



طراحی سیستم کنترل مبتنی بر بازخورد موقعیت و تخمین اختلال در تثبیت موقعیت دینامیکی شناورهای دریایی

مهدی لوئی پور¹، محمد دانش^{2*}، مهدی کشمیری³، محسن مجیری⁴

- 1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
 - 2- استادیار، مهندسی مکانیک کنترل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
 - 3- دانشیار، مهندسی مکانیک هوا فضا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
 - 4- استادیار، مهندسی برق کنترل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
- * اصفهان، صندوق پستی 84156-83111، danesh@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 مرداد 1394
پذیرش: 26 مهر 1394
ارائه در سایت: 09 آذر 1394
کلید واژگان:
کنترل مبتنی بر خروجی
تثبیت موقعیت دینامیکی
فیلتر کردن موج
تخمین حالت
شناورهای دریایی

در این مقاله یک روش جدید طراحی سیستم کنترل مبتنی بر بازخورد سیگنال موقعیت و مشاهده گر اختلال برای تثبیت موقعیت دینامیکی شناورهای دریایی ارائه شده است. این سیستم از یک کنترل کننده در مسیر مستقیم و یک فیلتر - مشاهده گر پیشنهادی در مسیر بازخورد تشکیل شده است. ساختار فیلتر - مشاهده گر ترکیبی از یک فیلتر شکاف دار اصلاح شده و یک مشاهده گر غیرخطی بوده که به صورت سری به هم متصل شده اند. وظیفه فیلتر، تخمین حرکت فرکانس پایین و حذف حرکت فرکانس موج شناور با استفاده از سیگنال موقعیت است. اختلال فرکانس پایین و سرعت شناور توسط مشاهده گر غیرخطی و با استفاده از حرکت فرکانس پایین شناور تخمین زده می شود. مستقل بودن فیلتر از مشاهده گر باعث افزایش کیفیت و دقت در تخمین حرکت فرکانس پایین، اختلال و سرعت شناور می شود که به نوبه خود باعث افزایش کیفیت عملکرد سیستم کنترل می گردد. علاوه بر این، فیلترینگ و تخمین حرکت فرکانس پایین مستقل از مدل های شناور و اختلال فرکانس پایین بوده و لذا نسبت به نامعینی های مدل مقاوم است. در شبیه سازی عددی، اهمیت و تاثیر فیلترینگ موج و تخمین اختلال فرکانس پایین بر کاهش نوسانات سیگنال کنترل بررسی می شود که از نقطه نظر کاهش سایش و خرابی محرک ها، کاهش مصرف سوخت و مقاوم شدن سیستم کنترل در مقابل اختلال های محیطی بر روی یک شناور سطحی اهمیت دارد. علاوه بر این، عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی با عملکرد روش متداول مقایسه شده و صحت و برتری عملکرد آن نشان داده می شود.

Control system design based on position feedback and disturbance estimation in dynamic positioning of marine vessels

Mehdi Loueipour¹, Mohammad Danesh^{1*}, Mehdi Keshmiri¹, Mohsen Mojiri²

- 1- Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
 - 2- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
- * P.O.B. 84156-83111, Isfahan, Iran, danesh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 August 2015
Accepted 18 October 2015
Available Online 30 November 2015

Keywords:
Output feedback control
Dynamic positioning
Wave filtering
State estimation
Marine vessel

ABSTRACT

This paper presents a new approach in the design of output feedback control system based on disturbance observer for dynamic positioning vessels. The proposed control system includes a controller and a structure of a modified notch filter and a nonlinear observer. The filter is used for estimating low-frequency motions and removing the wave-frequency motions by using vessel position measurement. The low-frequency disturbances and vessel-velocities are estimated in nonlinear observer using the low-frequency vessel motion. In this structure, wave filtering and low-frequency motion estimation are independent from the estimation of low-frequency disturbances and vessel velocities. It results in increased accuracy of filtering and estimation which results in desirable performance of control system. Also, filtering is independent of the vessel and low frequency disturbances models, and therefore it is not affected by modeling uncertainty. The effect of wave filtering and low-frequency disturbances estimation in DP control system from the point of reducing control signal fluctuations were evaluated with numerical simulation. This is important in view of reduction of wear and tear in propulsion system and fuel consumption in a surface vessel. Furthermore, simulation results show that the proposed method has better performances in comparison with conventional method.

1- مقدمه

فیلترینگ، تخمین حالت و اختلال های محیطی و قوانین کنترل) همواره یکی از چالش ها در طراحی و پیاده سازی سیستم های تثبیت موقعیت طراحی سیستم کنترل مبتنی بر بازخورد خروجی (شامل الگوریتم های

Please cite this article using:

M. Loueipour, M. Danesh, M. Keshmiri, M. Mojiri, Control system design based on position feedback and disturbance estimation in dynamic positioning of marine vessels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 221-231, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در [7] معرفی شد و در ادامه در [17-20] توسعه یافت و مورد استفاده قرار گرفت. مزیت این روش، امکان استفاده از معادلات غیرخطی، کاهش قابل توجه تعداد ضرایب و بهره‌ها و سهولت تنظیم آن‌ها به همراه اثبات پایداری است.

در این مقاله یک روش جدید در طراحی سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی شناورها ارائه می‌شود. این روش شامل یک فیلتر جهت حذف اثر موج و تخمین حرکت فرکانس پایین، یک مشاهده‌گر غیرخطی برای تخمین سرعت و اختلال وارده بر شناور و یک کنترل‌کننده تناسبی - مشتق‌گیر برای حذف خطای موقعیت است. مزیت اصلی این ساختار مستقل بودن فیلتر و تخمین‌زن اختلال و سرعت است. علاوه بر این، عمل فیلتر کردن مستقل از مدل‌های دینامیکی شناور و اختلال‌ها بوده و لذا نسبت به نامعینی‌های مدل‌سازی مقاوم است. مازولار بودن ساختار پیشنهادی، توسعه و به‌کارگیری آن را برای شناورهای مختلف آسان می‌نماید.

ساختار مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی، ماهیت اختلال‌های محیطی و نحوه مدل‌سازی آن‌ها، مدل دینامیکی شناورها و همچنین روش متداول در فیلترینگ موج و تخمین حالت‌ها معرفی می‌شود. در بخش سوم ضمن ارائه ساختار سیستم کنترل پیشنهادی، الگوریتم‌های فیلتر و مشاهده‌گر پیشنهادی، معرفی و کنترل‌کننده مناسب در این کاربرد انتخاب می‌گردد. همچنین در این بخش پایداری ساختار فیلتر-مشاهده‌گر پیشنهادی بررسی می‌شود. در بخش چهارم با ارائه شبیه‌سازی‌های متعدد، لزوم فیلترینگ و تخمین اختلال و همچنین عملکرد سیستم کنترل مبتنی بر فیلتر-مشاهده‌گر پیشنهادی در مقایسه با روش متداول مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری و جمع‌بندی است.

2- سیستم کنترل در تثبیت موقعیت دینامیکی

2-1- مروری بر سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی

یکی از مسائل مهم در حوزه فعالیت‌های فراساحلی، حفظ موقعیت شناور در حین انجام عملیات است. شناورها همواره در معرض نیروهای اختلالی محیطی همچون نیروی باد، امواج و جریان دریایی قرار دارند و در اثر اعمال این نیروها، شناور موقعیت خود را از دست داده و جابه‌جا می‌شود. در آب‌های کم‌عمق می‌تواند با استفاده از اتصالات مکانیکی بین شناور و بستر دریا، از قبیل کابل‌ها و شمع‌ها و لنگر موقعیت شناور را تثبیت کرد، اما در آب‌های عمیق استفاده از این ابزار امکان‌پذیر نبوده و یا توجیه فنی و اقتصادی ندارد. تثبیت موقعیت دینامیکی یک فناوری برای رفع این نیاز مهم است. این فناوری با افزایش نیاز به منابع جدید نفت و گاز در آب‌های عمیق توسعه روزافزون داشته به‌گونه‌ای که تا سال 2011 بیش از 2000 شناور مجهز به سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی شده است [9]. سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی متشکل از سیستم کنترل، سیستم مرجع موقعیت⁶، سیستم مرجع جهت⁷، سیستم مرجع محیطی⁸، سیستم قدرت⁹ و سیستم محرکه¹⁰ است. جزئیات بیشتر در [9، 21] ارائه شده است.

شکل 1 بلوک دیاگرام سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی یک شناور سطحی را نمایش می‌دهد. در این سیستم، میزان انحراف شناور از وضعیت مطلوب محاسبه شده و نیروی مورد نیاز جهت اصلاح این انحراف از

دینامیکی¹ بوده است [1]. کنترل موقعیت و سرعت شناور به‌منظور حفظ موقعیت و یا انجام مانورهای با سرعت پایین توسط پیش‌رانه‌های وسیله، سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی نامیده می‌شود [2]. سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی در بسیاری از وسایل دریایی² مانند کشتی‌های حفاری، اکتشافی، لوله‌گذار و نفتکش‌های بزرگ، سکوها حفاری و وسایل خود محرک زیرسطحی مانند ربات‌های زیرآبی استفاده می‌گردد. اهمیت و توسعه اکتشافات و بهره‌برداری در دریاها به خصوص در آب‌های عمیق در کنار توسعه سیستم‌های اندازه‌گیری موقعیت، باعث توجه روزافزون محققین در بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها شده است [3].

فیلترینگ و تخمین متغیر، نقش مهمی در طراحی سیستم کنترل مبتنی بر بازخورد خروجی ایفا می‌کنند. فیلترها برای حذف سیگنال‌های نامطلوب و مشاهده‌گرها برای تخمین متغیرهای حالت، تخمین پارامترهای مدل، تخمین اختلالات وارده به سیستم و در نهایت ردیابی خطای مکانیزم‌ها و افزایش تحمل نسبت به خطا استفاده می‌شود [4-6].

اندازه‌گیری موقعیت و جهت در شناورهای دریایی همواره تحت تاثیر سیگنال‌های نویسانی ناشی از اختلال‌های محیطی³ مانند باد، موج و جریان‌های دریایی قرار می‌گیرد. اعمال مستقیم این اندازه‌گیری‌ها در حلقه کنترل باعث ایجاد عملکرد نامطلوب سیستم کنترل شناور، خرابی و سایش سیستم پیش‌رانش و همچنین افزایش قابل توجه انرژی مصرفی می‌شود. بنابراین لازم است سیگنال‌های نویسانی از موقعیت اندازه‌گیری شده حذف شود و یا به حداقل کاهش یابد. این عمل، فیلترینگ موج⁴ نامیده می‌شود [7]. از طرف دیگر، در بسیاری از کاربردها مانند تثبیت موقعیت دینامیکی، فقط کنترل حرکت فرکانس پایین⁵ شناور موردنظر است؛ لذا لازم است سیگنال حرکت فرکانس پایین شناور مشخص گردد [8]. همچنین در بسیاری از موارد اندازه‌گیری سرعت حرکت وسیله امکان‌پذیر نیست و یا نیاز به ابزارهای بسیار گران قیمت دارد. این مشکل در مورد نیروهای اختلالی ناشی از محیط عملکرد بر وسیله دوچندان است. این در حالی است که تخمین این متغیرها با استفاده از یک سیگنال نویزی نیز مطلوب نیست [7].

