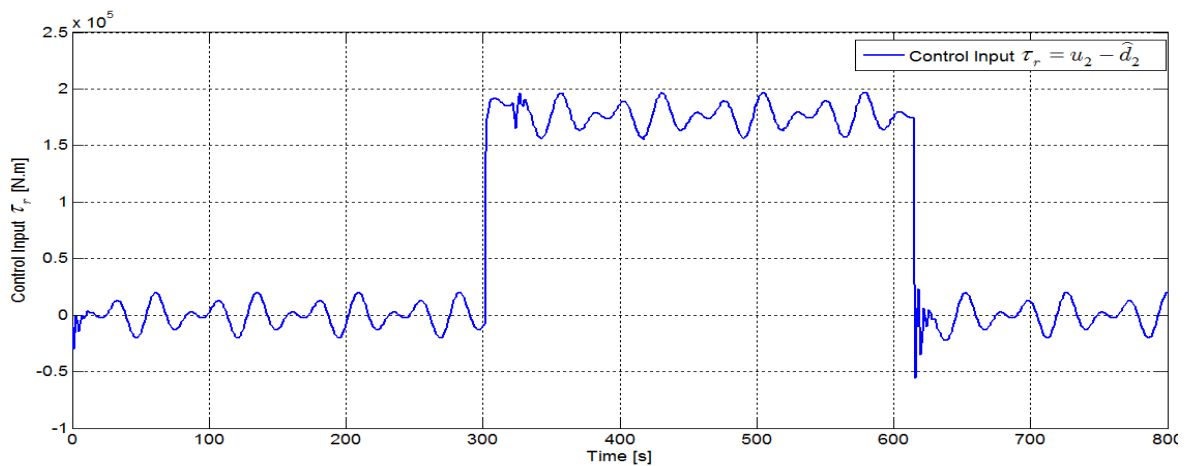
h) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_{u2}$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_1$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



i) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  khi chưa bù bất định – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



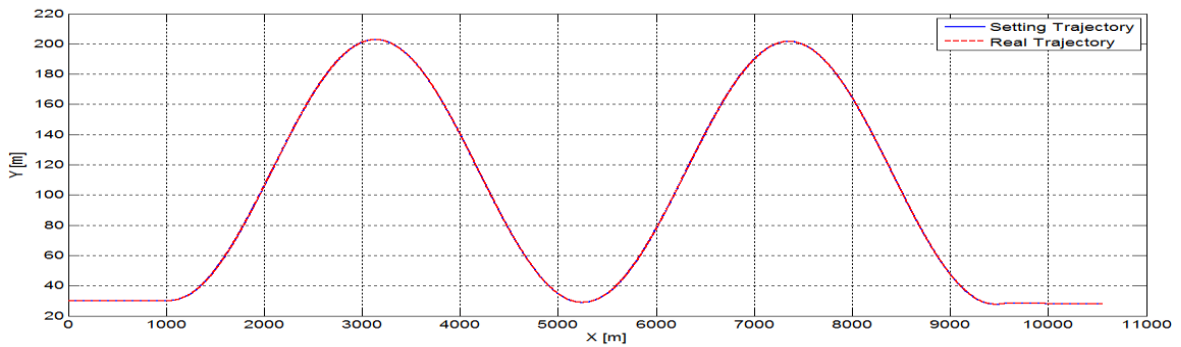
j) Thành phần bất định  $\hat{d}_2$  ước lượng từ  $d_2$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)



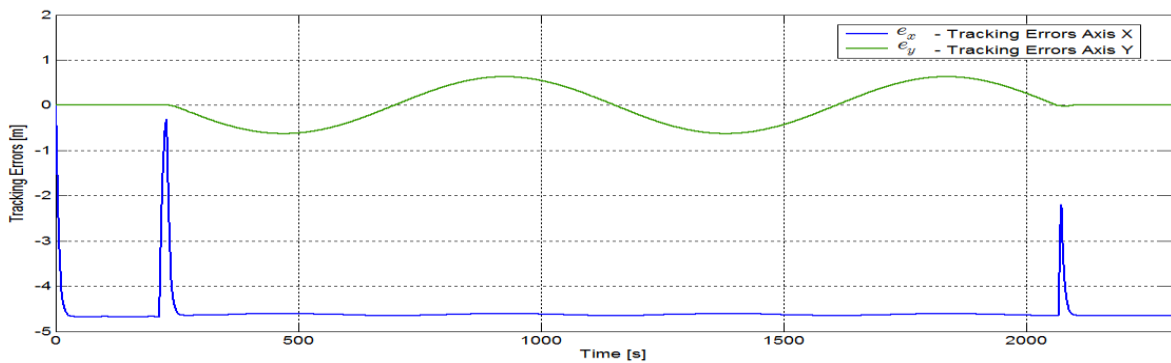
k) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_2$  – quỹ đạo hình tròn (DMPC-O)

Hình 3.13 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-O với quỹ đạo hình tròn

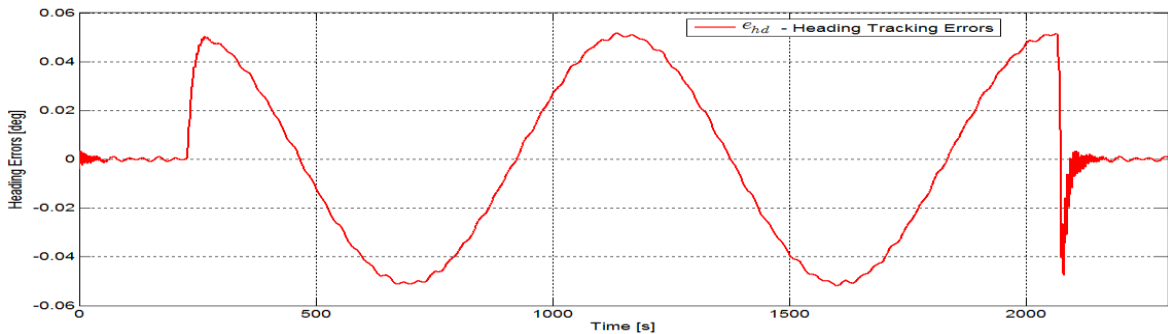
## b. Kết quả mô phỏng với quỹ đạo hình sin



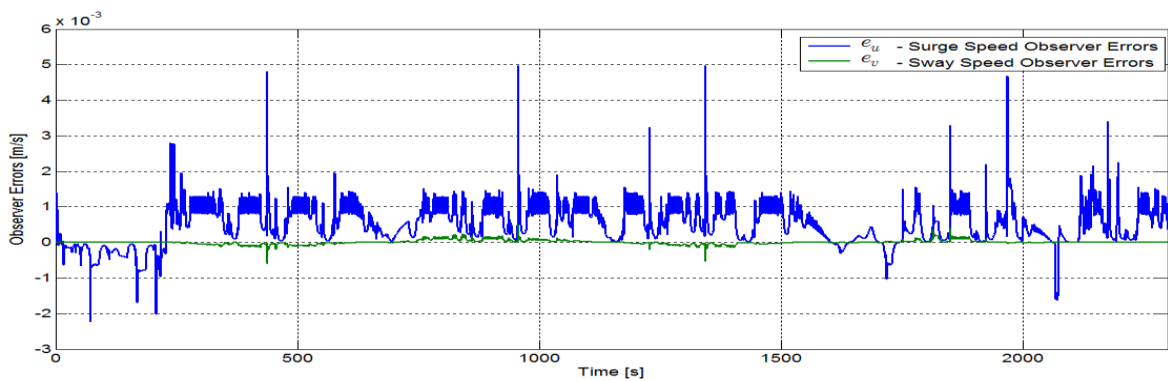
a) Kết quả mô phỏng quỹ đạo chuyển động – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



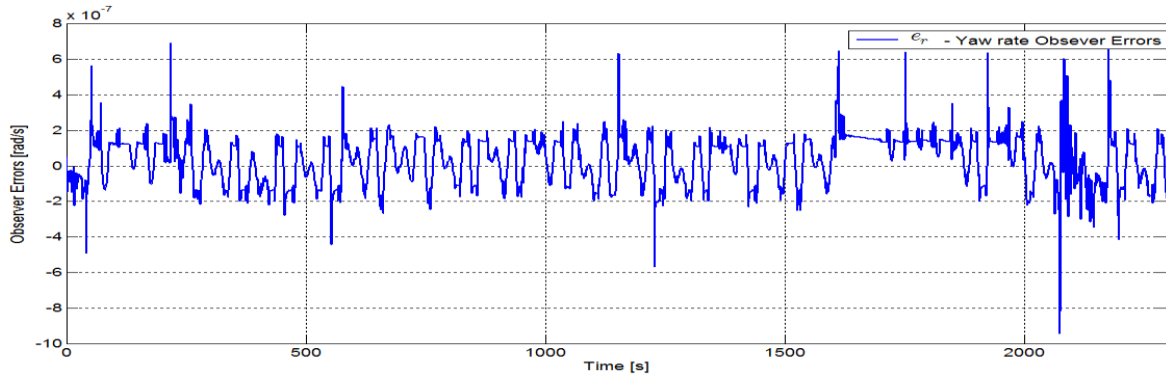
b) Sai lệch bám quỹ đạo – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



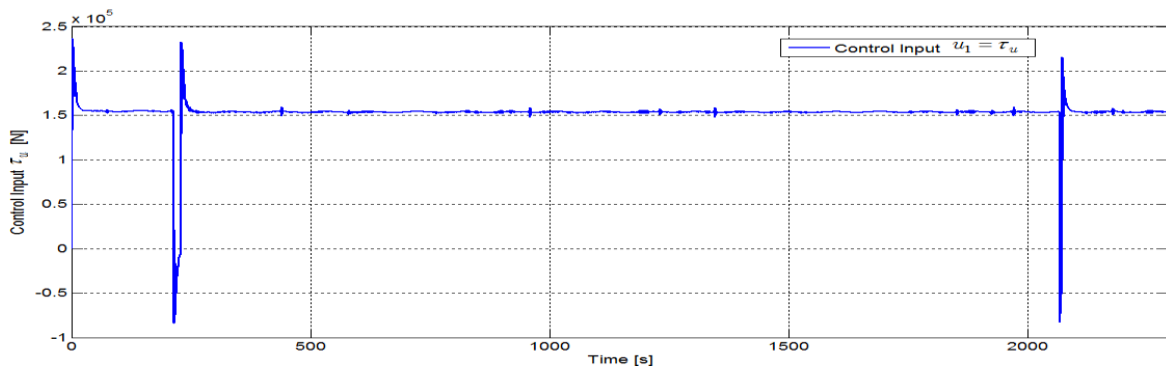
c) Sai lệch bám hướng đi – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



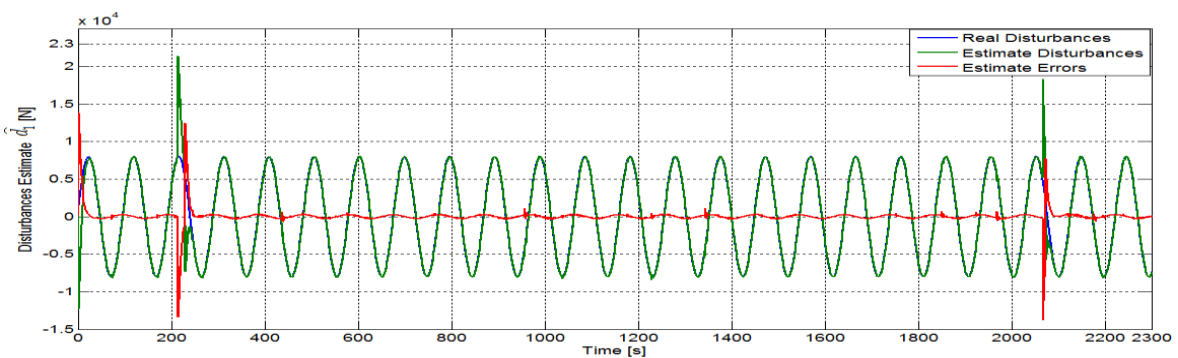
d) Sai lệch bám tốc độ trượt dọc, ngang từ bộ QSTT – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



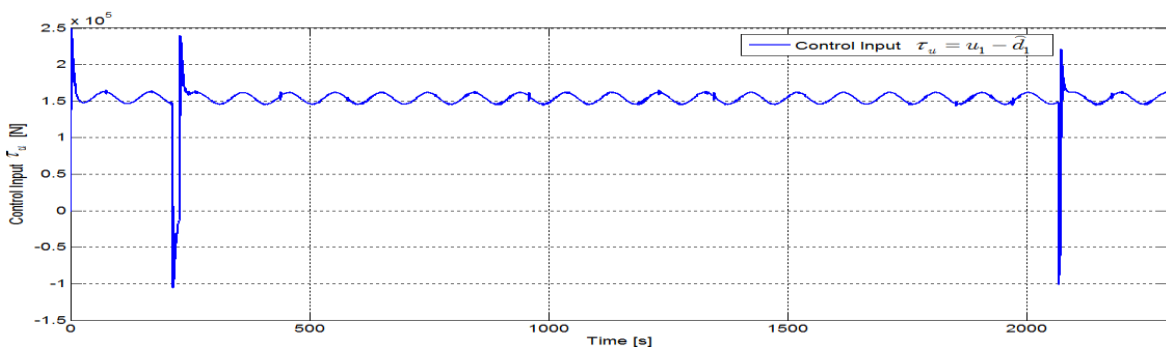
e) Sai lệch bám tốc độ quay trở từ bộ QSTT – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



f) Tín hiệu điều khiển lực  $\tau_u$  khi chưa bù bất định – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)

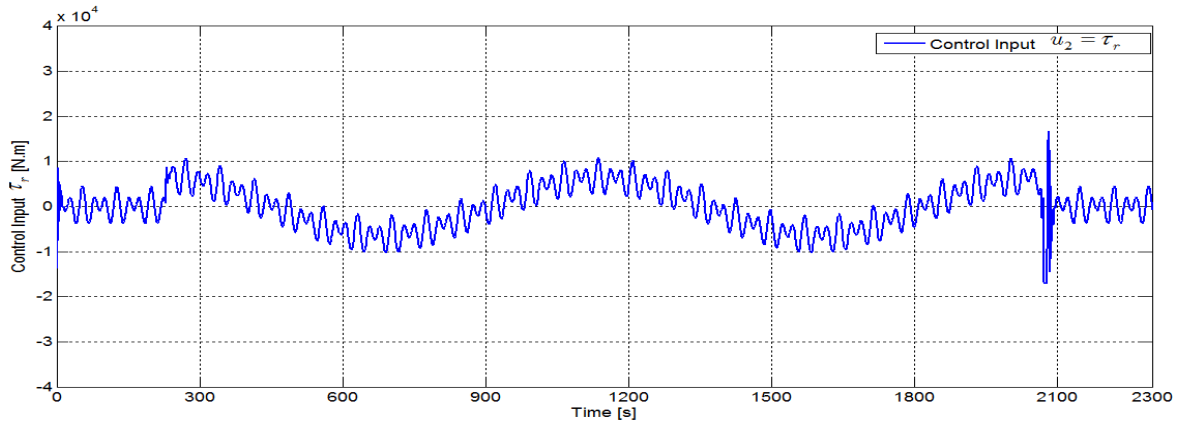


g) Thành phần bất định  $\hat{d}_1$  ước lượng từ  $d_1$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)

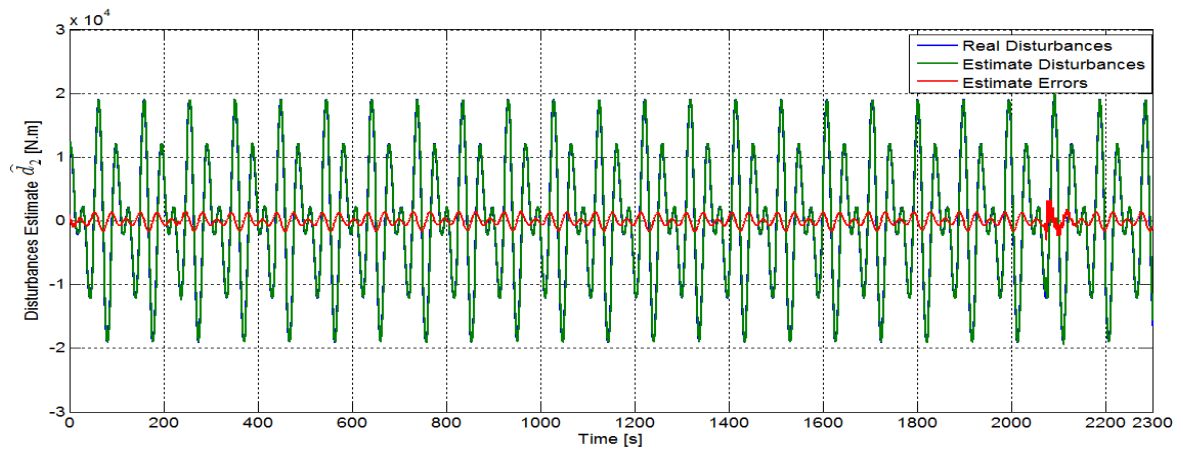


h) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_1$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)