تحقیقات متنوعی به منظور حل مسائل و مشکلات بیان شده انجام شده است. در دهه 1960، اولین سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی برای کنترل شناور در صفحه افقی ارائه شد. در این سیستم از کنترل‌کننده تناسبی - انتگرال‌گیر - مشتق‌گیر تک ورودی - تک خروجی به همراه فیلتر پایین‌گذر/فیلتر شکاف‌دار به منظور کاهش اثر نوسان موج در سیگنال کنترل استفاده شد [9].

از اواسط دهه 1970 به بعد و با پیدایش و توسعه سیستم‌های کنترل پیشرفته مبتنی بر کنترل بهینه و تئوری فیلتر کالمن، سیستم‌های تثبیت موقعیت دینامیکی توسعه یافت. اولین بار فیلتر کالمن در سال 1976 توسط [10] در طراحی سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی یک شناور سطحی به‌کار گرفته شد و در ادامه توسط محققین [11-16] توسعه پیدا کرد. در روش مبتنی بر فیلتر کالمن، طراحی سیستم‌های کنترلی اغلب براساس خطی‌سازی معادلات دینامیکی شناور حول نقطه کار انجام می‌شود.

در ادامه از سال 1999 استفاده از مشاهده‌گرهای غیرخطی در طراحی سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی متداول گردید. این روش اولین بار

6- Position Reference System
7- Heading Reference System
8- Environmental Reference System
9- Power System
10- Thrust and Propulsion System

1- Dynamic Positioning
2- Marine Vehicles
3- Environmental Disturbances
4- Wave Filtering
5- Low Frequency Motion

می‌شود [8]. جزئیات بیشتر درخصوص نیروی موج و نحوه تاثیر آن بر حرکت شناورها در [1، 22، 23] ارائه شده است.

در طراحی سیستم‌های کنترل حرکت، اثرات مرتبه اول موج و نیروی فرکانس پایین ناشی از اثر مرتبه دوم موج لحاظ می‌شود. این اثرات بصورت متفاوت در سیستم کنترل جبران می‌شود. بطور مثال نیروی بایاس با المان‌های انتگرالی در کنترل کننده جبران می‌شود در حالی که حرکت نوسانی ناشی از اثر مرتبه اول از سیگنال موقعیت شناور حذف می‌شود.

2-2-2- اختلال ناشی از باد و جریان

منبع دیگر اختلال‌های وارده بر شناورهای دریایی، نیروهای ناشی از باد و جریان دریایی است. این نیروها به واسطه تغییرات فشار ناشی از این دو پدیده بر بدنه شناور ایجاد می‌شود. نیروی ناشی از باد که عمدتاً بر شناورهای سطحی اعمال می‌شود، ترکیبی از یک نیروی با میانگین غیرصفر به اضافه نیروهای نوسانی ناشی از تند بادهای است. سیستم کنترل تنها بخش اول این نیرو را جبران می‌کند. زیرا فرکانس بخش نوسانی این نیرو اغلب خارج از پهنای باند دینامیک شناورها قرار دارد. در طراحی سیستم کنترل، اغلب با اندازه‌گیری سرعت و جهت باد در جهت جبران نیروی اختلالی ناشی از باد اقدام شده و مقادیر خطای ناشی از این جبران‌سازی به صورت یک نیروی بایاس مدل شده و تخمین زده می‌شود [1].

نیروی اختلالی ناشی از جریان عمدتاً دارای فرکانس‌های پایین بوده و شناور را در زمان لنگراندازی و یا انجام کنترل موقعیت تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییر در این نیرو ناشی از تغییر سرعت جریان و یا تغییر جهت آن نسبت به بدنه شناور است. یک روش اعمال اثرات این اختلال در رفتار حرکتی وسیله، جایگزین کردن سرعت نسبی به جای سرعت مطلق در جملات مرتبط با نیروهای هیدرودینامیکی در معادلات دینامیکی وسیله است. در هر حال به دست آوردن سرعت وسیله، سرعت جریان و در نهایت سرعت نسبی کار ساده‌ای نیست و در این راستا نیاز به استفاده از حسگرهای بسیار گران قیمت و یا استفاده از مشاهده‌گرها است. روش دیگر در تعیین اثر جریان در رفتار حرکتی وسیله، مدل‌سازی بصورت یک نیروی بایاس می‌باشد. در طراحی سیستم کنترل موقعیت دینامیکی عموماً از این روش استفاده می‌شود [1].

2-3- فرمول‌بندی مسئله

2-3-1- مدل دینامیک فرکانس پایین شناور

برای بیان حرکت یک شناور سطحی، از دو دستگاه مختصات استفاده می‌شود، یکی متصل به شناور که اصطلاحاً دستگاه مختصات بدنه⁷ نامیده می‌شود و دیگری دستگاه مختصات اینرسی یا متصل به زمین⁸ که در یک موقعیت جغرافیایی و متصل به زمین فرض می‌گردد. شکل 2 موقعیت دستگاه‌های مختصات و شناور را نشان می‌دهد. در بررسی حرکت صفحه‌ای شناورها، بردار $\eta = [x, y, \psi]^T$ بیان کننده موقعیت (x, y) و جهت (ψ) شناور در دستگاه اینرسی است. $V = [u, v, r]^T$ بردار سرعت شناور در دستگاه بدنی بوده که شامل سرعت روبه جلو و سرعت جانبی (u, v) و سرعت چرخشی (r) است. این متغیرها براساس قرارداد SNAME⁹ تعریف شده‌اند. رابطه (1) معادلات حاکم بر حرکت فرکانس پایین گروه بزرگی از شناورهای سطحی را بیان می‌کند [7].

طریق پیش‌رانه‌ها اعمال می‌گردد [1]. البته این سیستم قابلیت دنبال کردن مسیر مشخص (تعقیب خط) در سرعت‌های کم را نیز ایجاد می‌کند [9].

2-2- ماهیت و نحوه اعمال اثر اختلال‌های محیطی

نیروهای محیطی ناشی از باد، امواج و جریان‌های دریایی از مهم‌ترین اختلال‌های وارده بر وسایل دریایی در موضوع کنترل حرکت است که خود ناشی از عوامل متعدد مانند نیروی گرانش، تغییر دما، تغییر چگالی و گردش زمین است. در اکثر موارد، پیش‌بینی، اندازه‌گیری و مدل‌سازی این نیروها و همچنین حرکات ناشی از آن‌ها غیرممکن بوده و یا مستلزم ارائه مدل‌های پیچیده مبتنی بر پارامترهای متعدد است. در طراحی سیستم‌های کنترل حرکت شناورهای دریایی، یک روش ساده و البته با کارایی مطلوب، بررسی اثر این اختلال‌ها بر مبنای محدوده فرکانس تاثیر است. در این روش تاثیر این اختلال‌های به دو حوزه اختلال فرکانس موج¹ و اختلال فرکانس پایین² تقسیم می‌شود. در ادامه نحوه اثر این نیروها بر رفتار حرکتی شناورهای دریایی توضیح داده شده است [8، 9].

2-2-1- اختلال ناشی از موج

نیروی امواج عموماً بر شناورهای سطحی و زیرسطحی که نزدیک سطح آب³ حرکت می‌کنند، تاثیر می‌گذارد. تعیین اثر موج بر رفتار شناور به دو صورت متداول است. روش اول استفاده از جداول نیرویی است که توسط نرم‌افزارهای هیدرودینامیکی براساس هندسه شناور و شرایط مختلف عملیاتی استخراج می‌شود. این روش علی‌رغم محاسبه دقیق‌تر این اثرات، مستلزم انجام محاسبات نسبتاً زیاد و زمان‌بر است. لذا استفاده آن در طراحی سیستم کنترل متداول نیست. روش دوم، مبتنی بر تقسیم اثر این اختلال بر مبنای محدوده فرکانسی و تخمین آن‌ها است. این روش به دلیل سادگی و موثر بودن کاربرد بیشتری در طراحی سیستم کنترل دارد [1].

تاثیر موج بر حرکت وسیله دارای دو بخش اثر مرتبه اول موج⁴ و اثر مرتبه دوم موج⁵ است. اثرات مرتبه اول بصورت یک حرکت/نیروی نوسانی با فرکانس موج و با میانگین صفر بوده و رابطه خطی با ارتفاع موج دارد. اثر مرتبه اول موج معمولاً به صورت حرکت نوسانی هارمونیک و یا هارمونیک میرا در حرکت وسیله مدل می‌شود [14، 10]. اثرات مرتبه دوم که به صورت غیرخطی به موج وابسته است، خود دارای دو بخش یکی در فرکانس بالاتر و دیگری در فرکانس پایین‌تر از فرکانس موج است. نیروهای فرکانس بالا بیشتر در طراحی بدنه و در مباحث ارتعاشات بدنه مدنظر قرار می‌گیرد. اثرات فرکانس پایین به صورت یک نیروی بایاس⁶ با تغییرات بسیار آرام مشاهده

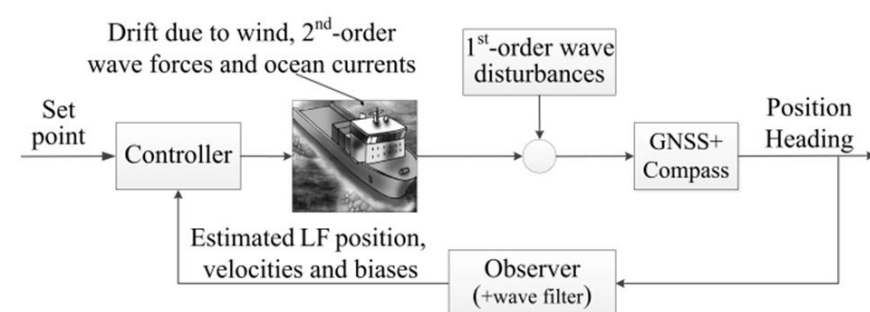


Fig 1 Block diagram of the conventional method in dynamic positioning system [1]

شکل 1 بلوک دیاگرام روش متداول در سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی [1]

- 1- Wave Frequency Disturbances
- 2- Low Frequency Disturbances
- 3- Shallow Water
- 4- First-Order Wave-Induced Forces
- 5- Second-Order Wave-Induced Forces
- 6- Bais

7- Body Fixed Frame

8- Earth Fixed Frame

9- The Society of Naval Architects and Marine Engineers

2-3-2- مدل اختلال فرکانس موج

عمده حرکت نوسانی شناور ناشی از اثر خطی موج است. این حرکت دارای طیف میان‌گذر با پهنای باند محدود است. بنابر این پاسخ فرکانسی تابع انتقال (5)، تقریب مناسبی از این طیف است [1,7].

$$G_W^i(s) = \frac{k_i s}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{0i} s + \omega_{0i}^2}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

در این رابطه ω_{0i} فرکانس موج ζ_i ضریب میرایی و k_i بیان‌کننده شدت موج در درجه آزادی نام است. تابع به ازاء هر درجه آزادی حرکت وسیله بیان می‌شود.

2-3-3- مدل اختلال فرکانس پایین

همان‌گونه که ذکر شد، در طراحی سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی، مجموع اثر اختلال محیطی ناشی از اثر غیرخطی موج، جریان دریایی و خطای جبران‌سازی اثر باد به صورت نیروی‌های فرکانس پایین در هر درجه آزادی در حرکت شناور در نظر گرفته می‌شود. نیروی بایاس با معادله مرتبه اول مارکوف (6) مدل‌سازی می‌شود [7,1].

$$\dot{b} = -T^{-1}b + \Psi n \quad (6)$$

در این معادله $b \in \mathbb{R}^3$ بردار نیروی بایاس، $T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ یک ماتریس قطری مثبت بیان‌کننده ثابت زمانی نیروی بایاس، $n \in \mathbb{R}^3$ بردار نویز سفید گوسی با میانگین صفر و $\Psi \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ماتریس قطری برای بیان دامنه n است.

2-3-4- مدل سیگنال موقعیت

سامانه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری موقعیت شناور سطحی وجود دارد که هریک از روش متفاوتی برای اندازه‌گیری موقعیت استفاده می‌کنند. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سامانه تعیین موقعیت سراسری تفاضلی (DGPS)⁶، مهاربندی متصل به بستر دریا⁷، سامانه‌های موقعیت هیدروآکوستیک (HPR)⁸، سامانه‌های لیزری⁹ و سیستم آرتمیس¹⁰ اشاره کرد. معمولاً تعداد مراجع موقعیت به دقت مورد نیاز در طول عملیات، مرتبه افزودنی مورد نیاز براساس الزامات ایمنی فعالیت و مراجع در دسترس وابسته است. برای اندازه‌گیری جهت شناور نیز از سامانه‌های مختلفی استفاده می‌شود که یکی از متداول‌ترین آن‌ها، استفاده از قطب‌نمای ژيروسکوپ¹¹ است. قطب‌نمای ژيروسکوپ نوعی از قطب‌نمای غیرمغناطیسی است که قادر است شمال حقیقی را نشان دهد. امروزه نمونه‌های پیشرفته‌تری از سیستم‌های مرجع جهت‌یابی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که از آن جمله می‌توان به ژيروسکوپ‌های لیزر-حلقه‌ای¹² و ژيروسکوپ‌های فیبر نوری¹³ اشاره کرد. با استفاده ترکیبی از این سامانه‌ها می‌توان به مکان‌یابی و جهت‌یابی سیستم با دقت به ترتیب 10 سانتی‌متر و 0.02 درجه نیز رسید [21].

شکل 3 مثالی از موقعیت اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی سیگنال موقعیت، حرکت شناور (η_{tot}) به صورت جمع یک حرکت فرکانس پایین (η) ناشی از نیروی‌های پیش‌ران و اختلال فرکانس پایین و یک حرکت فرکانس موج (η_w) ناشی از اثر مرتبه اول موج در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= R(\psi)V \\ M\dot{V} + DV &= \tau + R^T(\psi)b \\ \dot{b} &= -T^{-1}b + \Psi n \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادلات

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ماتریس انتقال بین دستگاه بدنی و دستگاه اینرسی در حرکت صفحه‌ای است.

$M = M_{RB} + M_A$ ماتریس اینرسی تعمیم‌یافته¹ شناور است که از دو ماتریس مثبت معین $M_{RB} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ و $M_A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ تشکیل شده است که به ترتیب بیان‌کننده ماتریس جرمی جسم صلب و ماتریس جرم افزوده² است. $D \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ماتریس میرایی³ و $\tau \in \mathbb{R}^3$ بردار سیگنال کنترل شناور است. $b \in \mathbb{R}^3$ نیز بیان‌کننده بردار نیروها و ممان‌های اختلالی فرکانس پایین ناشی از باد، جریان و موج است که معادله و پارامترهای آن در بخش 2-3-3 توضیح داده شده است.

در کاربردهای سرعت پایین همانند تثبیت موقعیت دینامیکی، ماتریس اینرسی تعمیم‌یافته شناورها را می‌توان به فرم (3) بیان نمود [8,1].

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\ddot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\ddot{v}} & mx_g - Y_{\ddot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\ddot{r}} & I_z - N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

در این ماتریس m جرم شناور و I_z و x_g به ترتیب ممان اینرسی شناور حول محور Z و فاصله طولی مرکز دستگاه مختصات بدنی نسبت به مرکز ثقل شناور است. $X_{\ddot{u}}, Y_{\ddot{v}}, Y_{\ddot{r}}, N_{\ddot{r}}$ ضرایب جرم افزوده شناورند که متناسب با شکل وسیله‌اند. اگرچه در حالت کلی نیروی میرایی غیرخطی است لیکن در کنترل موقعیت دینامیکی و در مانورها با سرعت پایین، فرض خطی بودن یک تقریب خوب است. با این فرض ماتریس میرایی به صورت (4) قابل بیان است [8,1].

$$D = \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & mu_0 - Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{r}} & mx_g u_0 - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

در این ماتریس u_0 سرعت پیشروی⁴ است. قابل ذکر است که با توجه به ماهیت میرایی ناشی از موج و اصطکاک سطحی بر روی بدنه شناور، مقادیر ویژه ماتریس میرایی اکیدا مثبت⁵ است. همچنین در این کاربرد، ماتریس مربوط به نیروهای کوریولیس قابل صرف‌نظر کردن است. جزئیات بیشتر در [8,1] آمده است.

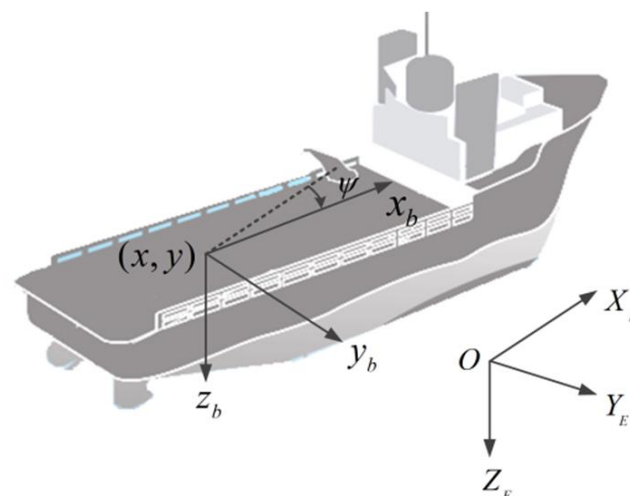


Fig. 2 Definition of the Earth-fixed and body-fixed reference frames

شکل 2 دستگاه مختصات متصل به زمین و متصل به بدنه شناور

6- Differential Global Positioning
7- Taut Wire
8- Hydroacoustic Position Reference
9- Laser-Based System
10- Artemis
11- Gyrocompass
12- Ring-Laser Gyroscope
13- Fiber Optic Gyroscope

1- Generalized Inertia Matrix
2- Added Mass
3- Damping Matrix
4- Cruise Speeding
5- Strictly Positive

یک موقعیت و جهت خاص است. سیستم کنترلی باید به نحوی طراحی شود که با مصرف کمترین مقدار انرژی، موقعیت شناور را در نقطه مطلوب حفظ کند و علاوه بر دقت مناسب در حفظ موقعیت شناور، توانایی مقابله با اغتشاشات محیطی و نامعینی‌های دینامیکی را داشته و به راحتی قابل پیاده‌سازی باشد [9]. شکل 5 بلوک‌دیگرام سیستم کنترل پیشنهادی در تثبیت موقعیت دینامیکی یک شناور سطحی را نشان می‌دهد. این سیستم صرفاً مبتنی بر بازخورد موقعیت اندازه‌گیری شده شناور است. در این ساختار، از یک فیلتر - مشاهده‌گر جدید برای تخمین سرعت، حرکت و اختلال فرکانس پایین استفاده شده است.

3-1- فیلتر - مشاهده‌گر

شکل 6 فیلتر - مشاهده‌گر جدید برای حذف اختلال فرکانس موج، تخمین حرکت فرکانس پایین، اختلال فرکانس پایین و سرعت وسیله در کاربرد تثبیت موقعیت دینامیکی را نشان می‌دهد. این سیستم شامل یک فیلتر شکاف‌دار اصلاح شده در بخش فیلتر و یک مشاهده‌گر غیرخطی مبتنی بر مدل فرکانس پایین شناور است که به صورت سری به هم متصل شده‌اند. سه ویژگی عمده فیلتر - مشاهده‌گر پیشنهادی در مقایسه با مشاهده‌گر متداول [7] عبارتند از:

1. در این فیلتر - مشاهده‌گر، عمل فیلتر کردن موج و تخمین حرکت فرکانس پایین مستقل از تخمین اختلال فرکانس پایین و سرعت وسیله انجام می‌شود. این امر باعث افزایش کارایی و دقت در حذف اختلال فرکانس موج و تخمین حرکت فرکانس پایین می‌شود.
2. فیلتر پیشنهادی از ترکیب یک فیلتر شکاف‌دار و یک شاخه تخمین‌زن حرکت فرکانس پایین تشکیل شده است. این تغییر از یک طرف باعث افزایش کارایی فیلتر شکاف‌دار در فیلترکردن سیگنال ورودی شده و از طرف دیگر، تخمین حرکت فرکانس پایین را مستقل از مدل‌های حرکت شناور و اختلال فرکانس پایین و همچنین سیگنال کنترل خواهد کرد. این امر باعث مقاوم‌شدن تخمین حرکت فرکانس پایین نسبت به نامعینی‌های مدل می‌شود.
3. ورودی مشاهده‌گر، موقعیت فرکانس پایین تخمینی است. تخمین دقیق‌تر و بدون نوسان حرکت فرکانس پایین باعث بهبود تخمین اختلال و سرعت فرکانس پایین وسیله خواهد شد. علاوه بر این، محاسبه ماتریس انتقال بر مبنای سیگنال فیلتر شده انجام می‌شود. در ادامه الگوریتم مربوط به هر دو بخش فیلتر و مشاهده‌گر ارائه شده است.

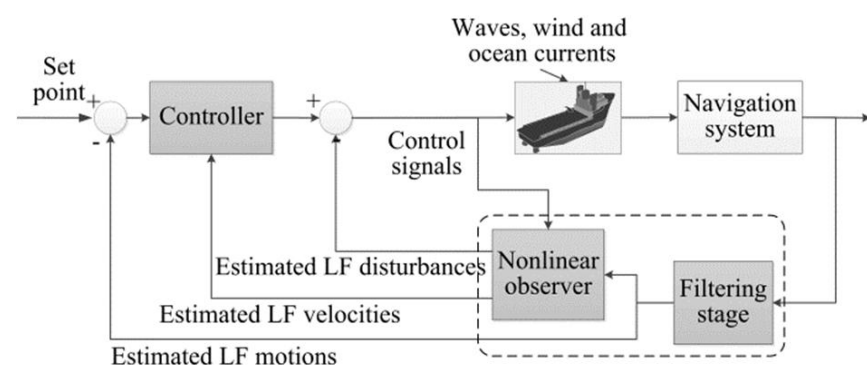


Fig. 5 Block diagram of the proposed control system based on filter and observer

شکل 5 بلوک دیگرام سیستم کنترل پیشنهادی مبتنی بر فیلتر و مشاهده‌گر

رابطه (7) برای مدل‌سازی موقعیت و جهت اندازه‌گیری شده η_{tot} استفاده می‌شود [7].

$$\eta_{tot} = \eta + \eta_w + d \quad (7)$$

در این رابطه $d \in R^3$ یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر در هر درجه آزادی بوده که معرف نویز اندازه‌گیری است.