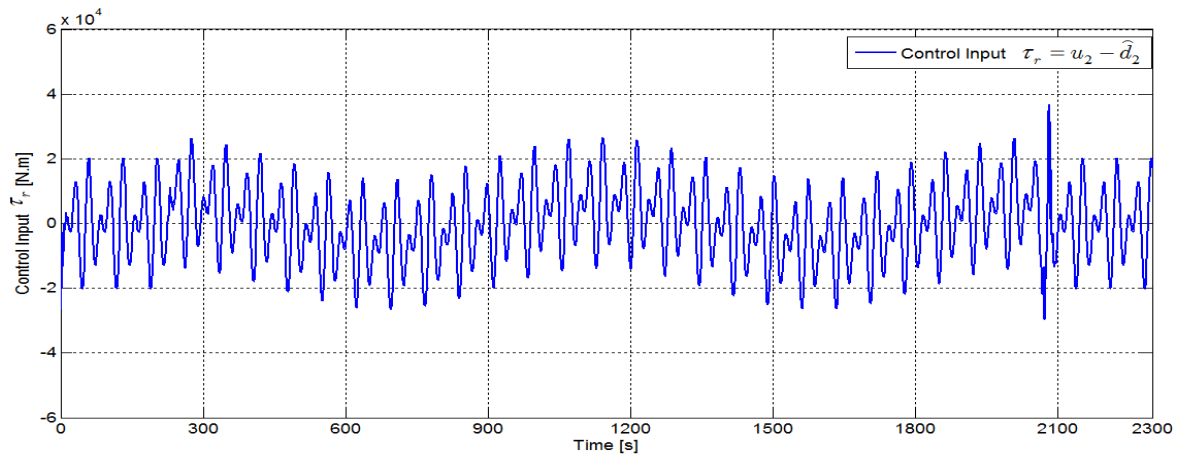




i) Tín hiệu điều khiển mô-men  $\tau_r$  khi chưa bù bất định-quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



j) Thành phần bất định  $\hat{d}_2$  ước lượng được từ  $d_2$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)



k) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r$  khi bù thành phần bất định ước lượng được  $\hat{d}_2$  – quỹ đạo hình sin (DMPC-O)

Hình 3.14 Kết quả mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển DMPC-O với quỹ đạo hình sin

### c. Nhận xét

Kết quả mô phỏng bộ điều khiển DMPC-O với quỹ đạo đặt hình tròn và hình sin, với tín hiệu bất định hàm ở đầu vào được giả thiết gồm hai thành phần  $d = (d_1, d_2)$  với giá trị được giả thiết:

$$d_1 = (0.008\sin(0.1t) + 0.01) \cdot 10^6 \text{ (N)} \quad d_2 = (0.001\sin(0.2t) + 0.01\cos(0.3t)) \cdot 10^6 \text{ (N.m)}$$

cho kết quả tín hiệu quỹ đạo đầu ra của bộ điều khiển DMPC-O bám tốt theo quỹ đạo đặt, chứng tỏ tín hiệu bất định đã được ước lượng và bù tốt trong bộ điều khiển.

Sai lệch bám quỹ đạo  $e_x, e_y$  lớn nhất 4.2 m với quỹ đạo hình tròn và 4.5m với quỹ đạo hình sin, sai lệch bám hướng đi  $e_{hd}$  tương đối nhỏ khoảng 1.5 độ.

Tín hiệu bất định ước lượng được  $\hat{d}_1, \hat{d}_2$  từ tín hiệu bất định giả thiết  $d_1, d_2$  có sai lệch bám nhỏ (sai lệch bám ước lượng được thể hiện trên Hình 3.13g, j với quỹ đạo hình tròn và Hình 3.14g, j với quỹ đạo hình sin).

Tín hiệu trạng thái  $\underline{v} = [u \ v \ r]^T$  (tốc độ trượt dọc, trượt ngang, quay trở) quan sát được từ bộ QSTT có sai lệch bám  $e_u, e_v, e_r$  nhỏ (thể hiện trên Hình 3.13d, Hình 3.13e với quỹ đạo hình tròn và Hình 3.14d, Hình 3.14e với quỹ đạo hình sin).

Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $u_1 = \tau_u$ , mô-men quay trở  $u_2 = \tau_r$  có độ quá điều chỉnh nhỏ, nằm trong giới hạn chấp nhận được, tín hiệu điều khiển  $u_1, u_2$  từ bộ điều khiển DMPC-O trong trường hợp chưa bù thành phần bất định có dao động nhỏ, dao động này một phần là do ảnh hưởng từ tín hiệu trạng thái được quan sát từ bộ QSTT. Hai tín hiệu điều khiển  $\tau_u, \tau_r$  có sự khác nhau giữa trường hợp khi chưa bù và khi bù thành phần bất định hàm, sự khác nhau này là do trong trường hợp mô hình có thành phần bất định thì tín hiệu điều khiển được bù thêm một lượng bất định ước lượng được. Dấu và độ lớn tín hiệu điều khiển  $\tau_u, \tau_r$  khi được bù bất định có xu hướng bù (khử) thành phần bất định giả thiết tác động vào đối tượng (điều này được thể hiện trên đặc tính mô phỏng Hình 3.13f, g, h, i, j, k với quỹ đạo hình tròn và Hình 3.14f, g, h, i, j, k với quỹ đạo hình sin).

Chất lượng bộ điều khiển DMPC-O cũng phụ thuộc vào việc chọn ma trận xác định dương  $Q, R$ , số cửa sổ dự báo  $N$  và khoảng thời gian trượt  $T_a$  (receding horizon).

### **3.4 Kết luận chương 3**

#### **3.4.1 Những vấn đề đã thực hiện được**

Để thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy với mô hình tàu ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt ngang khi mô hình chứa thành phần bất định hàm ở đầu vào, chương 3 của luận án đã giải quyết được các vấn đề sau:

Xây dựng được mô hình bù bất định với tín hiệu bất định hàm ở đầu vào cho đối tượng tàu thủy có mô hình song tuyến.

Xây dựng được phương pháp ước lượng và bù bất định mới trên cơ sở tàu thủy là đối tượng có tham số động học biến đổi chậm. Mô phỏng bộ ước lượng tín hiệu bất định với các tín hiệu thử bất định khác nhau cho kết quả ước lượng tốt.

Xây dựng được cấu trúc, thuật toán bộ điều khiển dự báo bù bất định phản hồi trạng thái (DMPC-S) và phản hồi đầu ra (DMPC-O) trên cơ sở kết hợp bộ điều khiển MPC-S, MPC-O và bộ ước lượng bù bất định. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển DMPC-S, DMPC-O cho quỹ đạo đầu ra bám theo quỹ đạo đặt với sai lệch bám nhỏ.

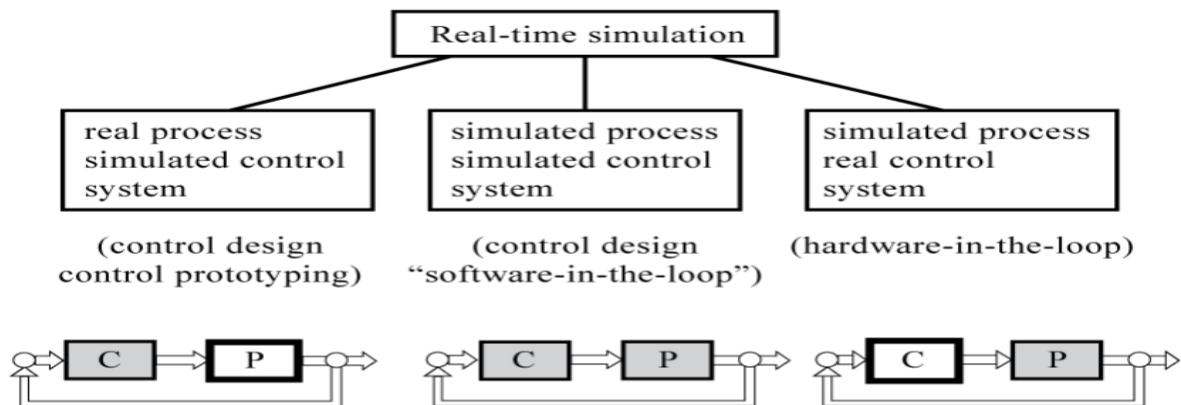
#### **3.4.2 Các vấn đề còn tồn tại**

Trong quá trình thiết kế bộ điều khiển DMPC-S, DMPC-O thuật toán chưa đưa ra được quy luật cụ thể để chọn các ma trận xác định dương  $Q, R$  trong các bộ điều khiển. Hiện tại, chúng mới chỉ được chỉnh định theo các kết luận định tính được nêu ở mục 2.2.2.

## CHƯƠNG 4 XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM, KIỂM CHỨNG, ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG BỘ ĐIỀU KHIỂN ĐÃ ĐỀ XUẤT

### 4.1 Phương pháp kiểm nghiệm bộ điều khiển chạy trên nền thời gian thực (Real time)

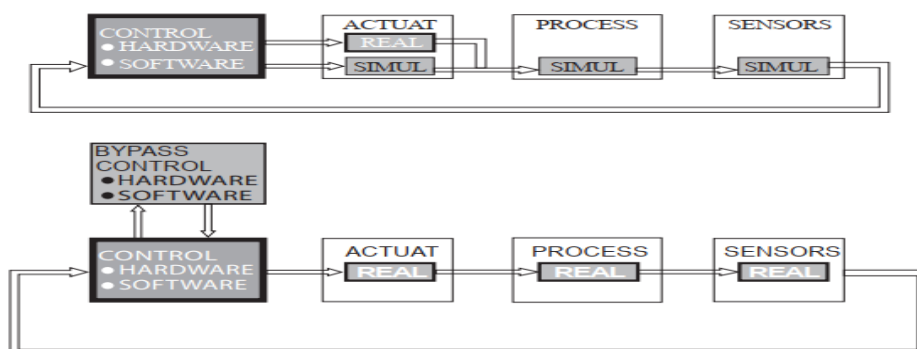
Mô phỏng là một phương pháp hay được sử dụng để nghiên cứu, phân tích đối tượng, chuẩn bị cho việc thiết kế hệ thống. Thực hiện mô phỏng sẽ giảm chi phí thiết kế chế tạo một sản phẩm mới, tránh được những sai sót không đáng có khi ứng dụng thực tế. Nhưng một hạn chế của mô hình mô phỏng là không phản ánh được chính xác đối tượng theo thời gian thực. Vì vậy, thực hiện mô phỏng thời gian thực (real time) là một bước vô cùng quan trọng nhằm đánh giá chất lượng bộ điều khiển và những tác động từ môi trường ngoài đến hệ thống. Cơ sở thực hiện mô phỏng thời gian thực là cài đặt phần cứng vào mạch vòng điều chỉnh của cấu trúc mô phỏng. Các phương pháp mô phỏng trên nền thời gian thực được chỉ ra trên Hình 4.1



Hình 4.1 Các phương pháp mô phỏng trên nền thời gian thực

Trong các phương pháp mô phỏng thời gian thực trên Hình 4.1 thì phương pháp mô phỏng Hardware-in-the-loop (HIL) được sử dụng phổ biến nhất. Mô phỏng HIL được đặc trưng bởi việc vận hành các thành phần thực kết hợp với các thành phần mô phỏng theo thời gian thực. Thường phần cứng và phần mềm của hệ điều khiển là hệ thống thực như được dùng trong dây chuyền sản xuất. Đối tượng điều khiển (bao gồm các cơ cấu chấp hành, các quá trình vật lý và các cảm biến) có thể là thực hoặc dạng mô hình mô phỏng song mô hình đó cần phải mô tả đầy đủ các đặc điểm cơ bản của đối tượng. Cấu trúc mô phỏng thời gian thực được chỉ ra trên

Hình 4.2. Mô phỏng HIL cho thấy đáp ứng của bộ điều khiển trong thời gian thực, với các kích thích ảo thực tế. Do đó mô phỏng thời gian thực không chỉ cho phép ta đánh giá khả năng phần cứng mà còn giúp ta đánh giá khả năng của phần mềm điều khiển dưới những điều kiện môi trường khác nhau.



Hình 4.2 Cấu trúc lai mô phỏng thời gian thực

## 4.2 Xây dựng mô hình thực nghiệm, kiểm chứng bộ điều khiển MPC đề xuất theo phương pháp HIL (Hardware In the Loop)

### 4.2.1 Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC

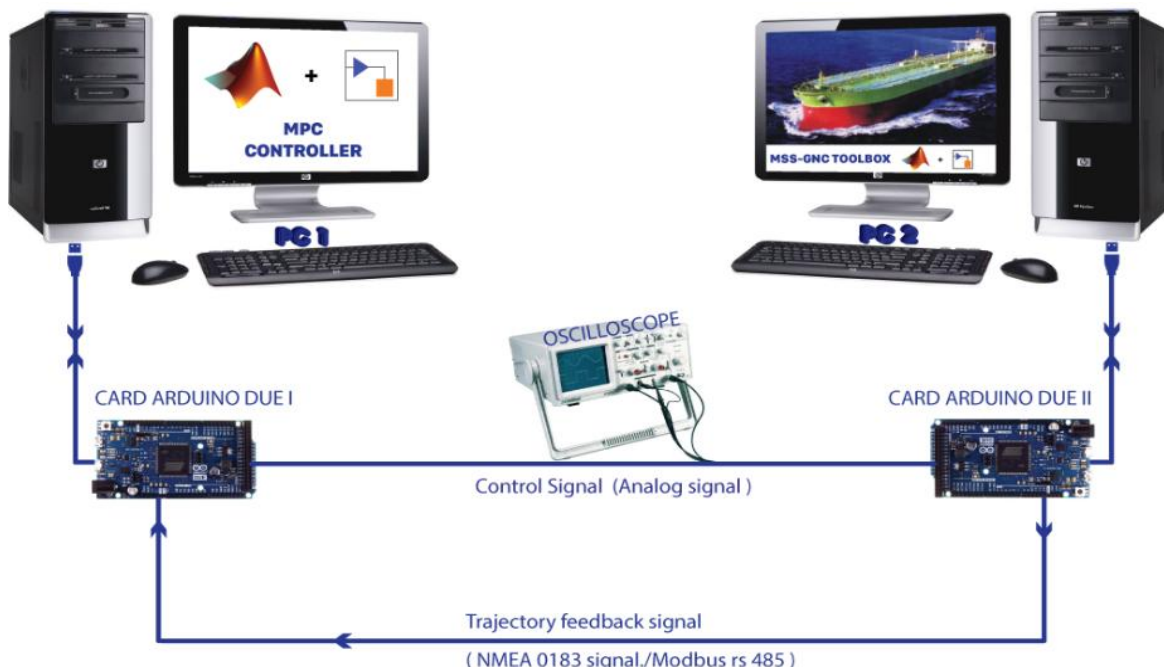
Đối với những đối tượng có cấu trúc phức tạp, hoạt động trong môi trường phức tạp và không có khả năng làm thử nghiệm thực tế hoàn toàn như tàu thủy thì phương pháp thực nghiệm theo HIL là một giải pháp tốt để đánh giá, thử nghiệm bộ điều khiển trên nền thời gian thực.

Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC luận án đề xuất có cấu trúc như Hình 4.3 bao gồm: máy tính 1 cài đặt bộ điều khiển MPC, máy tính 2 cài đặt đối tượng điều khiển, 2 Card giao tiếp Matlab Arduino Due để truyền nhận dữ liệu.

Bộ điều khiển MPC thiết kế theo các thuật toán MPC-S, MPC-O, DMPC-S, DMPCO được cài đặt trên máy tính số 1 (PC1) và Card ghép nối máy tính Arduino Due 1.

Đối tượng điều khiển (tàu thủy) trong phần thực nghiệm này luận án sử dụng mô hình tàu được xây dựng, thiết kế sẵn trong Tool box: MSS-GNC TOOLBOX và được cài đặt vào thư viện Simulink của Matlab (Tool box MSS-GNC) được luận án giới thiệu chi tiết trong phần phụ lục 3). Mô hình tàu thiết kế trong Tool box: MSS-

GNC TOOLBOX giống như mô hình tàu thực, có đầy đủ những tính chất động học của đối tượng tàu thực, được cài đặt trên máy tính số 2 (PC2) và Card kết nối vào/ra Arduino Due 2.