2-4- روش متداول در فیلترینگ موج و تخمین حالت

ساختار فیلترینگ و تخمین حالت متداول در شکل 4 ارائه شده است. این روش ابتدا در [7] معرفی شد و در ادامه در طراحی سیستم کنترل تثبیت موقعیت شناورهای سطحی و زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفته‌است. این روش که در واقع یک مشاهده‌گر غیرخطی است، شامل مدل خطی (5) بیان‌کننده دینامیک اثر مرتبه اول موج به ازای هر درجه‌آزادی حرکت و معادلات (1) بیان‌کننده حرکت فرکانس پایین شناور است که به صورت موازی به هم متصل شده‌اند. خطای مشاهده‌گر شامل مجموع خطای تخمین حرکت فرکانس پایین و خطای تخمین حرکت فرکانس موج شناور است. این مشاهده‌گر دارای پایداری نمایی سراسری با لحاظ کردن فرضیات ذیل است [7، 18].

الف) از نویز حسگرهای اندازه‌گیری موقعیت و جهت بدلیل ناچیز بودن نسبت به حرکت القاء شده ناشی از اثر مرتبه اول موج صرف‌نظر شده است. ب) سرعت حرکت وسیله کم بوده و لذا ساده‌سازی‌های مدل دینامیکی معتبر است. ج) دامنه حرکت القایی جهت شناور ψ_w کوچک بوده و لذا $R(\psi) \approx R(\psi + \psi_w)$ فرض شده‌است.

3- سیستم کنترل پیشنهادی

وظیفه اصلی سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی، نگهداری شناور در

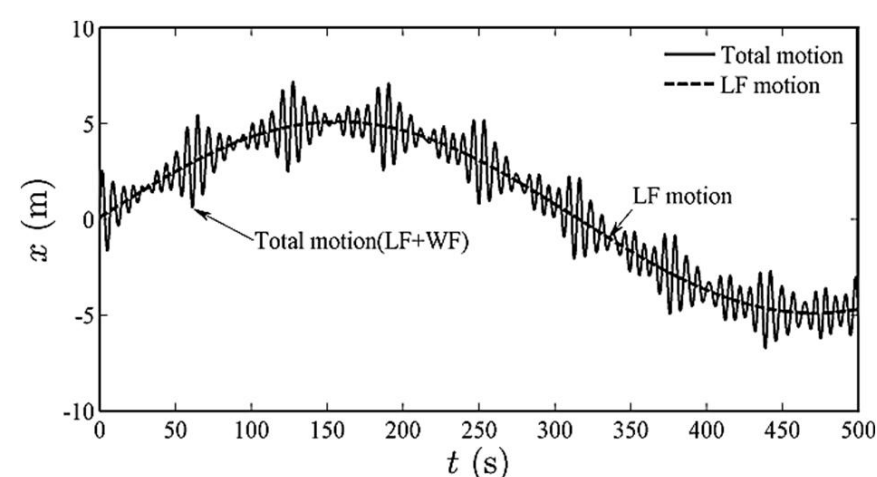


Fig. 3 Example of a marine vessel motion. The total motion can be thought of as the superposition of a low-frequency (LF) and a zero-mean oscillatory wave-frequency (WF) component

شکل 3 مثالی از موقعیت اندازه‌گیری شده شناور به صورت جمع یک حرکت فرکانس پایین و یک حرکت نوسانی فرکانس موج با میانگین صفر

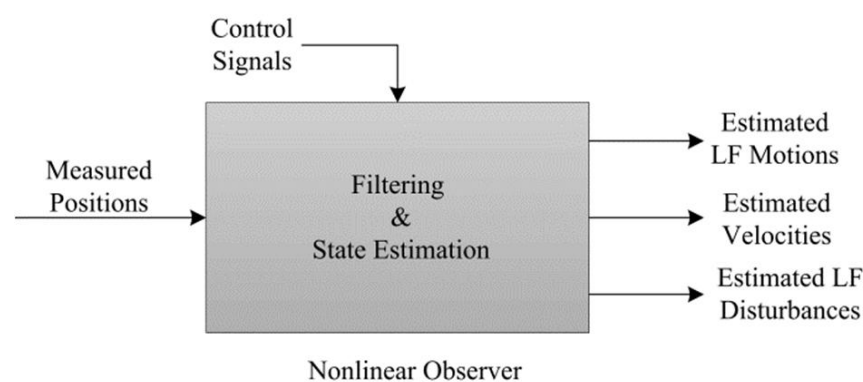


Fig. 4 The conventional observer

شکل 4 مشاهده‌گر متداول

که در این رابطه k_p و k_I مقادیر مثبت و $e = u - x_2 - x_0$ است. معادله مشخصه سیستم (10) عبارت است از:

$$\Delta(s) = s^4 + (k_p + k)\omega_0 s^3 + (k_I + \omega_0)\omega_0 s^2 + k_p \omega_0^3 s + k_I \omega_0^3 \quad (11)$$

این رابطه به ازای تمامی مقادیر مثبت k ، k_p و k_I که در رابطه $k_p \omega > (k_p + k)k_I$ صدق کند، یک چند جمله‌ای هرویتز⁴ بوده و بنابراین فیلتر به ازای ورودی محدود دارای پایداری‌های ورودی به حالت⁵، ورودی محدود- خروجی محدود⁶ و نمایی سراسری⁷ است.

3-1-2- مشاهده گر غیرخطی

هدف از طراحی مشاهده گر غیرخطی، تخمین سرعت و اختلال فرکانس پایین وارده بر شناور است. همان‌گونه که ذکر شد، اندازه‌گیری سرعت و اختلال فرکانس پایین وارده بر شناور در بسیاری از موارد غیرممکن بوده و یا نیاز به حسگرهای گران قیمت دارد. همچنین تخمین مستقیم آن‌ها با استفاده از موقعیت و جهت اندازه‌گیری شده نتایج مطلوب نخواهد داشت. به این منظور یک مشاهده گر غیرخطی مبتنی بر مدل فرکانس پایین شناور (1) و اختلال (6) پیشنهاد شده است و در ساختار پیشنهادی پس از بخش فیلتر قرار داده می‌شود. روابط حاکم بر این مشاهده گر عبارتند از:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\eta}} &= R(\psi_f) \hat{V} + K_1 \tilde{\eta} \\ \dot{\hat{b}} &= -T^{-1} \hat{b} + K_2 \tilde{\eta} \\ M \dot{\hat{V}} &= -D \hat{V} + R^T(\psi_f) \hat{b} + \tau + R^T(\psi_f) K_3 \tilde{\eta} \end{aligned} \quad (12)$$

در این روابط، $\tilde{\eta} = \eta_f - \hat{\eta}$ بردار خطای تخمین در مشاهده گر، η_f بردار سیگنال موقعیت و جهت فیلتر شده، τ بردار سیگنال کنترل و $R(\psi_f)$ ماتریس انتقال از دستگاه مختصات بدنی به دستگاه اینرسی بوده که بر مبنای سیگنال جهت فیلتر شده محاسبه می‌شود. \hat{b} و \hat{V} به ترتیب تخمین بردارهای سرعت و اختلال فرکانس پایین است. K_1 ، K_2 و K_3 ماتریس‌های قطری 3×3 با عناصر مثبت هستند. با انتخاب عناصر قطری ماتریس‌های بهره به گونه‌ای که در رابطه $k_{1i} k_{3i} \geq k_{2i}$ ، $i = 1, 2, 3$ صدق نمایند، مشاهده گر دارای پایداری نمایی سراسری بوده و بردارهای $\tilde{\eta}$ و $\tilde{V} = [\tilde{\eta}^T \quad \tilde{b}^T]^T$ به صورت نمایی به صفر همگرا می‌شوند [25].

تذکر: در اثبات پایداری مشاهده گر نشان داده شده است که خطای تخمین حالت‌ها در مشاهده گر با حضور ورودی‌های سیگنال موقعیت η_f و سیگنال کنترل τ به صورت نمایی به صفر همگرا می‌شود. به عبارت دیگر، حالت‌های بلوک مشاهده گر مستقل از حالت‌های بلوک فیلتر به مقادیر واقعی

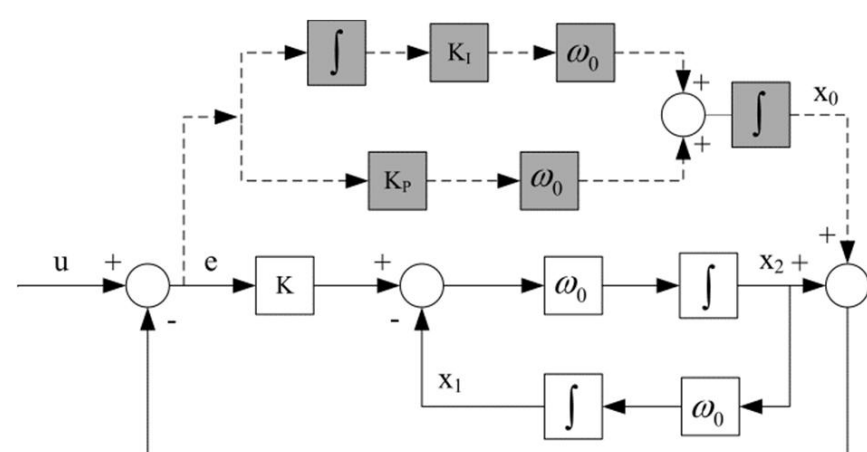


Fig. 7 Block diagram of the modified filter

شکل 7 بلوک دیاگرام فیلتر اصلاح شده

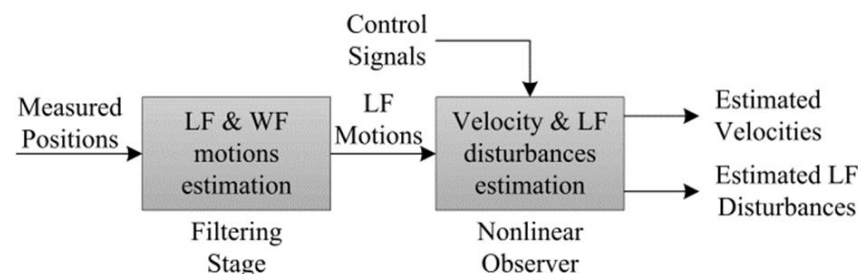


Fig. 6 Structure of the filter-observer

شکل 6 ساختار فیلتر-مشاهده گر

3-1-1- بخش فیلتر

هدف از انجام فیلترینگ، حذف اثر اختلال مرتبه اول موج از سیگنال موقعیت شناور است. همان‌گونه که اشاره شد، این اختلال دارای یک طیف میان‌گذر با پهنای باند محدود با فرکانس مرکزی برابر فرکانس موج است. این اختلال توسط رابطه (5) مدل می‌شود که به صورت تابع انتقال یک فیلتر میان‌گذر¹ است. بنابر این، به منظور حذف اثر اختلالی مرتبه اول موج در حرکت شناور و استخراج حرکت فرکانس پایین، می‌توان از یک فیلتر شکافدار مرتبه دوم به ازای هر درجه آزادی حرکت استفاده نمود. تابع انتقال فیلتر درجه دوم میان‌گذر

$$\text{BPF}(s) = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (8)$$

و فیلتر شکافدار $\text{NF}(s) = 1 - \text{BPF}(s)$ است. در این معادله ω_0 فرکانس پیک²، $k = 2\zeta$ و ζ ضریب میرایی³ نامیده می‌شود. با تعریف γ به عنوان سیگنال خروجی فیلتر و حالت‌های $x_1 = \omega_0 \int \gamma$ و $x_2 = \gamma$ ، معادلات حالت این فیلتر به صورت

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 + k\omega_0 e \end{aligned} \quad (9)$$

بیان می‌شود. در این رابطه $e = u - x_2$ که u بیان‌کننده سیگنال ورودی به فیلتر است. بنابر این e معرف سیگنال بدون نوسان خواهد بود [24]. در کاربرد تثبیت موقعیت دینامیکی، ω_0 برابر فرکانس حرکت نوسانی، u موقعیت اندازه‌گیری شده (η_{toti}) و x_2 و e نیز به ترتیب بیان‌کننده حرکت نوسانی (η_{wi}) و حرکت فرکانس پایین (η_i) در درجه آزادی نام حرکت شناور است.

در صورت وجود یک سیگنال فرکانس پایین در سیگنال ورودی به فیلتر، یک خطای فرکانس پایین در حلقه فیلتر و حالت x_1 و x_2 ایجاد خواهد شد که به راحتی قابل حذف نخواهد بود [24]. این امر باعث ایجاد یک خطای ماندگار و تضعیف عملکرد فیلتر در طی زمان خواهد شد. به منظور حل این مشکل یک شاخه به ساختار فیلتر شکافدار اضافه شده است. این شاخه یک دینامیک مبتنی بر خطا را به دینامیک فیلتر شکافدار اضافه می‌کند که امکان تخمین بخش فرکانس پایین سیگنال ورودی (حرکت فرکانس پایین شناور) را فراهم می‌سازد. بنابر این خطای فیلتر e حاوی بخش فرکانس پایین سیگنال ورودی نخواهد بود. بلوک دیاگرام این فیلتر اصلاح شده در شکل 7 نشان داده شده است. معادلات حاکم بر فیلتر پیشنهادی در رابطه (10) بیان شده است.

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= k_p \omega_0 e + k_I \omega_0 \int e \\ \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 + k\omega_0 e \end{aligned} \quad (10)$$

4- Hurwitz

5- Input to State Stable

6- Bounded Input Bounded Output

7- Globally Exponentially Stable

1- Band-pass Filter

2- Peak Frequency

3- Damping ratio

جدول 1 پارامترهای طراحی

Table 1 Design parameters

پارامترها	مقادیر عددی
ماتریس جرمی	$M = \text{diag}([5.3122 \times 10^6, 8.2831 \times 10^6, 3.7454 \times 10^9])$
ماتریس ضرایب	$D = \begin{bmatrix} 5.0242 \times 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7229 \times 10^5 & -4.3933 \times 10^6 \\ 0 & -4.3933 \times 10^6 & 4.1894 \times 10^8 \end{bmatrix}$
هیدرودینامیکی	
ثابت زمانی اختلال	$T = 1000I_3$
فرکانس پایین	
بهره‌های فیلتر	$K = 2.5I_3; K_p = 0.2I_3; K_i = 0.03I_3$
بهره‌های مشاهده‌گر	$K_1 = 1.1I_3; K_2 = 0.1K_3; K_3 = \text{diag}([0.1, 0.1, 100])$

توضیح: واحد کمیت‌ها در تمام مقاله بر مبنای سامانه متریک است. واحد درایه‌های قطری اول و دوم ماتریس جرمی (kg) و درایه قطری سوم (kgm^2) است. واحد درایه‌های قطری ماتریس ضرایب هیدرودینامیکی به ترتیب (kg/s)، (kg/s)، (kgm^2/s) و بقیه درایه‌ها (kgm/s) است. واحد تمامی درایه‌های ماتریس ثابت زمانی اختلال بر مبنای (s) است.

در تمام نتایج ارائه شده فرض شده است که هدف کنترلی، انتقال و تثبیت موقعیت دینامیکی شناور در مختصات $\eta_d = [10\text{m}, 10\text{m}, 10^\circ]^T$ است. برای این منظور از یک کنترل کننده تناسبی- مشتق‌گیر با مقادیر بهره $K_p = K_d = \text{diag}[1000, 1000, 1000000]^T$ استفاده شده است.

4-1- ضرورت استفاده از فیلتر و مشاهده‌گر در سیستم کنترل

شکل‌های 8 الی 10 تاثیر استفاده و یا عدم استفاده از فیلتر و مشاهده‌گر در سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی یک شناور را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. به این منظور فرض شده با فیلترینگ و تخمین ایده‌آل مقادیر حرکت و اختلال فرکانس پایین و سرعت وسیله به‌صورت بلادرنگ² در اختیار است. لازم به ذکر است که به منظور رعایت اختصار فقط نمودارهای مربوط به حرکت روبه‌جلو ارائه شده است.

شکل 8 مقایسه بین عملکرد سیستم کنترل در دو حالت استفاده مستقیم از موقعیت اندازه‌گیری شده η_{tot} و استفاده از سیگنال فرکانس پایین حرکت η حاصل از فیلترینگ ایده‌آل را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی فرض شده که اختلال فرکانس پایین اعمالی به شناور b برابر صفر باشد و شناور فقط تحت تاثیر اختلال فرکانس موج قرار دارد.

شکل 8- الف کیفیت تعقیب سیگنال حرکت فرکانس پایین مطلوب و تثبیت موقعیت را در دو حالت مذکور نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اگرچه کیفیت تعقیب و تثبیت موقعیت تقریباً یکسان است، لیکن نیروی کنترلی مورد نیاز برای رسیدن به این هدف بسیار متفاوت است (شکل 8- ب). در حالتی که از سیگنال فیلتر شده موقعیت استفاده شده است، سیگنال کنترل بدون هیچ نوسان شدیدی بوده و همچنین در وضعیت تثبیت موقعیت مقدار آن به صفر رسیده است. این در حالی است که نیروی کنترلی موردنیاز در حالت استفاده مستقیم از موقعیت اندازه‌گیری شده حتی در حالت تثبیت موقعیت با دامنه قابل ملاحظه‌ای نوسانی است. این نکته قابل ذکر است که در عمل حتی اگر محرک‌ها قادر به تولید این نیرو باشند قطعاً عملکرد کنترلی شناور مطلوب نخواهد بود.

همان‌گونه که اشاره شد، شناورها همواره تحت اثر اختلال فرکانس پایین b ناشی از اختلال‌های محیطی قرار دارند. شکل 9 مقایسه عملکرد سیستم کنترل را در همان شرایط قبل نشان می‌دهد با این تفاوت که در این شبیه‌سازی، شناور تحت تاثیر اختلال فرکانس پایین مطابق رابطه (14) قرار گرفته است. مطابق شکل 9- الف، عملکرد سیستم کنترل در تعقیب ورودی

همگرا می‌شود. همچنین با توجه به پایداری نمایی سراسری فیلتر، دینامیک خطای ساختار فیلتر- مشاهده‌گر به ازای هر سیگنال ورودی محدود η_{tot} دارای پایداری نمایی سراسری خواهد بود.

3-2- کنترل کننده

تاکنون از روش‌ها مختلفی همچون کنترل بهینه، خطی‌سازی فیدبک، گام به عقب، فازی، مود لغزشی، شبکه عصبی و کنترل کننده‌های تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر برای طراحی کنترل کننده در کاربرد تثبیت موقعیت دینامیکی استفاده شده است. اما تنها تعداد محدودی از این کنترل کننده‌ها بر روی یک شناور پیاده‌سازی شده‌اند. مواردی از جمله پیچیدگی طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته در کنار موضوعات و مشکلات مربوط به پیاده‌سازی و بهره‌برداری باعث شده که در عمل همچنان کنترل کننده‌های ساده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر ترجیح داده شوند. مگر در مواردی که دقت عملکرد و زمان پاسخ‌گویی بسیار حائز اهمیت باشد. امروزه اغلب سیستم‌های تثبیت موقعیت تجاری از کنترل کننده‌های تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر برای کنترل شناور استفاده می‌کنند [9، 2، 1].

با توجه به این که هدف این مقاله، بررسی نقش فیلترینگ و تخمین اختلال در سیستم کنترل و همچنین مقایسه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی مبتنی بر فیلتر-مشاهده‌گر جدید با سیستم کنترل متداول است، در هر دو ساختار از یک کنترل کننده ساده تناسبی- مشتق‌گیر غیرخطی مطابق رابطه (13) استفاده شده است.

$$\tau = -R^T(\psi)K_p\tilde{\eta} - K_d\tilde{v} \quad (13)$$

که در این رابطه $\tilde{v} = \hat{v}$ ، $\tilde{\eta} = \hat{\eta} - \eta_d$ و K_p و K_d ماتریس‌های قطری 3×3 بهره‌های کنترل کننده است.

4- شبیه‌سازی عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی

در این بخش دو هدف عمده دنبال می‌شود. هدف اول بررسی ضرورت فیلترینگ موقعیت، تاثیر تخمین اختلال و سرعت شناور و همچنین بیان اهمیت کاهش خطای تخمین این متغیرها در عملکرد سیستم کنترل است. هدف دیگر مقایسه و بررسی برتری عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روش متداول است. به این منظور شبیه‌سازی‌ها با استفاده از محیط نرم‌افزار متلب/سیمولینک¹ در دو بخش ارائه شده است. در مرحله اول فرض شده با فیلترینگ و تخمین ایده‌آل، مقادیر واقعی حرکت و اختلال فرکانس پایین و همچنین سرعت شناور (مستخرج از مدل) در اختیار است و عملکرد سیستم کنترل در شرایط مختلف بررسی شده است. در مرحله دوم عملکرد سیستم کنترل با استفاده از ساختار پیشنهادی و روش متداول در شرایط یکسان مقایسه شده‌اند. برای امکان صحت‌سنجی و مقایسه عملکرد ساختار پیشنهادی با عملکرد روش متداول، مشخصات شناور و همچنین پارامترهای طراحی همانند مقادیر متناظر آن در [7] مطابق جدول 1 انتخاب شده‌اند.