Hình 4.3 Cấu trúc mô hình thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất

Tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển MPC (trên PC1) được đưa sang điều khiển đối tượng (trên PC2) thông qua tín hiệu truyền nhận Analog (tín hiệu tương tự) giữa 2 Card Arduino Due. Luận án sử dụng tín hiệu điều khiển đối tượng (trên PC2) là tín hiệu Analog với mục đích để kiểm tra ảnh hưởng của nhiễu môi trường tới tín hiệu điều khiển. Và việc sử dụng tín hiệu điều khiển dạng Analog cũng là để phù hợp với thực tế trong bộ điều khiển chuyển động tàu thủy, tín hiệu điều khiển này được đo kiểm tra bằng OSCILLOSCOPE.

Tín hiệu quỹ đạo và hướng đi của tàu (trên PC2) phản hồi về bộ điều khiển MPC (trên PC1) thông qua truyền thông tín hiệu giữa hai Card Arduino Due 1, 2. Tín hiệu quỹ đạo, hướng đi thực của tàu ban đầu ở dạng số được chuyển sang tín hiệu theo chuẩn Hàng hải NMEA 0183 (National Marine Electronics Association) từ Card Arduino Due 2 (trên PC2) sau đó truyền thông tới Card Arduino Due 1 và được chuyển lại sang tín hiệu số trước khi đưa vào bộ điều khiển (trên PC1). Việc mã hóa tín hiệu quỹ đạo, hướng theo tín hiệu truyền NMEA 0183 với mục đích kiểm tra ảnh hưởng của nhiễu môi trường tới việc truyền dẫn tín hiệu quỹ đạo và

hướng tàu theo chuẩn Hàng hải quốc tế NMEA 0183. Và thực tế trên tàu thủy tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu được lấy từ GPS và la bàn điện đưa vào bộ điều khiển cũng là tín hiệu theo chuẩn NMEA0183.

#### 4.2.2 Thư viện mô phỏng thiết bị hàng hải MSS-GNC Toolbox

MSS-GNC (Marine System Simulator - Guidance Navigation Control) Toolbox là thư viện dùng để mô phỏng đối tượng, hệ thống điều khiển, dẫn đường trong lĩnh vực Hàng hải. MSS-GNC Toolbox được tác giả Thor I. Fossen và Tristan Perez xây dựng trên nền phần mềm Mathwork phiên bản Matlab từ 2007 trở lại đây. Thư viện MSS-GNC Toolbox mô tả đầy đủ mô hình vật lý của các thiết bị, các hệ thống điều khiển trong lĩnh vực Hàng hải, thể hiện trên Hình 4.4 bao gồm:

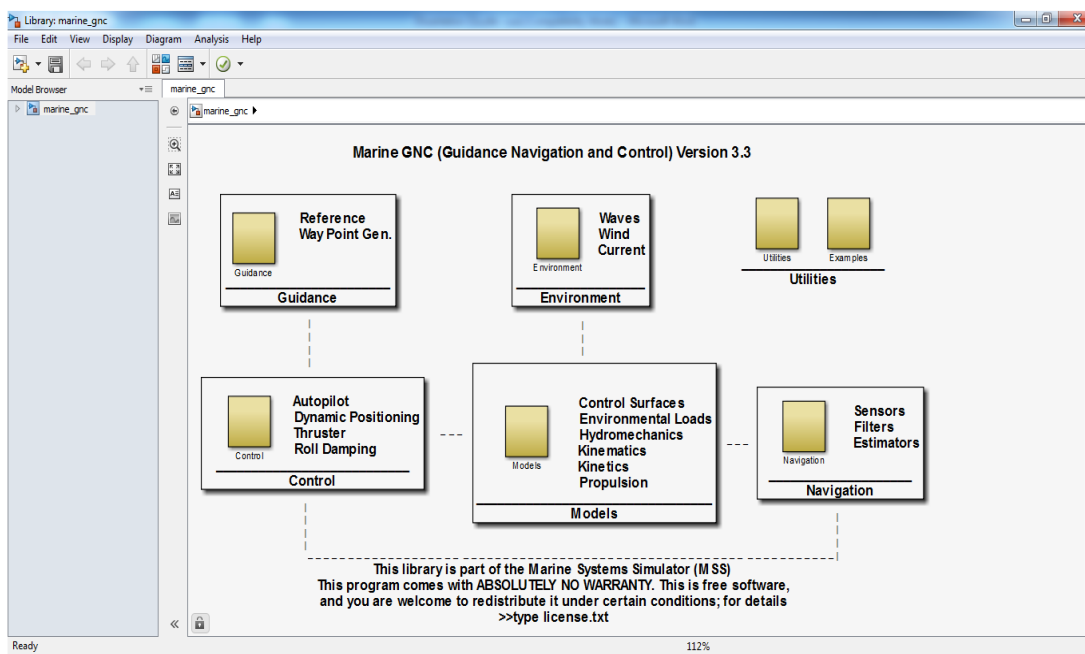
Hệ thống dẫn đường,

Hệ thống lái tự động, ổn định động (DP), hệ thống điều khiển lác ngang,...

Mô hình tàu, mô hình cơ cấu thực hiện như chân vịt, bánh lái, mô hình mô tả động học,...

Mô hình mô tả các nhiễu loạn môi trường: sóng, gió, dòng chảy,...

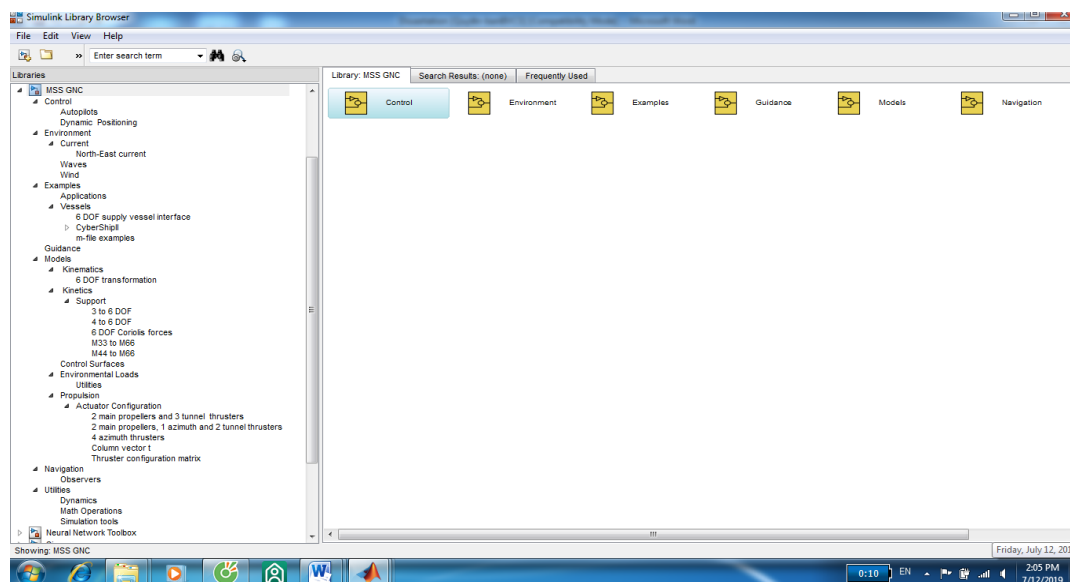
Mô hình các thiết bị đo báo dẫn đường: Radar, La bàn, GPS,...



Hình 4.4 Thư viện mô phỏng hệ thống điều khiển Hàng hải MSS-GNC

MSS-GNC Toolbox được cài đặt vào thư viện Simulink của Matlab và sử dụng như một thư viện con trong Simulink. Để sử dụng thư viện MSS-GNC, tiến

hành cài đặt file *MSS.GNC.TOOLBOX.exe* để tạo thư viện MSS trong Simulink như Hình 4.5. Khi cài đặt xong thư viện MSS-GNC được sử dụng như những thư viện sẵn có của Matlab - Simulink.



*Hình 4.5 Thư viện MSS-GNC Toolbox cài đặt trong Simulink-Matlab*

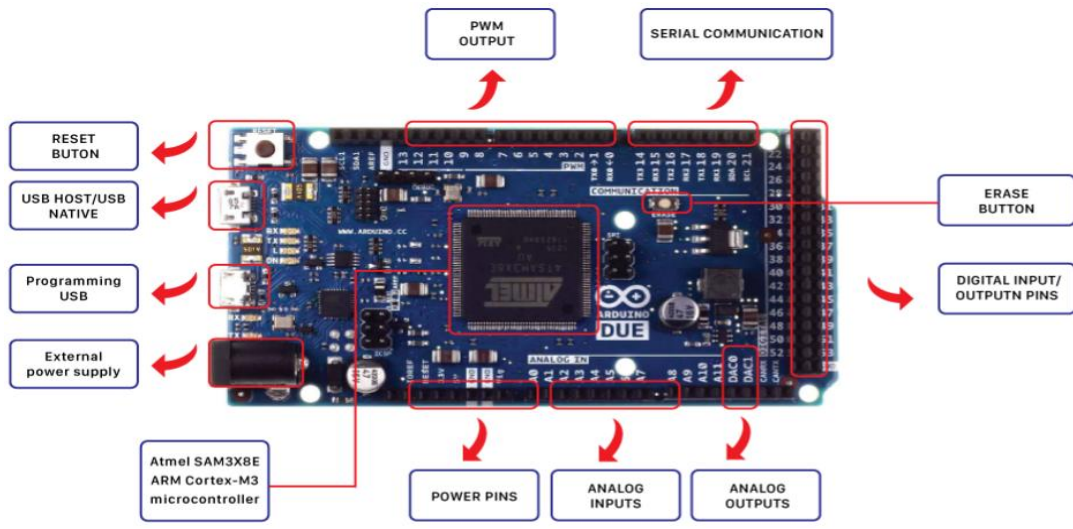
Chi tiết các thư viện ứng dụng điều khiển chuyển động tàu thủy trong MSS-GNC Toolbox được trình bày trong phần phụ lục PL4 của luận án.

### **4.2.3 Card ghép nối Arduino Due R3, thư viện Arduino Library I/O**

Card Arduino là bo mạch mã nguồn mở, Arduino có thể lưu trữ chương trình điều khiển, hoạt động độc lập với chức năng thực hiện các luật điều khiển, kết nối với máy tính, kết nối với một thiết bị Arduino khác, hay các thiết bị điện tử khác...Card Arduino Due R3 là một vi mạch điện tử điều khiển dựa trên nền tảng của chip AT91XAM3X8EA, nó tích hợp tất cả các tính năng cần thiết của một vi điều khiển. Cấu trúc Card Arduino Due R3 như hình Hình 4.6.

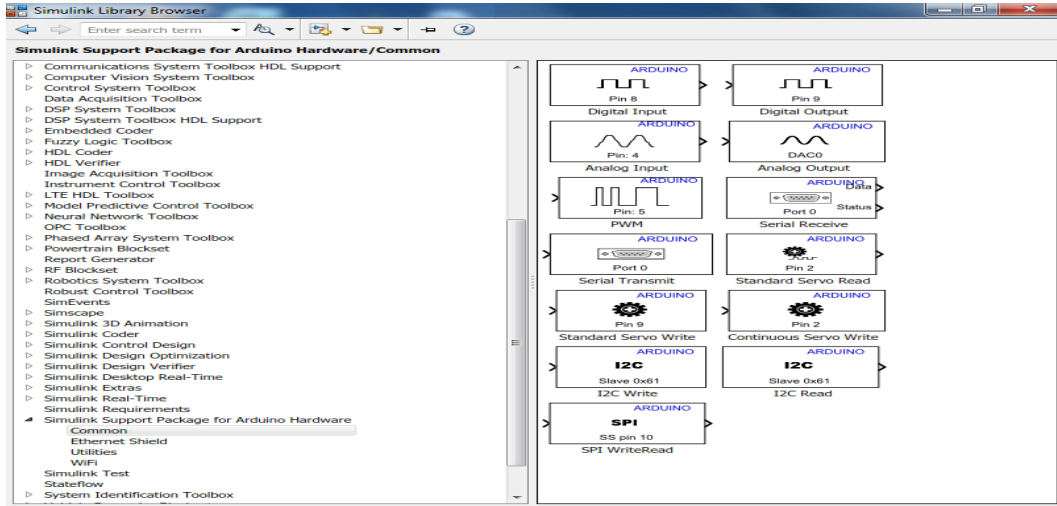
Card Arduino Due R3 có 54 ngõ I/O số, trong đó có 12 đầu ra dạng PWM, 12 ngõ vào Analog, 2 ngõ ra Analog với bộ biến đổi DAC (Digital Analog Convert), truyền thông công USB và 4 cổng Serial Communication.





Hình 4.6 Card ghép nối máy tính Arduino due R3 giao tiếp với Matlab

Một ưu điểm nổi bật của Card Arduino Due R3 là có thể kết nối với máy tính qua cổng USB và giao tiếp với phần mềm Matlab - Simulink thông qua thư viện Arduino I/O cài đặt trong Simulink như Hình 4.7. Do đó một chương trình điều khiển trên Matlab có thể xuất tín hiệu điều khiển ra ngoại vi và nhận tín hiệu từ ngoại vi vào thông qua Card Arduino Due R3.



Hình 4.7 Thư viện Arduino I/O trong Matlab - Simulink

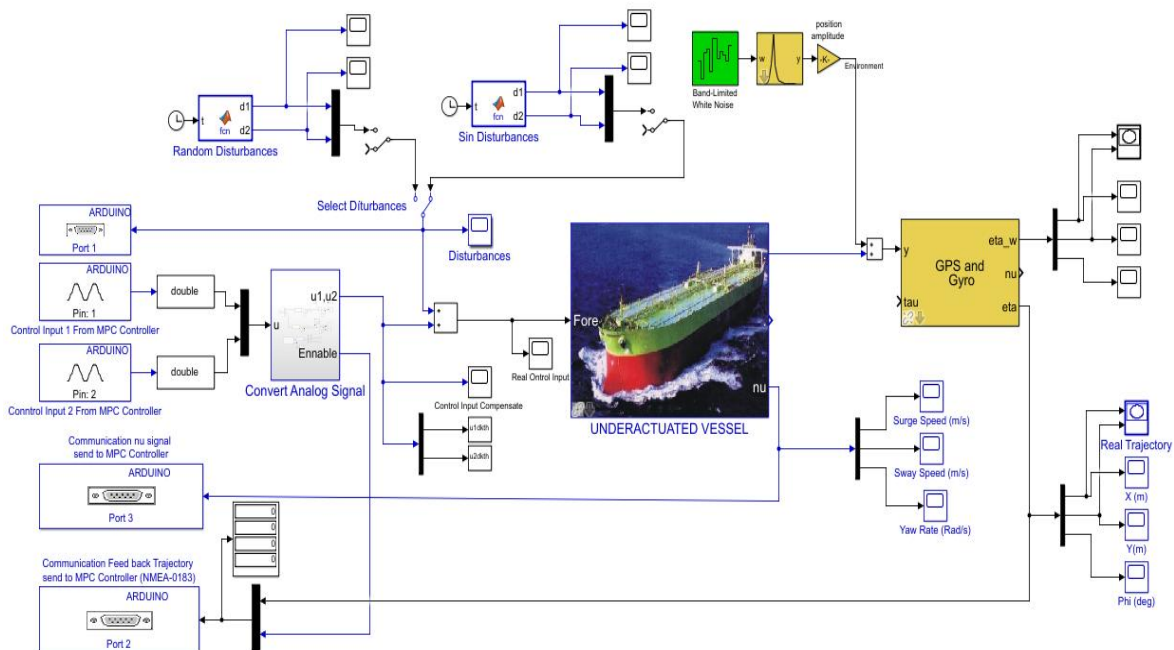
## 4.2.4 Ghép nối mô hình thực nghiệm HIL, cài đặt thông số với bộ điều khiển MPC đề xuất

### 4.2.4.1 Mô hình tàu, mô hình nhiễu bất định và tham số cài đặt

Đối tượng sử dụng để thực nghiệm là tàu thủy có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành được lấy từ thư viện *Vessel Model* trong *MSS-GNC*, với các tham số cài đặt lấy từ tài liệu [21]. Các thông số tàu và tham số trong mô hình tàu được khai báo, cài đặt trên *m.file* riêng về dữ liệu thông số tàu. File dữ liệu này được khai báo và lưu vào *Workspace* của Matlab khi chạy chương trình *m.file*.

Tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển MPC (trên PC1)  $u_1 = \tau_u, u_2 = \tau_r$  được kết nối từ cổng vào tương tự P1, P2 của Card Arduino 2, trong đó chân DAC0 được nối tới P1, và chân DAC1 được nối tới P2.