همچنین فرض شده که شناور تحت تاثیر اختلال مرتبه اول موج، حرکت القایی نوسانی با دامنه 2 متر در حرکت روبه جلو و حرکت جانبی و حرکت القایی نوسانی با دامنه 2 درجه در حرکت چرخشی با فرکانس‌های $\omega_{0i} = 0.8976 \text{ rad/s}$ ، $i = 1, 2, 3$ دارد. اختلال فرکانس پایین مطابق رابطه (14) به شناور اعمال شده است.

$$\dot{b} = -T^{-1}b \quad (14)$$

$$b_0 = [-10000 \text{ (N)}, -10000 \text{ (N)}, -100000 \text{ (N)}]^T$$

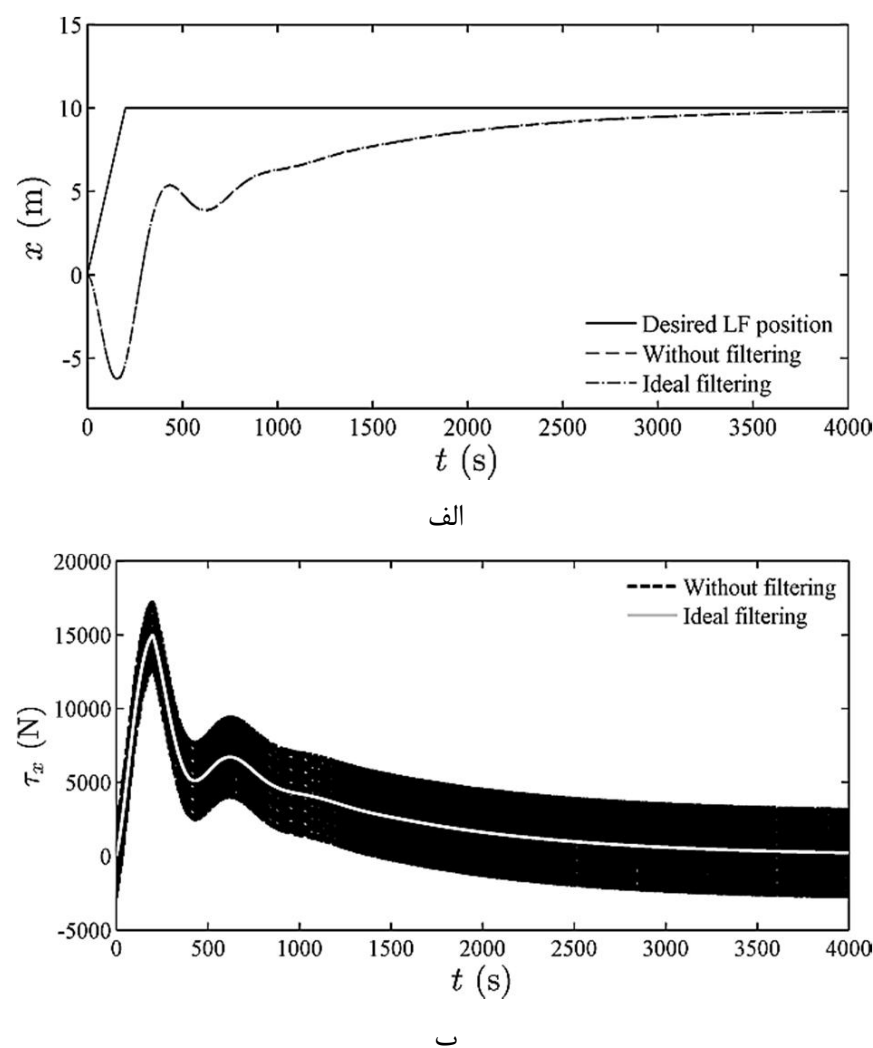


Fig. 9 Performance comparison of control system in surge in two cases of with filtering and without filtering in the presence of WF and LF disturbances, (a) position tracking, (b) control signal

شکل 9 مقایسه عملکرد سیستم کنترل در حرکت روبه‌جلو در حضور اختلال فرکانس موج و اختلال فرکانس پایین در دو حالت استفاده و عدم استفاده از فیلتر، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل

نتایج به مراتب از شرایط ذکر شده در شبیه‌سازی شکل 8 به حالت عملیاتی نزدیک‌تر است.

شکل 11 نتایج عملکرد سیستم کنترل در حضور اختلال فرکانس موج η_w و اختلال فرکانس پایین b را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی از کنترل کننده با بهره $k_{d1} = 1000$ و $k_{p1} = 1000$ استفاده شده است.

شکل 11- الف نشان دهنده برتری عملکرد سیستم کنترل تثبیت موقعیت دینامیکی شناور در حالت استفاده از مشاهده‌گر اختلال فرکانس پایین است. این در حالی است که سیگنال تولید شده در کنترل کننده در هر دو حالت استفاده و عدم استفاده از مشاهده‌گر تقریباً یکسان بوده است (شکل 11- ب). مقایسه نتایج ارائه شده در دو شکل 10 و 11 به خوبی اهمیت و لزوم فیلترینگ و تخمین حالت‌های سیستم را نشان می‌دهد.

4-2- بررسی کارآیی روش پیشنهادی و مقایسه با عملکرد روش متداول

در این بخش، شبیه‌سازی‌هایی به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی ارائه شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، عملکرد روش پیشنهادی با سه روش (الف) سیستم کنترل بدون فیلتر و مشاهده‌گر، (ب) روش متداول و (ج) استفاده از مقادیر واقعی موقعیت، سرعت و اختلال فرکانس پایین (حاصل از فیلترینگ و تخمین ایده‌آل) مقایسه شده است. در شبیه‌سازی‌ها شناور تحت اثر هر دو اختلال فرکانس موج و فرکانس پایین قرار داشته و بهره کنترل کننده برابر با $k_{p1} = 1000$ و $k_{d1} = 1000$ انتخاب شده است. شکل‌های 12، 13 و 14 نمایانگر عملکرد سیستم کنترل تثبیت موقعیت

مطلوب، مناسب نیست. این در حالی است که علی‌رغم یکسان بودن کیفیت تعقیب در هر دو حالت، سیگنال کنترل محاسبه شده در کنترل کننده بسیار متفاوت است (شکل 9- ب). سیگنال کنترل با استفاده از موقعیت اندازه‌گیری شده بسیار نوسانی بوده در حالی که در شرایط استفاده از موقعیت فیلتر شده بدون نوسان بوده و در حالت تثبیت موقعیت به صفر میل کرده است. در هر حال سیستم کنترل در این شرایط، عملکرد مطلوبی نداشته است.

یک روش برای حل این مشکل، استفاده از کنترل کننده بهره بالا است. شکل 10 نشان دهنده عملکرد سیستم کنترل با استفاده از کنترل کننده با بهره $k_{d1} = 1000$ و $k_{p1} = 1000000$ در حضور اختلال فرکانس پایین است. در شکل 10- الف مشاهده می‌شود که عملکرد سیستم نسبت به شرایط قبل (شکل 9- الف) بسیار بهتر است. خطای تثبیت موقعیت در حالت استفاده از موقعیت فیلتر شده به صفر رسیده در حالی که این خطا در حالت استفاده از موقعیت اندازه‌گیری شده قابل توجه است. شکل 10- ب به وضوح اهمیت استفاده از موقعیت فیلتر شده را نشان می‌دهد. در این حالت، نیروی کنترل کاهش قابل توجه داشته و بدون نوسان شدید است. در صورت فیلتر نکردن موقعیت اندازه‌گیری شده و تحت اختلال فرکانس موج و اختلال فرکانس پایین، میزان نیروی لازم جهت نیل به اهداف سیستم تثبیت موقعیت دینامیکی از نظر مقدار و نیز به خصوص از نظر وجود نوسان شرایط نامطلوبی دارد. علاوه بر این موارد، به کارگیری کنترل کننده‌های بهره بالا باعث ایجاد حساسیت شدید سیستم کنترل در مقابل وجود نویزهای اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به این که شناورها در حین انجام عملیات همواره تحت اثر اختلال‌های محیطی شامل اختلال فرکانس موج و اختلال فرکانس پایین قرار دارد، این

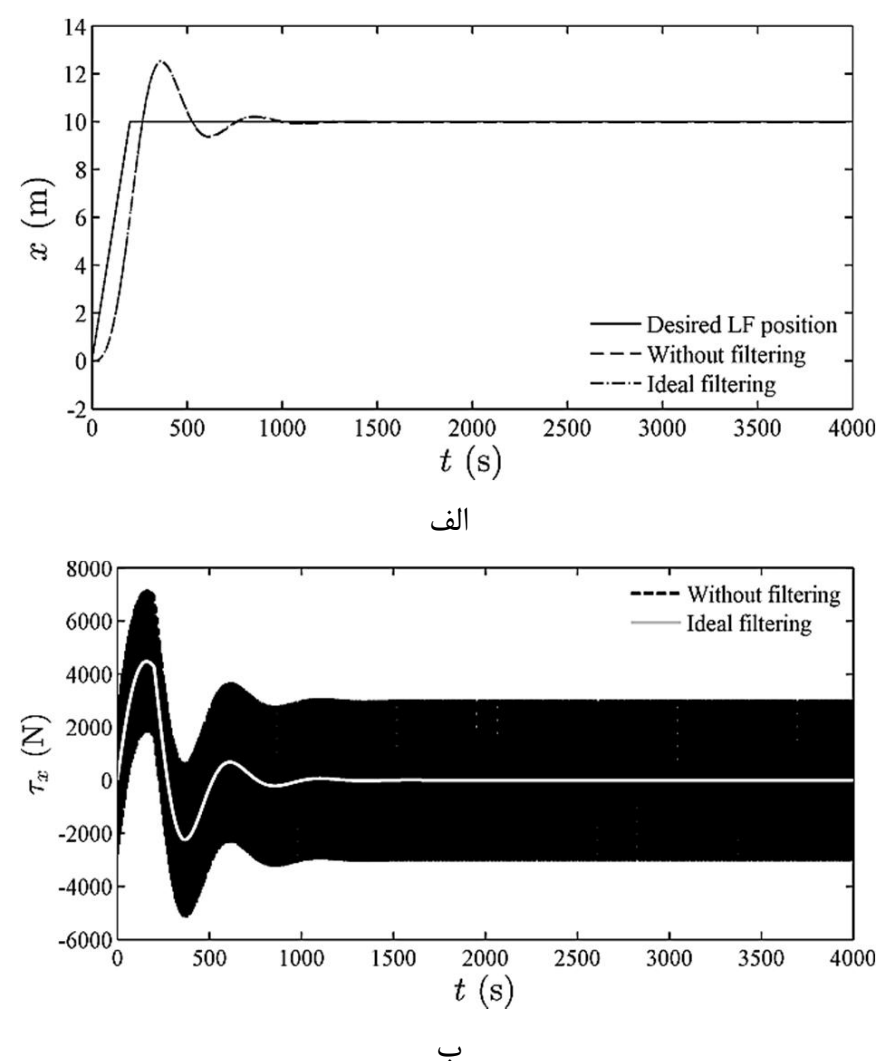


Fig. 8 Performance comparison of control system in surge in two cases of with filtering and without filtering in the presence of WF disturbance, (a) position tracking, (b) control signal

شکل 8 مقایسه عملکرد سیستم کنترل در حرکت روبه‌جلو در حضور اختلال فرکانس موج در دو حالت استفاده و عدم استفاده از فیلتر، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل

شناورها مبتنی بر بازخورد موقعیت ارائه گردید. در این روش از یک ساختار جدید شامل یک فیلتر و مشاهده گر که به صورت سری به هم متصل شده اند استفاده شده است. فیلتر - مشاهده گر پیشنهادی دارای پایداری نمایی سراسری است. نتایج شبیه سازی ها مؤید برتری روش پیشنهادی نسبت به روش متداول در فیلترینگ اثر اختلال فرکانس موج و تخمین حرکت فرکانس پایین، سرعت و اختلال فرکانس پایین و در نتیجه بهبود کیفیت سیگنال کنترل است. براساس شبیه سازی ها موارد زیر قابل بیان است.