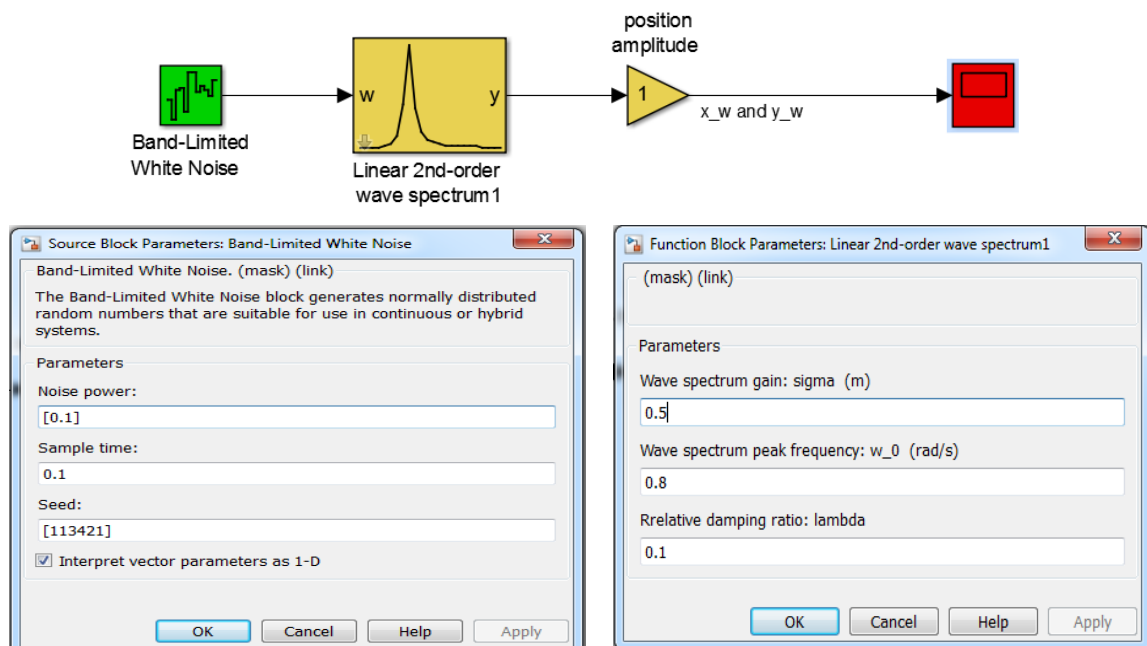
Tín hiệu quỹ đạo thực của tàu (trên PC2) phản hồi về bộ điều khiển (trên PC1) thông qua kết nối qua cổng COM3 Transmitter giữa Card Arduino 1, 2. Mô hình nhiễu bất định tác động vào đối tượng được xây dựng trên khối *Disturbances*. Chi tiết sơ đồ kết nối mô hình đối tượng trên PC2 như Hình 4.8.



Hình 4.8 Mô hình tàu thủy trong thư viện *MSS - GNC Toolbox* được ghép nối và cài đặt trên PC2

#### 4.2.4.2 Xây dựng, cài đặt mô hình nhiễu đo

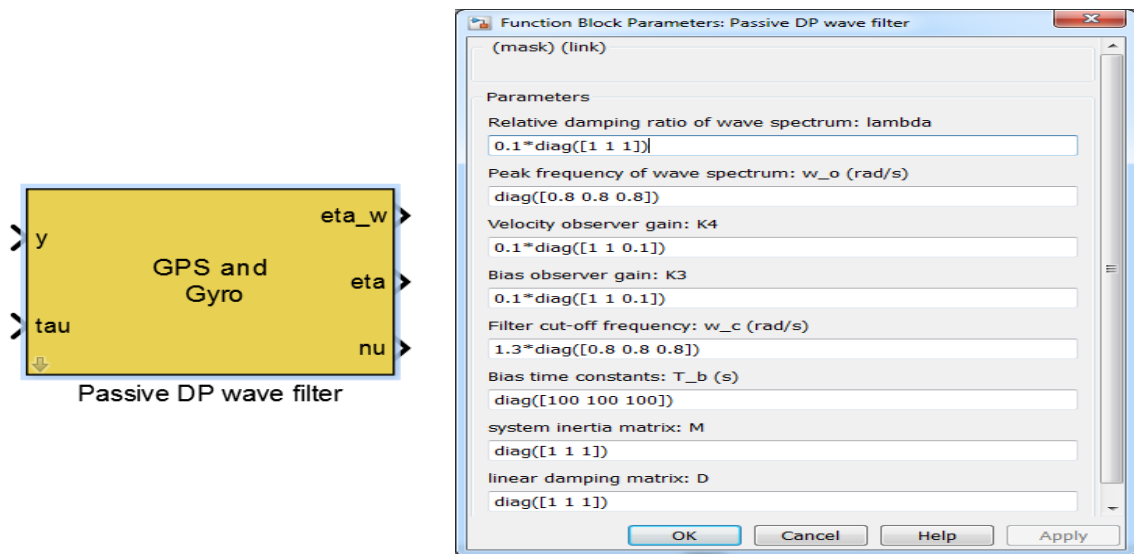
Thực tế trên tàu thủy các tín hiệu từ thiết bị đo dẫn đường như Radar, La bàn, GPS,...đều chịu ảnh hưởng của nhiễu đo từ môi trường như sóng, gió, dòng chảy,... Do đó để kiểm tra chất lượng bộ điều khiển, bộ quan sát cần tạo ra mô hình các nhiễu đo tác động vào thiết bị đo hướng và quỹ đạo là la bàn và GPS. Mô hình nhiễu đo được lấy từ thư viện *Model Environment* trong MSS-GNC Tool box. Trên mô hình cho phép thay đổi tham số cài đặt giá trị cường độ tác động của nhiễu đo khác nhau, các tham số cài đặt như Hình 4.9.



Hình 4.9 Mô hình nhiễu đo và tham số cài đặt

#### 4.2.4.3 Ghép nối, cài đặt mô hình bộ đo tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu bằng GPS - Gyrocompass

Trên tàu thủy tín hiệu quỹ đạo, vị trí tàu được xác định thông qua thiết bị GPS, hướng tàu được xác định bằng thiết bị la bàn điện. Để mô hình thực nghiệm càng gần với thực tế mô hình điều khiển trên tàu thủy, luận án sử dụng mô hình GPS - GYRO trong thư viện *Model Navigation* của MSS - GNC Tool box để đo xác định quỹ đạo và hướng tàu phản hồi về bộ điều khiển, mô hình GPS - GYRO và chi tiết các tham số cài đặt cho GPS - GYRO được đưa ra trong Hình 4.10.



Hình 4.10 Mô hình xác định quỹ đạo, hướng bằng GPS- GYRO

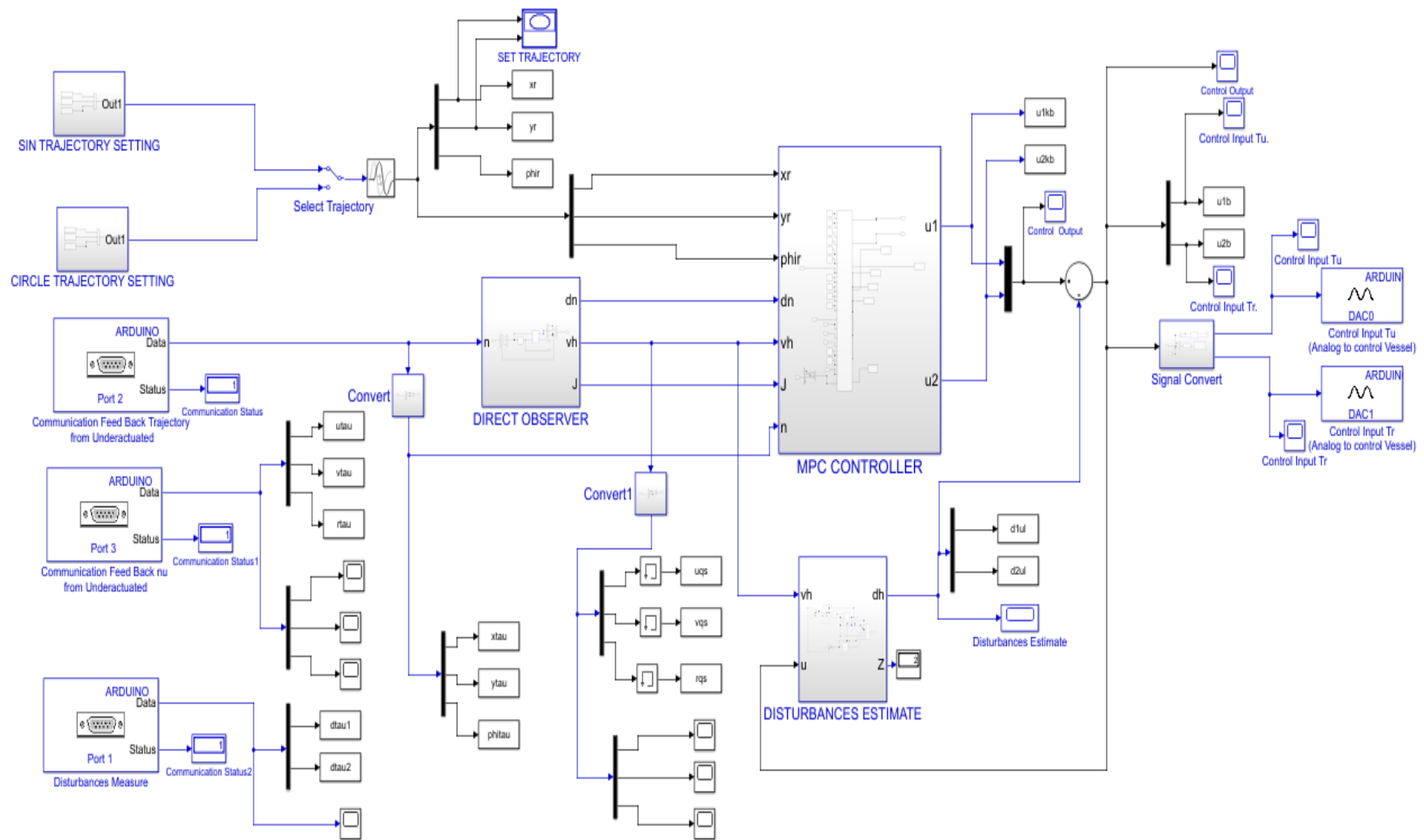
#### 4.2.4.4 Ghép nối, cài đặt Card Arduino Due R3 Atemega16u2 và chuyển đổi tín hiệu NMEA0183

Trên tàu thủy tín hiệu quỹ đạo, hướng của tàu xác định bởi GPS - GYRO là tín hiệu theo chuẩn Hàng hải (dạng tín hiệu NMEA 0183). Để đánh giá sự ảnh hưởng nhiều từ môi trường tới tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu theo chuẩn NMEA 0183. Luận án tiến hành chuyển đổi tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu thực của tàu ở dạng số (từ PC2) sang tín hiệu theo chuẩn NMEA 0183 và truyền thông qua cổng Seri COM3 của Card Arduino 2 tới cổng Seri COM3 của Card Arduino 1. Tín hiệu quỹ đạo, hướng tàu dưới dạng NMEA 0183 được chuyển đổi lại sang tín hiệu số qua Card Arduino 1 trước khi đưa vào bộ điều khiển PC1.

Code khai báo chuyển đổi tín hiệu NMEA0183 và giao tiếp Card Arduino với Matlab - Simulink trên máy tính thông qua thư viện Arduino I/O library được đưa ra trong phần phụ lục 5.

#### 4.2.4.5 Mô hình bộ điều khiển MPC cài đặt trên máy tính 1 (PC1)

Mô hình bộ điều khiển MPC, bộ quan sát trạng thái, bộ ước lượng bù bất định, và ghép nối các cổng tín hiệu vào/ra được xây dựng và cài đặt trên PC1, thể hiện trên Hình 4.11.



Hình 4.11 Mô hình bộ điều khiển MPC được cài đặt trên PC1

#### 4.2.4.6 Hình ảnh mô hình vật lý thực nghiệm HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất



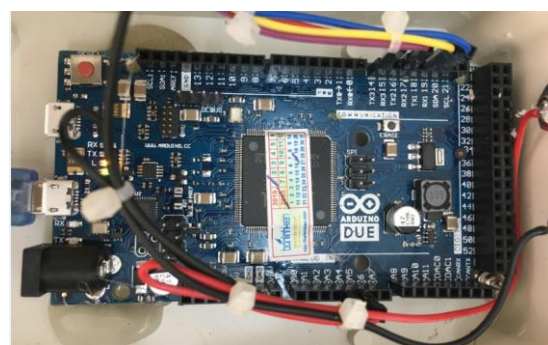
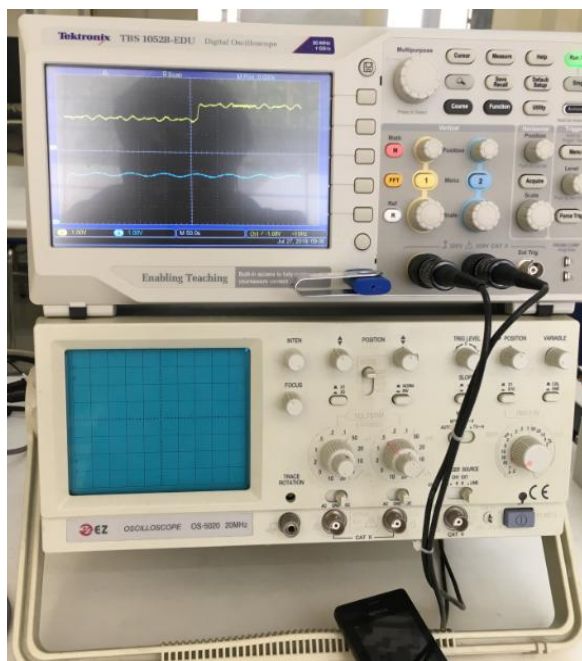
a) Hình ảnh tổng thể mô hình vật lý



b) Hình ảnh đài lái bộ điều khiển MPC



c) Hình ảnh bộ điều khiển MPC trên PC1, Underactuated Ship trên PC2



d) Hình ảnh bộ đo tín hiệu Oscilloscope e) Hình ảnh Card kết nối Arduino Due

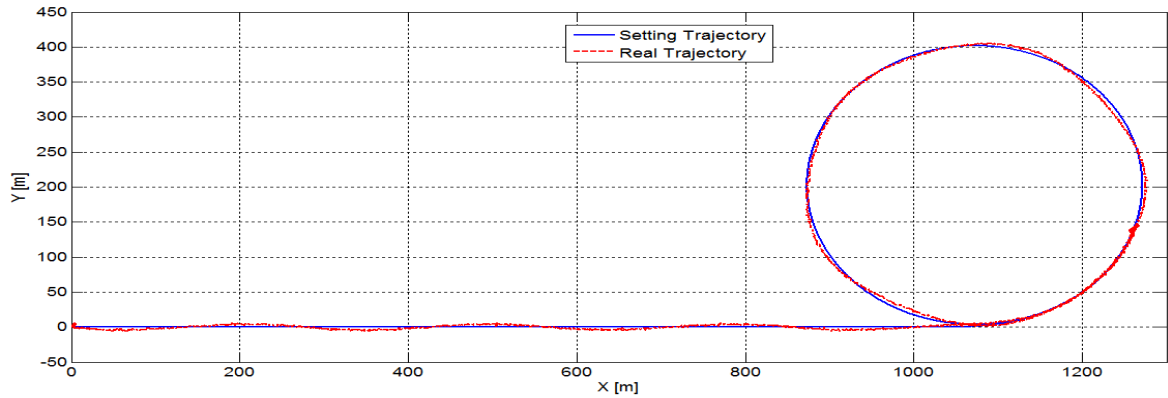


f) Hình ảnh bộ cấp nguồn ổn áp 5V cho Card Arduino Due

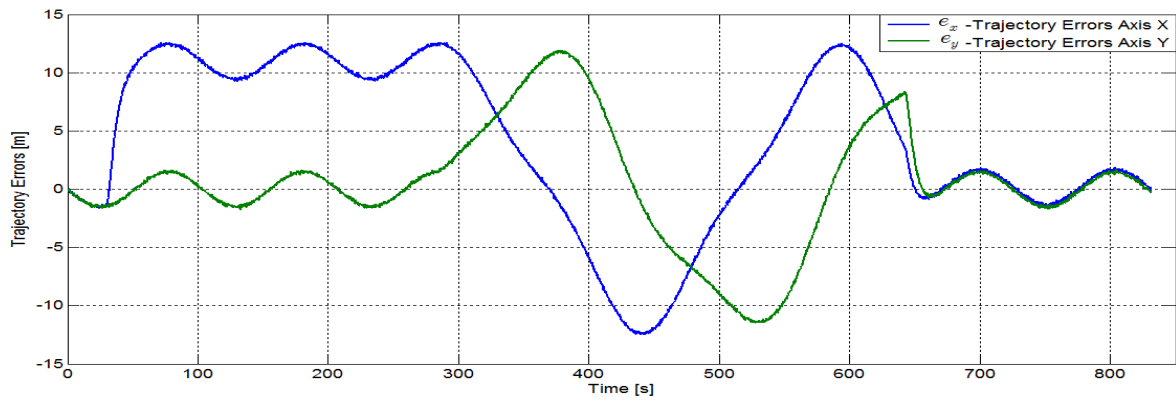
Hình 4.12 Hình ảnh mô hình vật lý thực nghiệm tại phòng thí nghiệm Mô hình hóa tại trường Đại học Hàng hải Việt Nam

### 4.3 Kết quả thực nghiệm, kiểm chứng bộ điều khiển MPC đề xuất

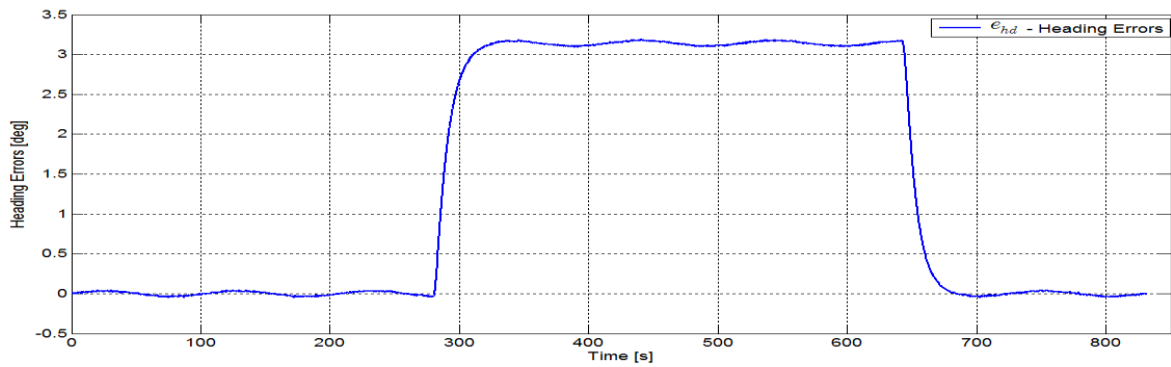
Để kiểm tra được chất lượng thuật toán bộ điều khiển MPC, chất lượng bộ quan sát trực tiếp và bộ ước lượng bù bất định đề xuất, luận án cài đặt thực nghiệm bộ điều khiển theo thuật toán DMPC-O. Bởi bộ điều khiển DMPC-O là sự ghép nối của thuật toán MPC-S, bộ QSTT và bộ ước lượng bù bất định. Thực nghiệm thu được kết quả như sau:



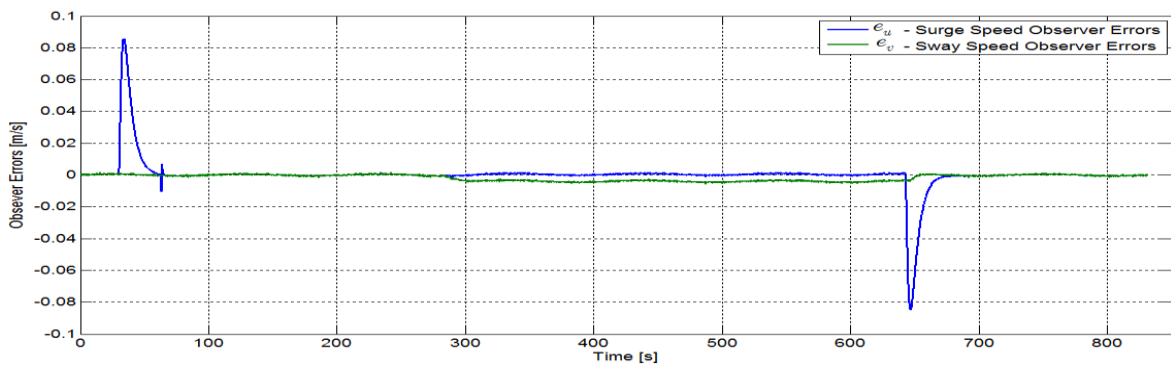
a) Quỹ đạo chuyển động của tàu mô hình trong MSS-GNC



b) Sai lệch bám quỹ đạo

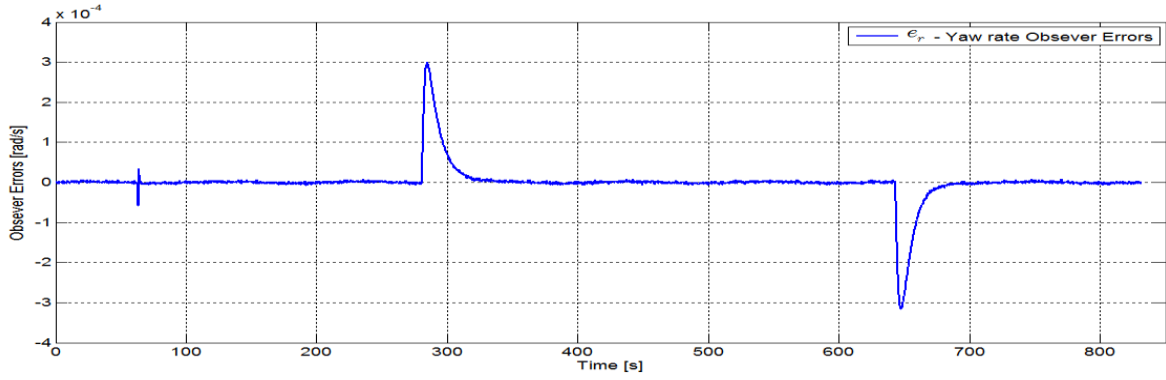


c) Sai lệch bám hướng đi

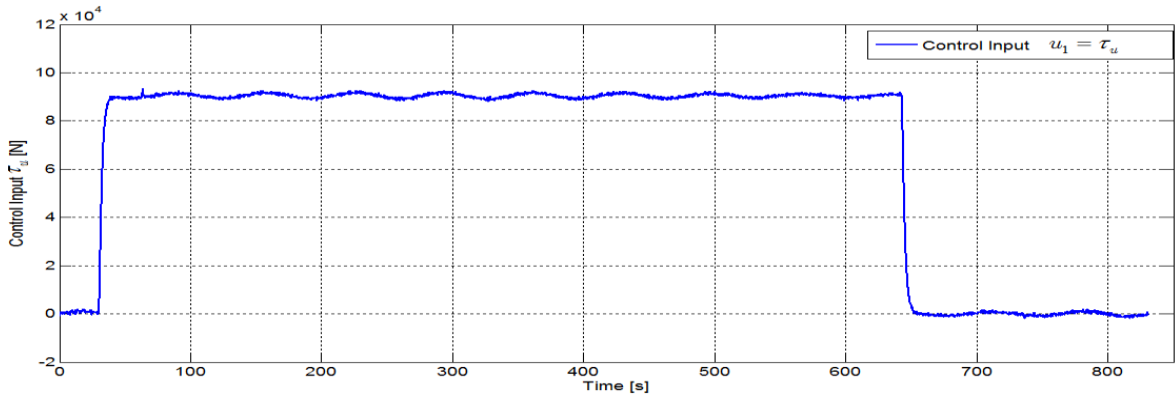


d) Sai lệch quan sát tốc độ trượt dọc, trượt ngang

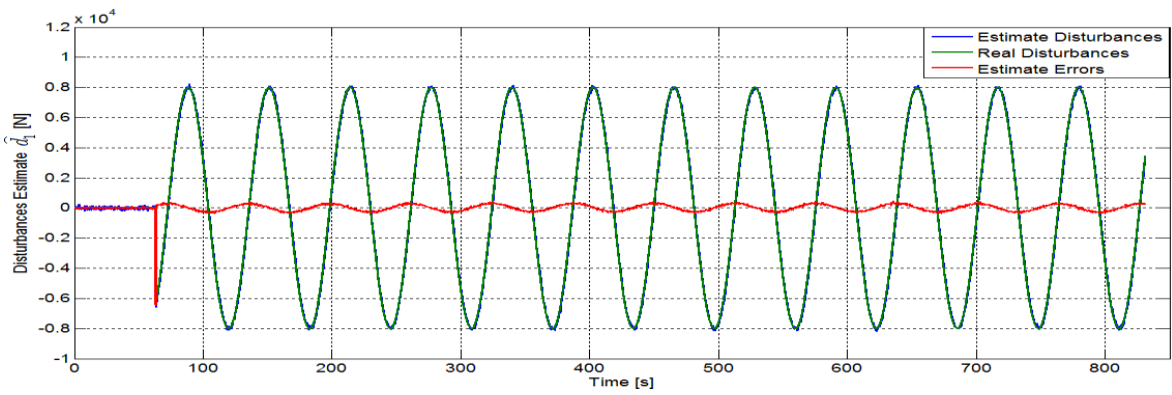




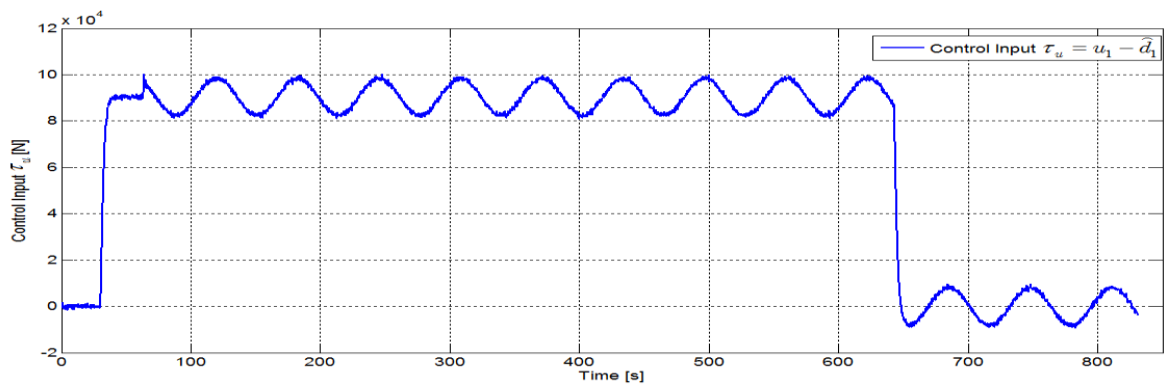
e) Sai lệch quan sát tốc độ quay trở



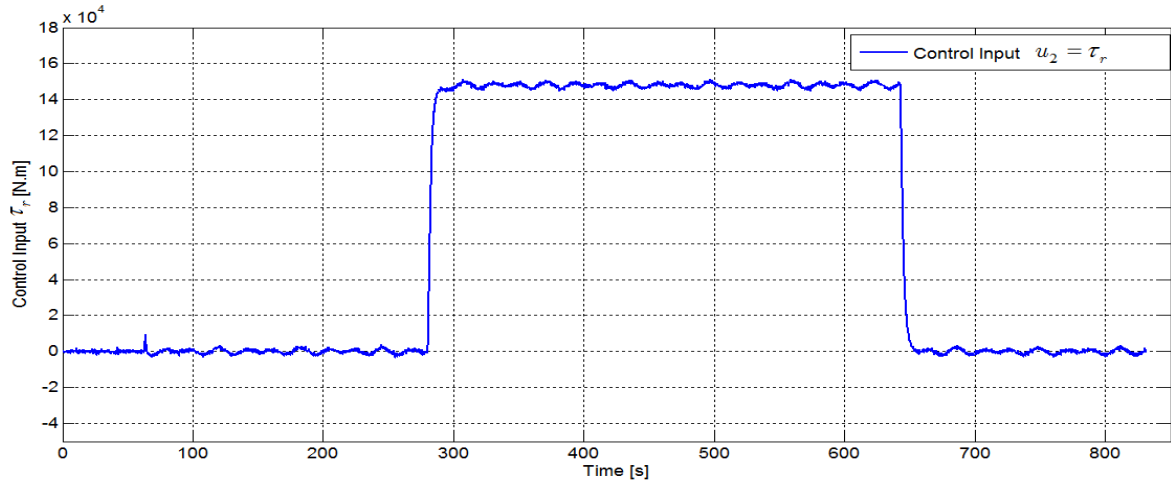
f) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u = u_1$  khi chưa bù bất định



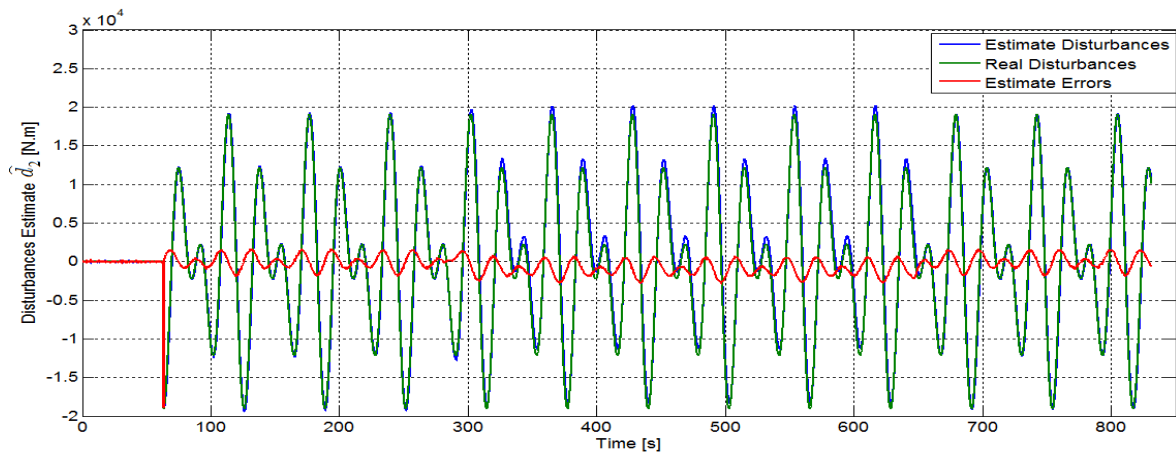
g) Ước lượng  $\hat{d}_1$  từ thành phần bất định  $d_1$



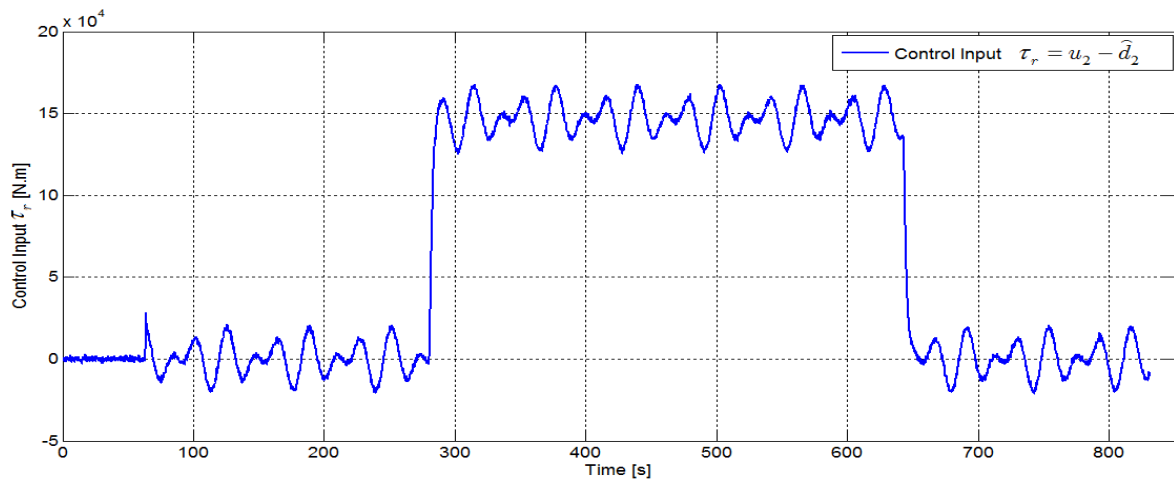
h) Tín hiệu điều khiển lực trượt dọc  $\tau_u = u_1 - \hat{d}_1$  khi được bù bất định bởi  $\hat{d}_1$