1. استفاده از فیلتر و مشاهده گر در طراحی سیستم تثبیت موقعیت، باعث افزایش توانایی سیستم در مقابله با اختلال های محیطی می شود.
2. استفاده از فیلتر باعث افزایش دقت تثبیت موقعیت و کاهش قابل توجه نوسان در سیگنال کنترل شده که این خود می تواند باعث کاهش مصرف سوخت/انرژی و جلوگیری از سایش و خرابی محرک ها و مکانیزم های مربوطه گردد.
3. استفاده از مشاهده گر اختلال و سرعت باعث افزایش سرعت تعقیب موقعیت شده و امکان استفاده از کنترل کننده ها با بهره پایین را میسر می کند. کاهش بهره کنترل کننده خود باعث کاهش حساسیت سیستم کنترل نسبت به نویز اندازه گیری خواهد شد.
4. استفاده از سیستم کنترل پیشنهادی باعث افزایش کیفیت سیگنال کنترل شامل کاهش قابل توجه دامنه و نوسانات آن می گردد. این امر ناشی از افزایش دقت در تخمین حرکت و اختلال فرکانس پایین و سرعت شناور است.

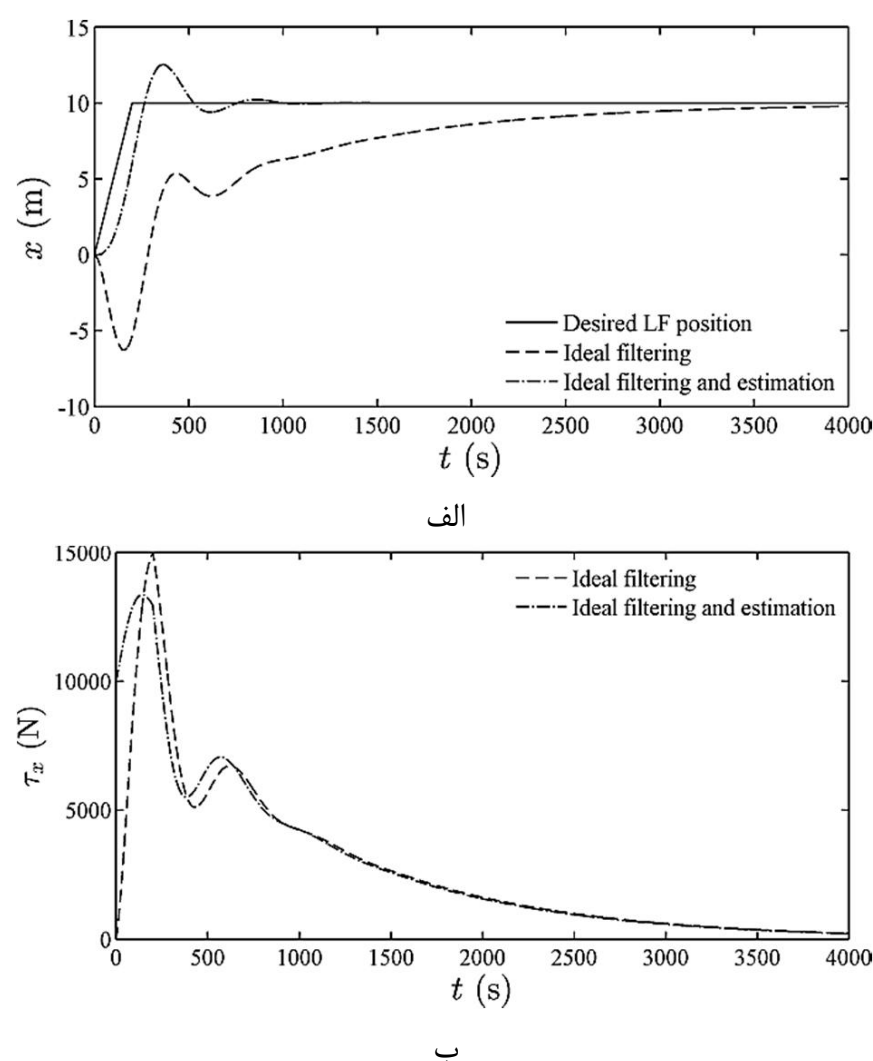


Fig. 11 Performance comparison of control system in surge in two cases of with observer and without observer in the presence of WF and LF disturbances when the filtering is used, (a) position tracking, (b) control signal

شکل 11 مقایسه عملکرد سیستم کنترل با فیلتر در حرکت روبه جلو در حضور اختلال فرکانس موج و اختلال فرکانس پایین در دو حالت استفاده و عدم استفاده از مشاهده گر، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل

دینامیکی در تعقیب و تثبیت موقعیت و نیز سیگنال کنترل در حرکت روبه جلو، حرکت جانبی و حرکت چرخشی شناور در شرایط فوق الذکر است. شکل 12- الف کیفیت تعقیب و تثبیت موقعیت شناور را در جهت حرکت رو به جلو نشان می دهد. عملکرد سیستم در هر دو روش پیشنهادی و متداول در حالت گذرا و همچنین حالت ماندگار بسیار نزدیک است. این بدین معنی است که سرعت تخمین حالت های سیستم در هر دو روش مناسب بوده و این در حالی است که این عملکردها تقریباً مشابه عملکرد حالت ایده آل است. شکل 12- ب مقایسه سیگنال کنترل تولید شده توسط کنترل کننده در روش های مختلف را نشان می دهد. علی رغم کیفیت یکسان تثبیت موقعیت، برتری روش پیشنهادی در این شکل مشاهده می شود. سیگنال کنترل مورد نیاز در روش پیشنهادی بدون نوسان بوده و در حالت ماندگار به سمت صفر میل کرده است. لیکن در روش متداول سیگنال کنترل دارای نوسان شدید حتی در حالت ماندگار است. همچنین دیده می شود که سیگنال کنترل در روش پیشنهادی بسیار نزدیک به حالت ایده آل است.

شکل های 13 و 14 به ترتیب کیفیت تعقیب و تثبیت موقعیت به همراه سیگنال کنترل را در دو جهت حرکت جانبی و حرکت چرخشی شناور نشان می دهد. این نتایج همانند شبیه سازی حرکت روبه جلو، نشان دهنده برتری عملکرد روش پیشنهادی بر روش متداول و همچنین نزدیکی به عملکرد ایده آل است.

5- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید طراحی سیستم کنترل در تثبیت موقعیت

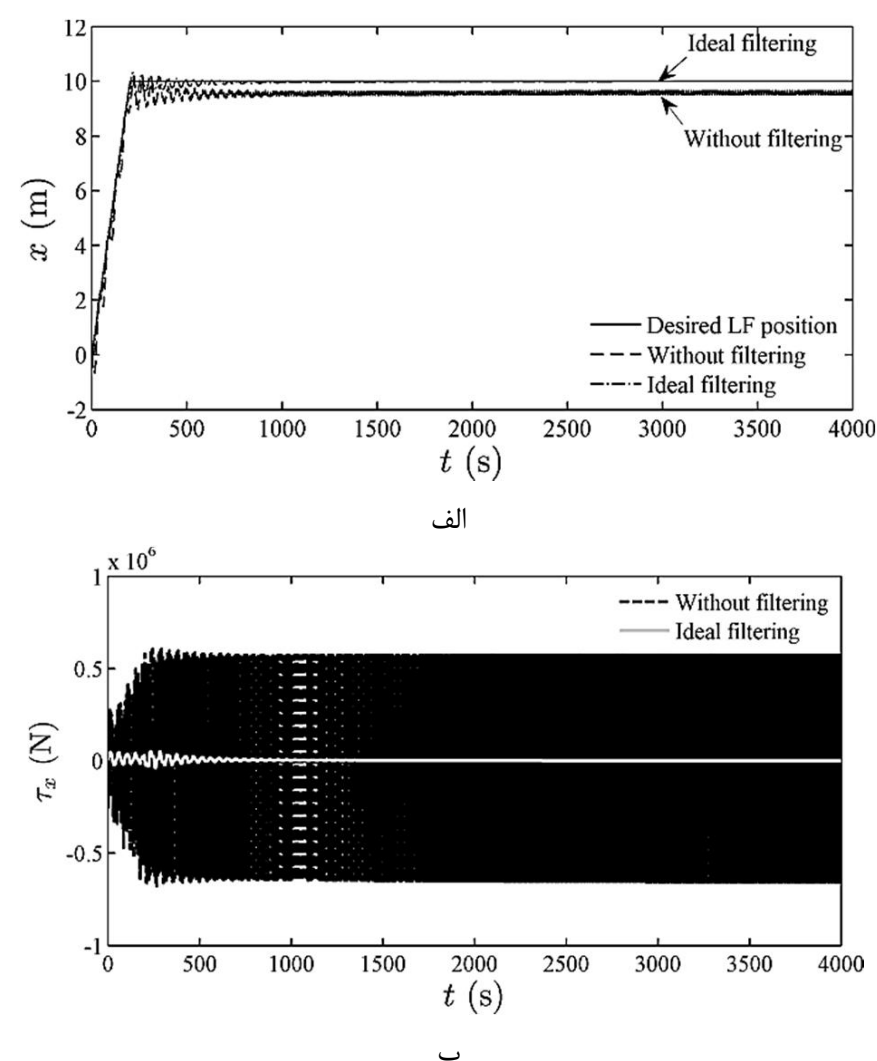
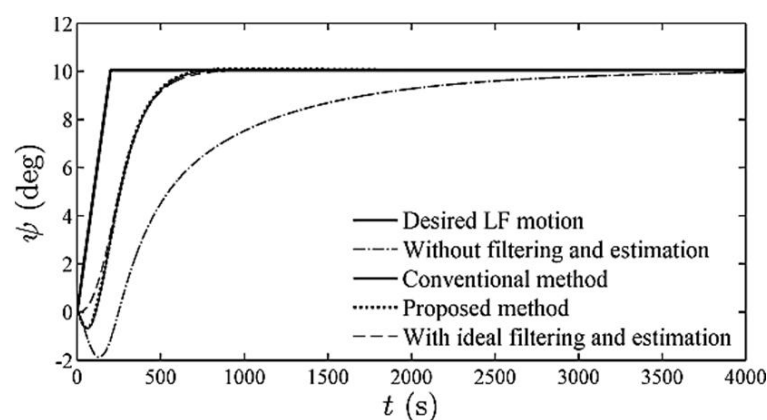
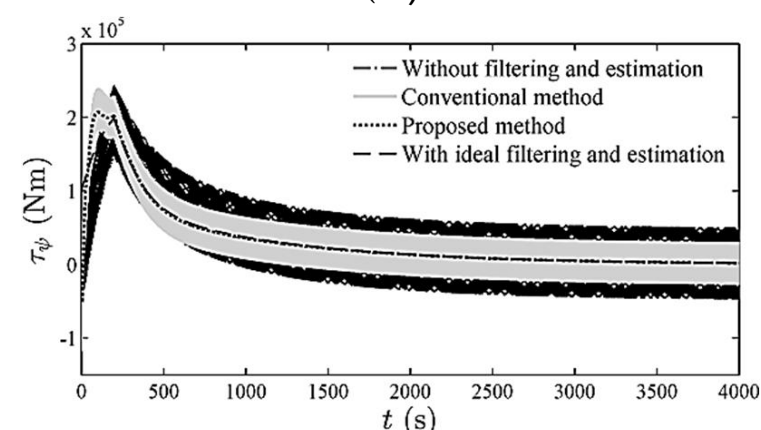