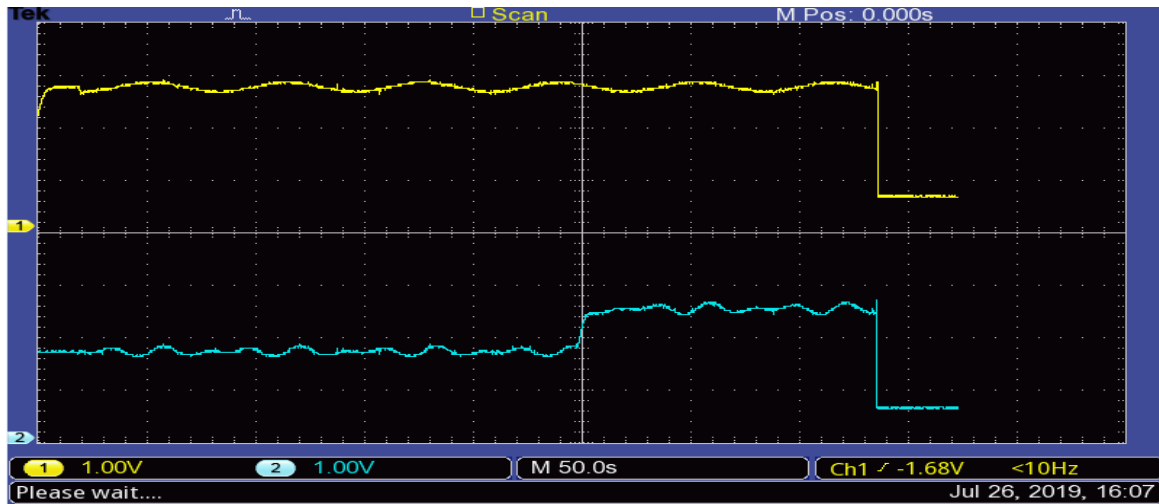
i) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r = u_2$  khi chưa bù bất định



j) Ước lượng  $\hat{d}_2$  từ thành phần bất định  $d_2$



k) Tín hiệu điều khiển mô-men quay trở  $\tau_r = u_2 - \hat{d}_2$  khi được bù bất định bởi  $\hat{d}_2$



l) Tín hiệu điều khiển  $\tau_u, \tau_r$  đo được từ Oscilloscope

Hình 4.13 Kết quả thực nghiệm HIL với bộ điều khiển DMPC-O-quỹ đạo hình tròn

#### Nhận xét kết quả thực nghiệm:

Kết quả thực nghiệm bộ điều khiển đề xuất DMPC-O với đối tượng là mô hình tàu trong MSS-GNC Tool box cho các đặc tính về quỹ đạo, đặc tính về bộ quan sát, đặc tính bộ ước lượng bù bất định và đặc tính tín hiệu điều khiển giống như mô phỏng (quỹ đạo tàu bám tốt quỹ đạo đặt, tín hiệu quan sát bởi bộ QSTT với sai lệch nhỏ, bộ ước lượng bất định ước lượng tốt tín hiệu bất định theo giả thiết).

Tuy nhiên so với kết quả khi mô phỏng bộ điều khiển DMPC-O (hình 3.13) kết quả thực nghiệm có đặc điểm như sau:

Quỹ đạo thực nghiệm với mô hình tàu trong MSS-GNC Tool box có hiện tượng dao động nhỏ, điều này thể hiện tính quán tính của đối tượng tàu thực.

Sai lệch bám quỹ đạo, bám hướng, sai lệch quan sát tốc độ trượt dọc, trượt ngang, tốc độ quay trở lớn hơn so với kết quả khi mô phỏng (hình 3.13), (nhưng vẫn có giá trị nhỏ so với quỹ đạo chuyển động của tàu).

Các đặc tính tín hiệu điều khiển, tín hiệu quan sát, tín hiệu bộ ước lượng có trễ một thời gian ngắn so với khi mô phỏng một khoảng thời gian (trùng ứng với khoảng thời gian của một nhịp truyền nhận tín hiệu qua đường truyền vật lý).

Thời gian đáp ứng điều khiển có chậm hơn khi điều khiển qua đường truyền vật lý.

Tín hiệu điều khiển đối tượng  $u_1 = \tau_u, u_2 = \tau_r$  thông qua truyền nhận tín hiệu tương tự có hiện tượng dao động nhỏ do ảnh hưởng của nhiễu môi trường nhưng ảnh hưởng này là nhỏ.

Tín hiệu quỹ đạo và hướng đi thực của tàu được truyền thông dưới dạng tín hiệu NMEA0183 trên nền Modbus RS485 chịu ảnh hưởng rất ít bởi môi trường ngoài. Tuy nhiên, giữa tín hiệu quỹ đạo, hướng của đối tượng và tín hiệu quỹ đạo, hướng đưa về bộ điều khiển có trễ một khoảng thời gian nhỏ.

#### **4.4 Kết luận chương 4**

Thông qua thực nghiệm theo phương pháp HIL với bộ điều khiển MPC đề xuất, bộ QSTT và bộ ước lượng bù bất định và mô hình tàu trên MSS-GNC đã thu được kết quả như sau:

Kiểm nghiệm được chất lượng bộ điều khiển MPC, bộ quan sát trực tiếp, bộ ước lượng bù bất định khi có ảnh hưởng của môi trường vật lý.

Kiểm nghiệm được chất lượng tín hiệu điều khiển khi truyền trong môi trường vật lý.

Thực nghiệm cho thấy chất lượng bộ điều khiển MPC, bộ quan sát trực tiếp, bộ ước lượng và bù bất định cho kết quả tốt giống với kết quả khi mô phỏng và đúng với lý thuyết đặt ra.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Những vấn đề đã được giải quyết

Quá trình thực hiện đề tài, luận án đã giải quyết được những nội dung sau:

1. Đã nghiên cứu xây dựng được thuật toán bộ điều khiển dự báo MPC trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến cho đối tượng tàu thủy có mô hình toán dạng thiếu cơ cấu chấp hành khi mô hình tàu xác định và mô hình tàu có chứa thành phần bất định. Luận án chứng minh được bộ điều khiển đề xuất là ổn định tiệm cận. Điểm mới của thuật toán này là sử dụng nguyên lý điều khiển MPC tuyến tính để điều khiển đối tượng phi tuyến (tàu thủy), trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình phi tuyến dọc theo trục thời gian. Ưu điểm của bộ điều khiển này là số lệnh tính toán ít, thời gian tính toán nhanh, giải quyết bài toán tối ưu đơn giản.
2. Đã nghiên cứu và xây dựng được bộ quan sát trạng thái mới theo phương pháp quan sát trực tiếp từ mô hình liên tục tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang với giả thiết là không có nhiễu đo.
3. Đã nghiên cứu và xây dựng được phương pháp ước lượng và bù thành phần bất định mới (phương pháp xấp xỉ thành phần bất định dựa trên cơ sở tối ưu hóa sai lệch so với mô hình mẫu) để giải quyết bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy khi mô hình có chứa thành phần bất định.
4. Xây dựng được mô hình thực nghiệm theo phương pháp HIL để kiểm nghiệm chất lượng bộ điều khiển đề xuất với mô hình tàu thực trong MSS-GNC.

### Những vấn đề còn tồn tại

Những vấn đề trong quá trình thực hiện đề tài mà luận án còn bỏ ngỏ, chưa giải quyết được gồm có:

1. Chưa đưa ra được nguyên tắc chọn hai ma trận đối xứng xác định dương  $Q, R$  ở bước khởi tạo ban đầu trong các lưu đồ thuật toán một cách tốt nhất.
2. Bộ điều khiển chưa được thử nghiệm trong môi trường thực trên tàu biển.

## CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

### I. Công trình công bố trong nước

- 1 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, Phạm Kỳ Quang** (2015): *Ổn định lắc ngang tàu thủy sử dụng phương pháp toàn phương gián tiếp*. Tạp chí KHCHNH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 42, 04-2015, trang 40
- 2 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, Phạm Kỳ Quang** (2015): *Điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính chuyển động tàu thủy*. Tạp chí KHCHNH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 43, 08-2015, trang 23-27
- 3 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2016): *Nâng cao chất lượng ổn định hướng đi tàu thủy sử dụng bộ quan sát trạng thái*. Hội nghị quốc tế khoa học công nghệ Hàng hải 26-29/10/2016. ISBN: 978-604-937-127-1, trang 373-379
- 4 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng** (2017), “*Điều khiển chuyển động tàu cánh ngầm sử dụng phương pháp thích nghi trực tiếp*”, Tuyển tập công trình KHCHN – Hội thảo điều khiển và tự động hóa cho phát triển bền vững CASD – 2017, trang 29.
- 5 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Ổn định hướng đi tàu thủy dựa trên điều khiển dự báo theo mô hình*. Tạp chí KHCHNH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 58, 04-2019, trang 27-31
- 6 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Điều khiển chuyển động theo quỹ đạo tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên mô hình dự báo hệ song tuyến*. Tạp chí GTVT-Bộ giao thông vận tải, số 05/2019, trang 126-129
- 7 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng**, (2019): *Thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt dựa theo nguyên lý RHC trên nền LQR*. Tạp chí KHCHN-Trường Đại học giao thông vận tải Hồ Chí Minh, số 32-05/2019, trang 41-46
- 8 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, Trương Công Mỹ** (2019): *Xây dựng bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo dựa trên mô hình dự báo theo nguyên lý tách khi có ràng buộc tín hiệu điều khiển*. Tạp chí KHCHNH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 59, 08-2019, trang 47-52.

- 9 **Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, (2019):** *Điều khiển bám quỹ đạo tàu nổi thiếu cơ cấu chấp hành dựa trên mô hình dự báo kết hợp bù thành phần bất định.* Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 5 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA-2019, N<sub>0</sub>. ID42.

## **II. Công trình công bố quốc tế**

- 1 **Nguyen, HUU-Quyên, Tran, Anh-Dung, Nguyen, Trong-Thang, (2019):** *The Bilinear Model Predictive Method-based Motion Control System of Underactuated-Ship with Uncertain Model in the Disturbance.* **Processes** 7, no.7:445. (ISI, SCIE, SCOPUS, IF=1.963)

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt

- [1] **Đỗ Thị Tú Anh**, (2014): *Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách cho hệ phi tuyến*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [2] **Nguyễn Việt Dũng**, (2018): *Phương pháp mô hình hóa và điều khiển trường nhiệt độ vật nung dầy*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [3] **Đặng Xuân Hoài**, (1999): *Ứng dụng kỹ thuật tự động hóa và vi xử lý trên tàu thủy đóng tại Việt Nam*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [4] **Nguyễn Doãn Phước**, (2012): *Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*. NXB Bách khoa.
- [5] **Nguyễn Doãn Phước**, (2016): *Tối ưu hóa trong điều khiển và điều khiển tối ưu*. NXB Bách khoa.
- [6] **Nguyễn Doãn Phước, Nguyễn Hoài Nam**, (2019): *Một số phương pháp điều khiển hệ cơ có mô hình Euler-Lagrange bất định*. Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ nhất về Động lực và Điều khiển.
- [7] **Khương Minh Tuấn**, (2017): *Nghiên cứu kiến trúc hướng mô hình kết hợp với RealTime UML/MARTE trong thiết kế hệ thống điều khiển cho phương tiện không người lái tự hành trên mặt nước*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [8] **Hoàng Thị Tú Uyên**, (2018): *Nghiên Cứu ứng dụng lý thuyết điều khiển thích nghi để nâng cao chất lượng hệ thống lái tự động tàu nổi có choán nước*. Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.

### Tiếng Anh

- [9] **Arimoto, S. et.al.** (1984): *Bettering operation of robot by learning*. Journal of robotic system, 1(2), pp.123-140.
- [10] **Ashrafiuon H, Muske KR, McNinch LC, Soltan RA** (2008): *Sliding mode tracking control of surface vessels*. IEEE Trans Ind Electron 55(11):4004–4012.



- [11] **Boyd,S.** and **Vandenberghe,L.** (2004): *Convex optimization*. Cambridge University Press.
- [12] **Bristow,D.A.** et.al. (2006): *A Survey of Iterative Learning Control: A learning-based method for high-performance tracking control*. IEEE control systems magazine. Vol. 26. pp. 96-114, 2006.
- [13] **Camacho, Bordons** (2004), *Model predictive control*, Springer Verlag, London.
- [14] **Cheng Liu, Zaojian Zou, Jianchuan Yin** (2015): *Trajectory tracking of underactuated surface vessels based on neural network and hierarchical sliding mode*, J Mar Sci Technol (2015) 20: 322–330.
- [15] **Dai S.-L., Wang C., and Luo F.** (2012): *Identification and learning control of ocean surface ship using neural networks*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 8, pp. 801-810.
- [16] **Do K.D, Jiang ZP, Pan J** (2002): *Underactuated ship global tracking under relaxed conditions*. IEEE Trans Autom Control 47(9):1529–1536
- [17] **Do K.D, Jiang ZP, Pan J** (2002): *Universal controllers for stabilization and tracking of underactuated ships*. Syst Control Lett 47(4): 299317.
- [18] **Do K.D, Pan J, Jiang ZP** (2003): *Robust adaptive control of underactuated ships on a linear course with comfort*. Ocean Eng 30(17): 2201 25.
- [19] **Do K.D, Jiang ZP** (2004): *Robust adaptive path following of underactuated*, Department of Mechanical and Materials Engineering, The University of Western Australia, Nedlands, WA 6907, Australia.
- [20] **Do K.D and J.Pan** (2006): *Global robust adaptive path following of underactuated ships*, Automatica, vol. 42, no. 10, pp. 1713–1722, Oct. 2006
- [21] **Do K.D, Jie Pan** (2009): *Control of Ships and Underwater Vehicles Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*: Spring Science& Business Media, 2009.
- [22] **Dongkyoung Chwa** (2011): *Global Tracking Control of Underactuated Ships With Input and Velocity Constraints Using Dynamic Surface Control Method*, IEEE Transactions on control systems Technology, Vol.19 N0.6 November 2011.
- [23] **Fossen T. I. and Berge S. P.** (Year): *Nonlinear vectorial backstepping design for global exponential tracking of marine vessels in the presence of actuator*

- dynamics*, in Decision and Control, 1997., Proceedings of the 36th IEEE Conference on, 1997, pp. 4237-4242.
- [24] **Fossen T. I.** (1994): *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Inc.
- [25] **Fossen T. I.** and **Fjellstad O.-E.** (1995): *Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom*. Mathematical Modelling of Systems, vol. 1, pp. 17-27.
- [26] **Fossen, T.I. and J.P. Strand** (1999): *Passive Nonlinear Observer Design for Ships Using Lyapunov Methods*. Experimental Results with a Supply Vessel. Automatica AUT-35(1), pp. 3-16.
- [27] **Fossen, T. I.** (2000): *Nonlinear Passive Control and Observer Design for Ship*. NO.3 129-184, Modeling, Identification and Control.
- [28] **Fossen T.I** (2002): *Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles* vol. 28, 2002.
- [29] **Fossen T. I.** (2011): *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.
- [30] **Godhavn JM** (1996): *Nonlinear tracking of underactuated surface vessels*. In: Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, pp 975–980
- [31] **Grewal, M.S.** and **Andrews, A.P.** (2001): *Kalman filtering: Theory and Practice using MatLab*. John Wiley & Sons.
- [32] **Grune, L.** and **Pannek, J.** (2010): *Nonlinear model predictive control. Theory and Algorithms*. Springer.
- [33] **Huibert, K.** and **Raphael, S.** (1972): *Linear optimal control systems*. Wiley Interscience.
- [34] **H. Saari1 and E. Khichane,** (2013). *Robust Rudder Roll Reduction of Container Ship*, J. Automation & Systems Engineering 7-3 (2013): 94-104
- [35] **Jiang ZP** (2002): *Global tracking control of underactuated ships by Lyapunov's direct method*. Automatica 38(1):301–309
- [36] **Jin Cheng, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao,** (2005). *Neural Network Based Model Reference Adaptive Control for Ship Steering System*, International Journal of Information Technology, Vol. 11 No. 6 2005.

- [37] **Koshkouei A. J., Zinober A. S., and Burnham K. J.** (2004): *Adaptive sliding mode backstepping control of nonlinear systems with unmatched uncertainty*, Asian Journal of control, vol. 6, pp. 447-453.
- [38] **Kramer, O.** (2017): *Genetic Algorithm Essentials, Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing AG.
- [39] **Lefeber E** (2000): *Tracking control of nonlinear mechanical systems*, Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Univ. Twente, Twente, The Netherlands, 2000.
- [40] **Lefeber E, Pettersen KY** (2001): *Way-point tracking control of ships*, in Proc. 40th IEEE Conf. Decision Control, 2001, pp. 940–945.
- [41] **Lefeber E, Pettersen KY, Nijmeijer H** (2003): *Tracking control of an underactuated ship*. IEEE Trans Control Syst Technol 11(1):52–61.
- [42] **Leonessa A., VanZwieten T., and Morel Y.** (2006): *Neural network model reference adaptive control of marine vehicles*, in Current trends in nonlinear systems and control, ed: Springer, 2006, pp. 421-440.
- [43] **Liu, J.** (2018): *Intelligent Control Design and MatLab Simulation*. Springer.
- [44] **Moore, K.L.** (1993): *Iterative learning control for deterministic systems*. London, Springer Verlag.
- [45] **Maciejowski, M.J.** (2011): *Predictive control with constraints*. Prentice Hall.
- [46] **Mario E. Serrano, Gustavo J. E. Scaglia, Vicente Mut, Oscar A. Ortiz, Mario Jordan** (2013): *Tracking Trajectory of Underactuated Surface Vessels: a Numerical Method Approach*, National University of San Juan, Argentine, CEAI, Vol.15, No.4 pp. 15-25, 2013.
- [47] **Movahhed M, Dadashi S and Danesh M** (2011): *Adaptive sliding mode control for autonomous surface vessel*. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, Istanbul, Turkey, pp 522–527
- [48] **Mohamed Abdelaal, Martin Franzle, Axel Hahn,** (2015): *Nonlinear Model Predictive Control for Tracking of Underactuated Vessels under Input Constraints*, IEEE European Modelling Symposium, University of Oldenburg, Oldenburg, Germany.
- [49] **Mikkel Eske Norgaard Sorensen, Morten Breivik and Bjorn-Olav H. Eriksen** (2017): *A Ship Heading and Speed Control Concept Inherently Satisfying Actuator Constraints*.
- [50] **M. J. Mahjoob1 and E. Abbasi,** (year). *Fuzzy LQR Controller for Heading Control of an Unmanned Surface Vessel*, Center for Mechatronics and

Automation, School of Mechanical Engineering College of engineering, University of Tehran Tehran, Iran.

- [51] **Nocedal, J. and Wright, S. J.** (1996): *Numerical Optimization*. Springer-New York.
- [52] **Naveen, s, V. Manikandan** (2014): *Model Predictive Controller for Ship heading control*, International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, ISSN: 2347-6982.
- [53] **Oh SR, Sun J** (2010): *Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control*. Ocean Eng 37(2–3):289–295.
- [54] **Phuoc, N. D.** (2018): *Integrating the receding horizon LQR for nonlinear systems into intelligent control scheme*. Journal of military science and technology. FEE-8/2018, pp.6-16.
- [55] **Phuoc, N. D. and Ha, L. T. T** (2015): *Constrained Output Tracking Control for Time-Varying Bilinear Systems via RHC with Infinite Prediction Horizon*. Journal of Computer Science and Cybernetics, Vol.31, No.2, pp. 97-106.
- [56] **Pettersen KY, Nijmeijer H** (2001): *Underactuated ship control: theory and experiments*. Int J Control 74(14):1435–1446.
- [57] **Perez, T. and Mogens Blanke**, (2002): *Mathematical Ship Modeling for Control Applications*. Technical Report Dept. of Electrical and Computer Engineering The University of Newcastle, NSW, 2308, Australia.
- [58] **Perez, T. and T. I. Fossen**, (2005): *Ship Kinetics. Chapter 4, In: "Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation using Rudder and Fins"* (T. Perez), Advances in Industrial Control Series, Springer-Verlag, 2005, ISBN 1-85233.
- [59] **Rossiter, J. A.** (2005): *Model based predictive control. Practical approach*. CRC Press.
- [60] **Ronghui Li, Tieshan Li, Renxiang Bu, Qinling Zheng, and C. L. Philip Chen**, (2013): *Active Disturbance Rejection with Sliding Mode Control Based Course and Path Following for Underactuated Ships*, Received 23 August 2013; Accepted 30 September 2013.
- [61] **Skjetne R.** (2005): *The maneuvering problem*, 1, NTNU, PhD-thesis.

- [62] **Siramdasu Y, Fahimi F** (2012): *Incorporating input saturation for underactuated surface vessel trajectory tracking control* In: 2012 American Control Conference, Montreal, Canada, pp 6203–6208.
- [63] **Shi-Lu Dai, Shude He, Min Wang and Chengzhi Yuan (Member, IEEE)** (2018): *Adaptive Neural Control of Underactuated Surface Vessels With Prescribed Performance Guarantees*, IEEE Transactions on neural networks and learning systems, All content following this page was uploaded by Chengzhi Yuan on 14 November 2018.
- [64] **Shi-Lu Dai, Shude He** (2018): *Adaptive Tracking Control of Underactuated Surface Vessels With Model Uncertainties*, School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China.
- [65] **Tongwen,C. and Francis,B.** (1995): *Optimal sampled data control systems*. London: Springer-Verlag.
- [66] **Wenjiang LIU, Qingmei SUI, Hairong XIAO, Fengyu ZHOU**, (2011). *Sliding Backstepping Control for Ship Course with Nonlinear Disturbance Observer*, Journal of Information & Computational Science 8: 16 (2011) 3809–3817.
- [67] **Werneld E. Ngongi and Jialu Du** (2015): *Controller Design for Tracking Control of an Under-Actuated Surface Ship*, International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 7, No. 6, December 2015.
- [68] **Xiaogong Lin, Huai Jiang, Jun Nie and Yuzhao Jiao** (2018): *Adaptive-sliding-mode trajectory tracking control for underactuated surface vessels based on NDO*. Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5.8, Changchun, China, pp.1043-1049.
- [69] **Yan Peng, Jianda Han and Qi Song**, (2007): *Tracking Control of Underactuated Surface Ships: Using Unscented Kalman Filter to Estimate the Uncertain Parameters*, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5 - 8, 2007, Harbin, China.
- [70] **Yu-lei Liao, Lei Wan, Jia-yuan Zhuang** (2011): *Backstepping dynamical sliding mode control method for the path following of the underactuated surface vessel*, National Key Laboratory of Science and Technology on

Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China.

- [71] **Yang Yang, Jialu Du, Hongbo Liu, Chen Guo, and Ajith Abraham,** (2014): *A Trajectory Tracking Robust Controller of Surface Vessels With Disturbance Uncertainties*, IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 22, NO. 4, July 2014.
- [72] **Yong Liu, Renxiang Bu, Xiaori Gao** (2018): *Ship Trajectory Tracking Control Systems Design Based on Sliding Mode Control Algorithm*, Polish Maritime research 3 (99) 2018 Vol. 25; pp. 26-34.
- [73] **Zhang Y, Peng P.Y, and Jiang Z.P** (2000): *Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using backstepping*, IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 11, pp. 1347-1360.
- [74] **Zilouchian, A. and Jamshidi, M.** (ed. 2001): *Intelligent control systems using Soft computing methodologies*. CRC press.
- [75] **Zhiquan Liu** (2018), *Ship Adaptive Course Keeping Control With Nonlinear Disturbance Observer*, Digital Object Identifie 10.1109/ACCESS.2017.2742001.
- [76] **Zewei Zheng, Cheng Jin, Ming Zhu, Kangwen sun** (2018): *Trajectory tracking control for a marine surface vessel with asymmetric saturation actuators*, Article in Robotics and Autonomous Systems, August 2017.

## PHỤ LỤC

### 1. Lực tác động của nhiễu: Sóng, gió, dòng chảy

#### a. Lực và mômen sinh ra do nhiễu loạn của sóng biển:

Lực và mômen do sóng biển tác động lên bề mặt tàu có thể được mô tả như sau:

$$W_{\text{waves}} = [X_{\text{waves}} \ Y_{\text{waves}} \ Z_{\text{waves}}]^T \quad (\text{A.1})$$

Trong đó:  $X_{\text{waves}}, Y_{\text{waves}}, Z_{\text{waves}}$  được đưa ra bởi lý thuyết phi tuyến [28] và được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} X_{\text{waves}}(t) &= \sum_{i=1}^N \rho g B L T \cos \beta S_i(t) \\ Y_{\text{waves}}(t) &= \sum_{i=1}^N -\rho g B L T \sin \beta S_i(t) \\ N_{\text{waves}}(t) &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{24} \rho g B L (L^2 - B^2) \sin 2\beta S_i(t) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Trong đó:

$L$  – chiều dài phần mớn nước của tàu

$B$  – chiều rộng phần mớn nước của tàu

$T$  – chiều cao phần mớn nước của tàu

$\beta$  – hướng sóng

$S_i$  – độ dốc của sóng.

$g$  – gia tốc trọng trường

$\rho$  – tỷ trọng của nước

#### b. Lực và mômen sinh ra do tác động của gió:

Vectơ lực tổng quát sinh ra do tác động của gió được coi như sau:

$$W_{\text{wind}} = [X_{\text{wind}} \ Y_{\text{wind}} \ Z_{\text{wind}}]^T$$

Véc tơ lực  $X_{\text{wind}}, Y_{\text{wind}}, Z_{\text{wind}}$  được cho bởi công thức (A.3), [24]

$$\begin{aligned}
X_{\text{wind}} &= \frac{1}{2} C_X(\gamma_r) \rho_a V_r^2 A_T \\
Y_{\text{wind}} &= \frac{1}{2} C_Y(\gamma_r) \rho_a V_r^2 A_L \\
N_{\text{wind}} &= \frac{1}{2} C_N(\gamma_r) \rho_a V_r^2 A_L L
\end{aligned} \tag{A.3}$$

Trong đó:

$C_X, C_Y$  – hệ số lực,  $C_N$  – hệ số mômen,  $\rho_a$  – mật độ không khí ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $A_T$  – diện tích mặt ngang ( $\text{m}^2$ ),  $A_L$  – diện tích mặt bên ( $\text{m}^2$ ),  $L$  – chiều dài tàu ( $\text{m}$ ). Và  $\gamma_r$  là góc của hướng gió so với hướng mũi tàu,  $V_r$  – là tốc độ gió.

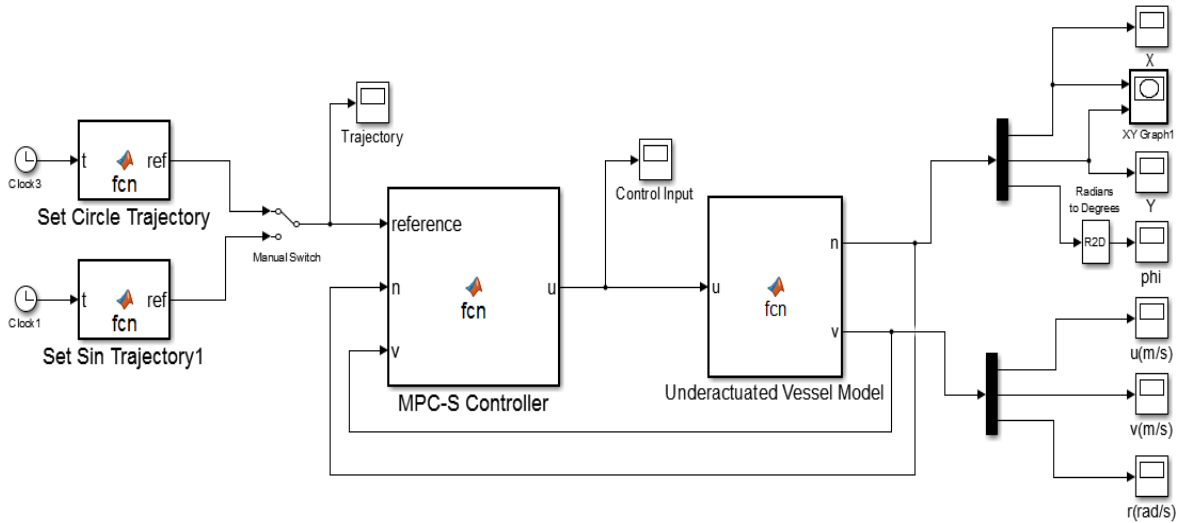
## 2. Bảng thông số tàu sử dụng mô phỏng và thực nghiệm

Bảng PL1. Giá trị các thông số, hệ số trong mô hình tàu sử dụng mô phỏng [21].

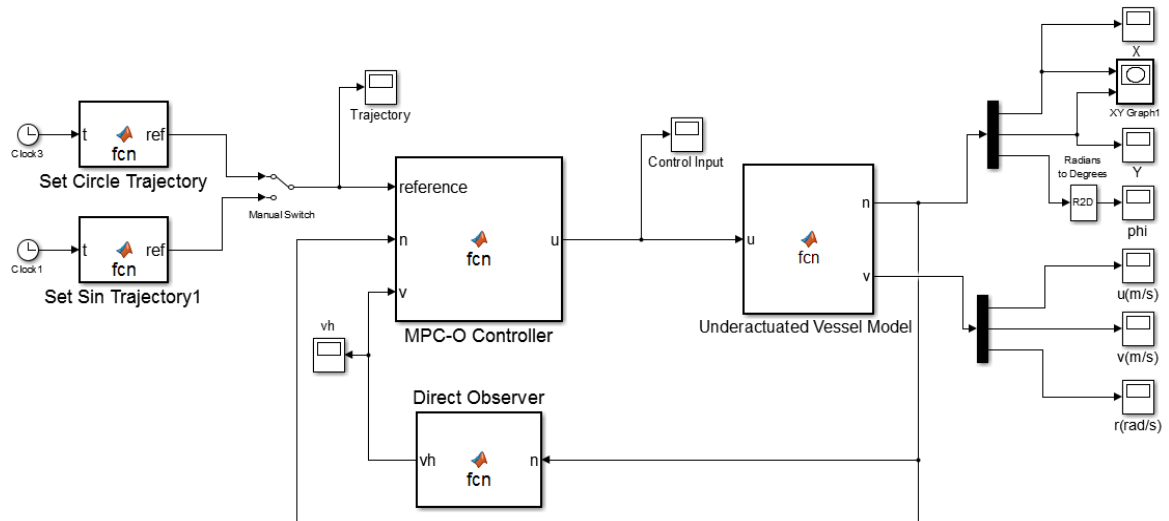
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Chiều dài tàu		32m	
Khối lượng		118x10 <sup>3</sup> Kg	
Bán kính lượn vòng tối thiểu của tàu		150m	
Lực trượt dọc tối đa chân vịt của tàu có thể tạo ra $\tau_{u\max}$		5,2x10 <sup>9</sup> (N)	
Mômen quay trở tối đa bánh lái của tàu có thể tạo ra $\tau_{r\max}$ $\tau_r \max$		8.5x10 <sup>8</sup> (N.m)	
$m_{11}$	120x10 <sup>3</sup> (Kg)	$d_{11n(u2)}$	43x10 <sup>2</sup> (Kgm <sup>-1</sup> )
$m_{22}$	177.9x10 <sup>3</sup> (Kg)	$d_{11n(u3)}$	21.5x10 <sup>2</sup> (Kgm <sup>-2</sup> )
$m_{33}$	636x10 <sup>5</sup> (Kgm <sup>2</sup> )	$d_{11n(v2)}$	23.4x10 <sup>3</sup> (Kgm <sup>-1</sup> )
$d_{11}$	215x10 <sup>2</sup> (Kgs <sup>-1</sup> )	$d_{11n(v3)}$	11.7x10 <sup>3</sup> (Kgm <sup>-2</sup> )
$d_{22}$	177x10 <sup>3</sup> (Kgs <sup>-1</sup> )	$d_{11n(r2)}$	160.4x10 <sup>4</sup> (Kgm <sup>2</sup> )
$d_{33}$	802x10 <sup>4</sup> (Kgm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$d_{11n(r3)}$	80.2x10 <sup>4</sup> (Kgm <sup>2</sup> s)
$d_{ui}, d_{vi}, d_{ri} = 0, \forall i > 3$			



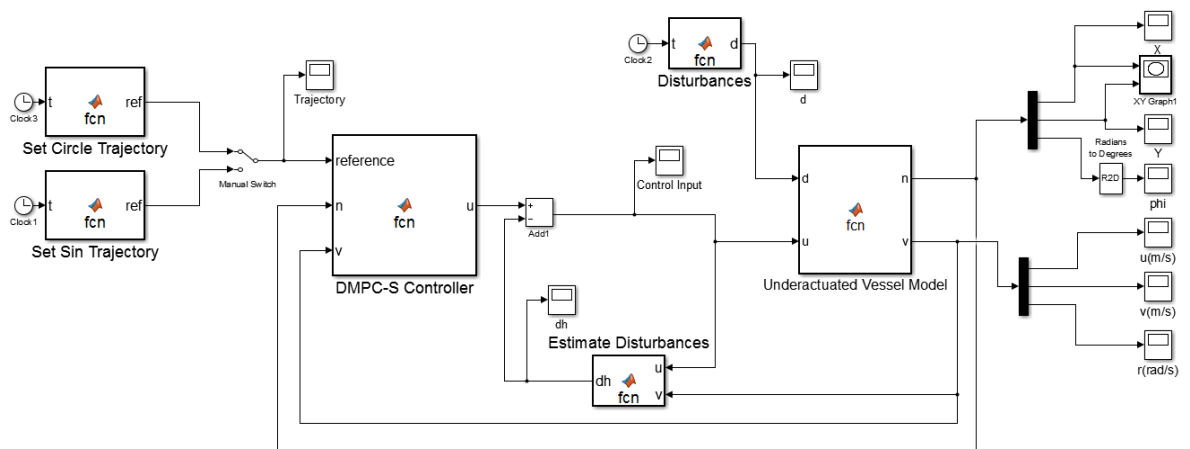
### 3. Mô hình mô phỏng các bộ điều khiển MPC đề xuất