Fig. 10 Performance comparison of control system in surge in two cases of with filtering and without filtering in the presence of WF and LF disturbances when the high gain controller is used, (a) position tracking, (b) control signal

شکل 10 مقایسه عملکرد سیستم کنترل با کنترل کننده بهره بالا در حرکت روبه جلو در حضور اختلال فرکانس موج و اختلال فرکانس پایین در دو حالت استفاده و عدم استفاده از فیلتر، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل



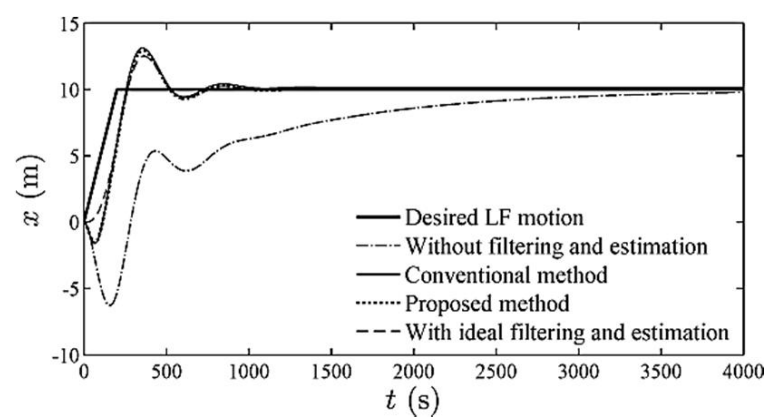
(الف)



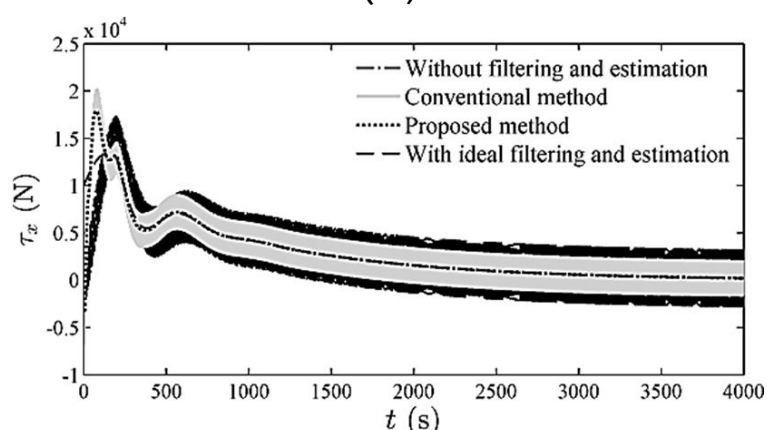
(ب)

Fig. 14 Performances of four control systems (the proposed method, the conventional method, the system with ideal filtering and estimation, and the system without filtering and estimation) in yaw, (a) position tracking, (b) control signal

شکل 14 عملکرد چهار سیستم کنترل (روش پیشنهادی، روش متداول، سیستم با فیلترینگ و تخمین ایده‌آل، سیستم بدون فیلتر - مشاهده‌گر) در حرکت چرخشی، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل



(الف)



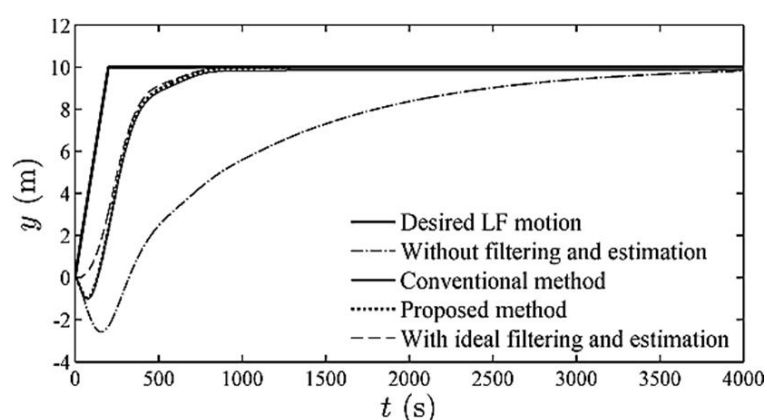
(ب)

Fig. 12 Performances of four control systems (the proposed method, the conventional method, the system with ideal filtering and estimation, and the system without filtering and estimation) in surge, (a) position tracking, (b) control signal

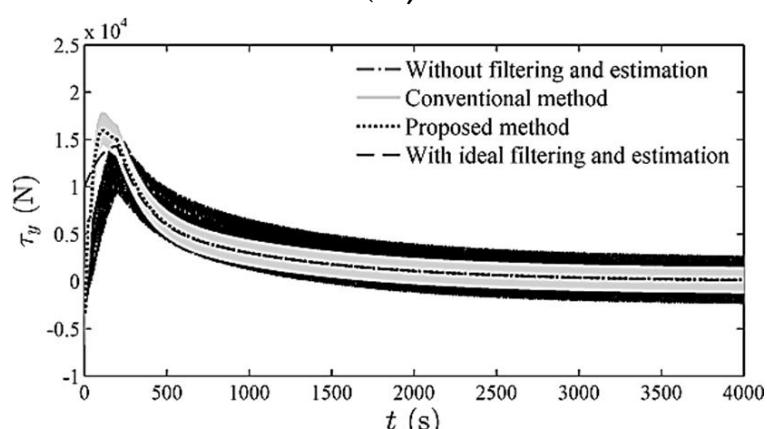
شکل 12 عملکرد چهار سیستم کنترل (روش پیشنهادی، روش متداول، سیستم با فیلترینگ و تخمین ایده‌آل، سیستم بدون فیلتر - مشاهده‌گر) در حرکت روبه جلو، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل

6- مراجع

- [1] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, First ed., pp. 187-396, Trondheim: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [2] D. A. Smallwood, L. L. Whitcomb, Model-Based Dynamic Positioning of Underwater Robotic Vehicles: Theory and Experiment, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 169-186, 2004.
- [3] V. Hassani, A. M. Pascoal, and A. J. Sprensen, A novel methodology for adaptive wave filtering of marine vessels theory and experiments of marine vessels, in *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Florence, Italy, 2013.
- [4] B. Moaveni, M. Khosravi Roqaye Abad, S. Nasiri, M. Amiri, Vehicle longitudinal velocity estimation using two new estimators and without measuring the braking torque, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 183-193, 2014 (in Persian فارسی).
- [5] E. Bagherpour-Ardakani, M.R. Hairi-Yazdi, M. Mahjoob, Unknown input observer for sensor fault detection in linear systems with unmatched uncertainties, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 292-300, 2015 (in Persian فارسی).
- [6] M. Navabi, S. Soleymanpour, Command Filtered Modular Adaptive Backstepping Attitude Control of Spacecraft in Presence of Disturbance Torque, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 285-296, 2015 (in Persian فارسی).
- [7] T. I. Fossen, and J. P. Strand, Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: Experimental results with a supply vessel, *Automatica*, Vol. 35, No. 1, pp. 3-16, 1999.
- [8] T. I. Fossen, and T. Perez, Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 29, No. 6, pp. 32-46, 2009.
- [9] A. J. Sørensen, A survey of dynamic positioning control systems, *Annual Reviews in Control*, Vol. 35, pp. 123-136, 2011.
- [10] J. G. Balchen, N. A. Jenssen, and S. Sælid, Dynamic positioning using Kalman filtering and optimal control theory, in *IFAC/IFIP Symposium on Automation in Offshore Oil Field Operation*, Bergen, Norway, 1976.
- [11] J. G. Balchen, N. A. Jenssen, E. Mathiasen, and S. Sælid, A dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control, *Modeling, Identification and Control*, Vol. 1, No. 3, pp. 135-163, 1980.
- [12] M. J. Grimble, R. J. Patton, D. A. Wise, Use of Kalman filtering techniques in dynamic ship positioning systems, *IEE, Control Theory and Applications*, Vol. 127, No. 3, pp. 93-102, 1980.
- [13] P. Fung, M.J. Grimble, Dynamic ship positioning using a self-tuning Kalman filter, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 28, No. 3, pp. 339-350, 1983.



(الف)



(ب)

Fig. 13 Performances of four control systems (the proposed method, the conventional method, the system with ideal filtering and estimation, and the system without filtering and estimation) in sway, (a) position tracking, (b) control signal

شکل 13 عملکرد چهار سیستم کنترل (روش پیشنهادی، روش متداول، سیستم با فیلترینگ و تخمین ایده‌آل، سیستم بدون فیلتر - مشاهده‌گر) در حرکت جانبی، (الف) تعقیب موقعیت (ب) سیگنال کنترل

- Control*, Vol. 81, No. 11, pp. 1806-1823, 2008.
- [20] S. Liu, D. Wang, and E. K. Poh, Output feedback control design for station keeping of AUVs under shallow water wave disturbances, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 19, pp. 1447-1470, 2009.
- [21] C. S. Chas, R. Ferreiro, Introduction to Ship Dynamic Positioning Systems, *Journal of Maritime Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 79-96, 2008.
- [22] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics*, pp. 237-320, Cambridge, MA: MIT Press, 1977.
- [23] O. M. Faltinsen, *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, pp. 13-101, Cambridge, U.K: Cambridge Univ. Press, 1990.
- [24] M. Karimi-Ghartemani, S. A. Khajehoddin, P. Jain, A. R. Bakhshai, and M. Mojiri, Addressing dc component in PLL and notch filter algorithms, *IEEE Trans. Power Electron*, Vol. 27, No. 1, pp. 78-86, 2012.
- [25] M. Loueipour, M. Keshmiri, M. Danesh, and M. Mojiri, Wave Filtering and State Estimation in Dynamic Positioning of Marine Vessels Using Position Measurement, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 12, pp. 3253-3261, 2015.
- [14] S. Sælid, N. A. Jenssen, and J. G. Balchen, Design and analysis of a dynamic positioning system based on Kalman filtering and optimal control, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 28, No. 3, pp. 331-339, 1983.
- [15] T. I. Fossen, S. I. Sagatun, and A. J. Sørensen, Identification of dynamically positioned ships, *Journal of Control Engineering Practice*, Vol. 4, No. 3, pp. 369-376, 1996.
- [16] V. Hassani, A. J. Sørensen, A. M. Pascoal, and A. P. Aguiar, Multiple model adaptive wave filtering for dynamic positioning of marine vessels, in *Proceeding of The American Control Conference*, Montréal, Canada, pp. 6222-6228, 2012.
- [17] J. P. Strand, and T. I. Fossen, Nonlinear passive observer design for ships with adaptive wave filtering, in *New Directions in Nonlinear Observer Design*, London, Springer-Verlag London Ltd, 1999, pp. 113-134.
- [18] G. Torsetnes, J. Jouffroy, and T. I. Fossen, Nonlinear dynamic positioning of ships with gain-scheduled wave filtering," in *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC'04)*, Paradise Island, 2004.
- [19] S. Liu, D. Wang, and E. K. Poh, Nonlinear output feedback tracking control for AUVs in shallow wave disturbance condition, *International Journal of*