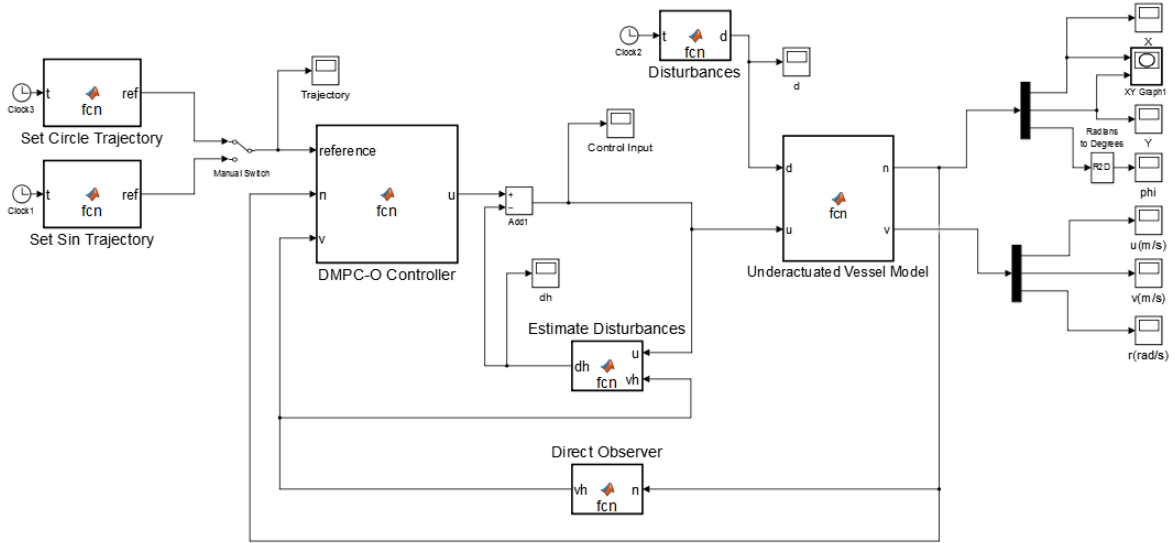
Hình PL3.1 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển MPC-S (mô hình xác định)



Hình PL3.2 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển MPC-O-QSTT (mô hình xác định)



Hình PL3.3 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển DMPC-S (mô hình bất định)

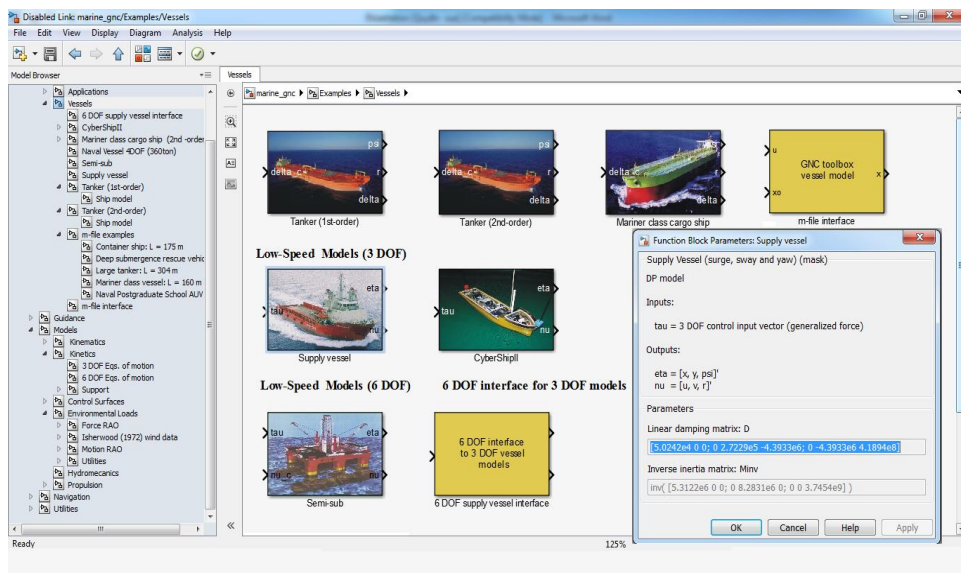


Hình PL3.4 Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển DMPC-O-QSTT (mô hình bất định)

#### 4. Thư viện mô phỏng thiết bị Hàng hải MSS-GNC

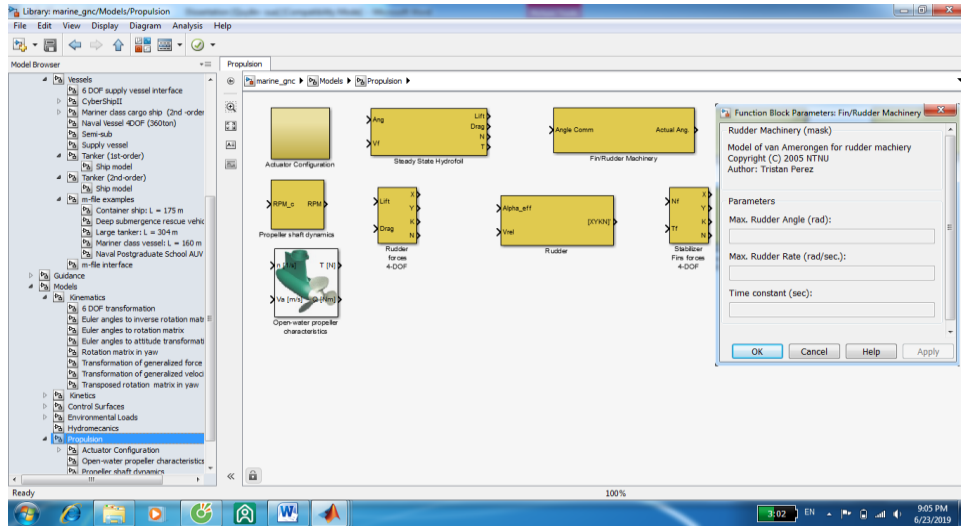
Các thư viện ứng dụng điều khiển chuyển động tàu trong MSS-GNC

Thư viện mô hình tàu (*Model vessel*): thư viện này bao gồm các loại mô hình tàu được xây dựng sẵn như: tàu hàng, tàu dịch vụ, kho nổi... Hình PL4.1. Các mô hình tàu này thể hiện đầy đủ những tính chất động học, bản chất vật lý của từng loại tàu. Với mỗi loại tàu cho phép cài đặt đầy đủ các thông số của một đối tượng tàu cụ thể.



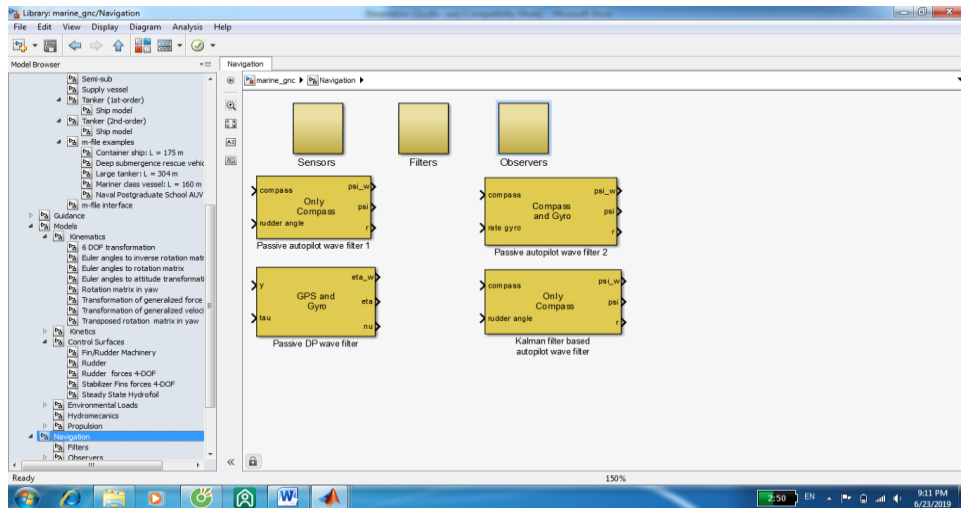
Hình PL4.1 Thư viện các loại mô hình tàu trong MSS-GNC Toolbox

Thư viện cơ cấu chấp hành (*Model control surface*): thư viện này bao gồm các loại mô hình cơ cấu thực hiện được xây dựng sẵn như: mô hình chân vịt, mô hình bánh lái... Hình PL4.2.



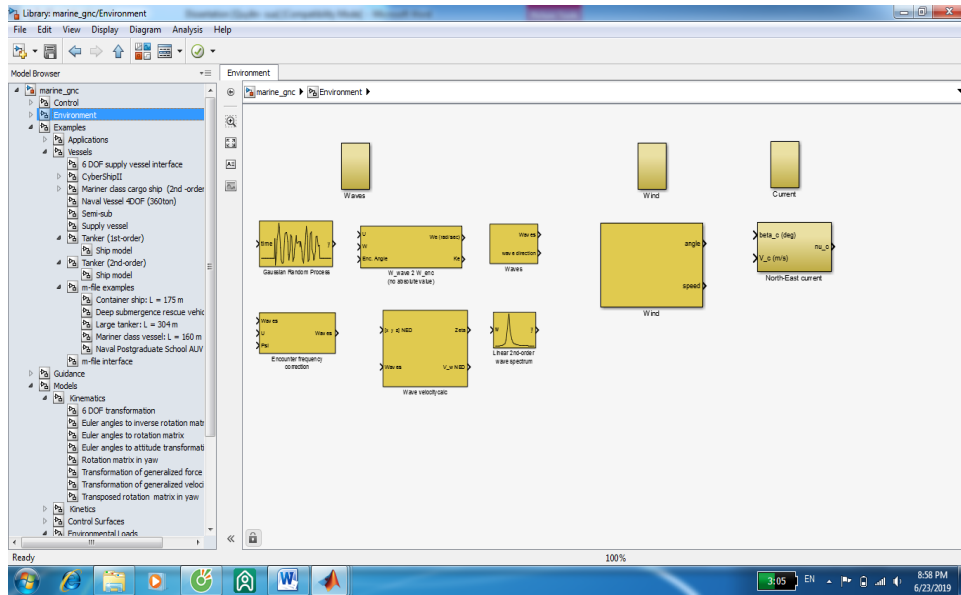
Hình PL4.2 Thư viện cơ cấu chấp hành trong MSS-GNC Toolbox

Thư viện thiết bị dẫn đường (*Navigation*): thư viện này bao gồm các loại mô hình thiết bị dẫn đường được xây dựng sẵn như GPS, la bàn... Hình PL4.3.



Hình PL4.3 Thư viện thiết bị đo, quan sát tín hiệu hàng hải trong MSS-GNC

Thư viện mô tả nhiễu loạn môi trường (*Environment*): thư viện này bao gồm các loại mô hình sóng, gió, dòng chảy... Hình PL4.4. Trong đó cho phép cài đặt các loại nhiễu loạn với mức độ khác nhau như cấp sóng, hướng gió, vận tốc dòng chảy...



Hình PL4.4 Thư viện các loại nhiễu loạn môi trường trong MSS-GNC Toolbox

## 5. Code khai báo, giao tiếp Card Arduino với Matlab – Simulink trên máy tính thông qua thư viện Arduino I/O library

```
>> COM 1= arduino1 % Connect PC1 (Controlller)
```

Updating server code on board Mega due (COM1).

ans =

arduino with properties:

Port: 'COM1'

Board: 'Megadue'

AvailablePins: {'D2-D53', 'A0-A15'} % Output A0, A1

Libraries: {'I2C', 'Servo', 'SPI'}

```
>> COM 1= arduino due 2 % Connect PC2 (Vessel)
```

Updating server code on board Mega due (COM2).

ans = arduino with properties:

Port: 'COM1'

Board: 'Megadue'

AvailablePins: {'D2-D53', 'A0-A15'} % Input D4, D5

Libraries: {'I2C', 'Servo', 'SPI'}

– Code khai báo chuyển đổi tín hiệu NMEA 0183 và truyền qua cổng COM3

*Cấu hình cổng COM2-Arduino 2 (USART1) giao diện với GPS, Gyro  
Compass... qua giao thức NMEA0183*

*USART1 initialization*

*Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity*

*USART1 Receiver: On*

*USART1 Transmitter: On*

*USART1 Mode: Asynchronous*

*USART1 Baud rate: 4800 or 38400*

*UCSR1A=0x00;*

*UCSR1B=0xD8;*

*UCSR1C=0x86;*

*UBRR1H=0x00;*

*if (PINC.0) //The switch for transfer between 4800 and 38400 Baud rate*

*{*

*UBRR1L=0x8F; //8F cho 4800*

*}*

*else*

*{*

*UBRR1L=0x11; //11 cho 38400*

*}*

*Cấu hình cổng COM3- Arduino (USART2) giao diện với Modbus RS485 (PC)*

*USART0 initialization*

*Communication Parameters: 8 Data, 1 Stop, No Parity*

*USART0 Receiver: On*

*USART0 Transmitter: On*

*USART0 Mode: Asynchronous*

*USART0 Baud rate: 115200*

*UCSR0A=0x00;*

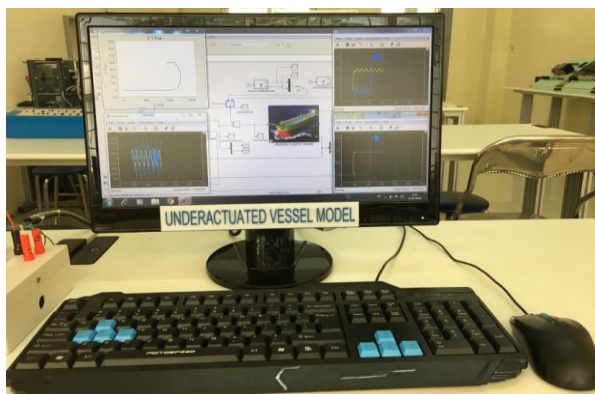
*UCSR0B=0x18;*

*UCSR0C=0x86;*

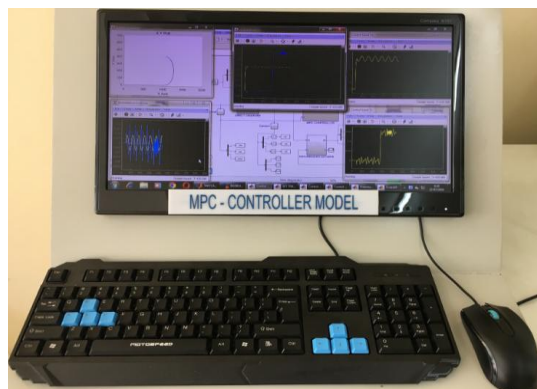
*UBRR0H=0x00;*

*UBRR0L=0x05;*

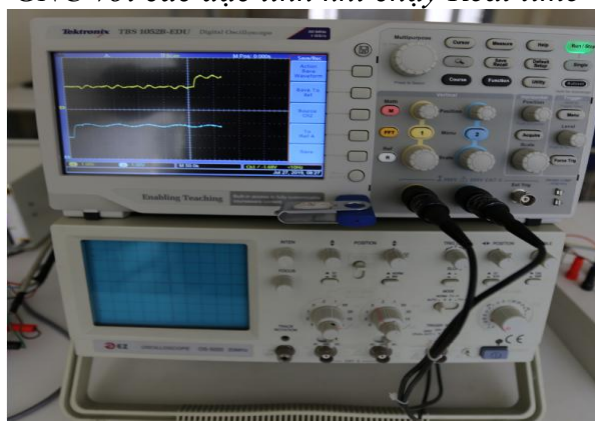
**6. Một số hình kết quả nghiệm mô hình vật lý tại phòng thí nghiệm khi chạy Real Time**



*a) Hình ảnh đối tượng tàu trên MSS-GNC với các đặc tính khi chạy Real time*



*b) Hình ảnh bộ điều khiển MPC với các đặc tính khi chạy Real time*



*c) Hình ảnh đặc tính điều khiển trên bộ đo Oscilloscope khi chạy Real time*



*d) Hình ảnh Card Arduino Due khi chạy Real time*



*e) Hình ảnh hệ thống thực nghiệm HIL khi chạy Real time*

*Hình PL6.1 Hình ảnh mô hình thực nghiệm cùng kết quả các đặc tính thu được khi chạy Real time*