



## Robust PI-based Data Fusion Approach for an INS/DVL Autonomous Underwater Positioning System

Mohammad Ali Rahgoshay<sup>a\*</sup>, Mohammad Ansari<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical and Electronics Engineering, Salman University of Kazerun, Kazerun Branch, Fars, Iran.

<sup>b</sup> Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kazerun Branch, Fars, Iran.

### Original Article

Use your device to scan  
and read the article online



**Citation:** Rahgoshay M A, Ansari M. Robust PI-based Data Fusion Approach for an INS/DVL Autonomous Underwater Positioning System. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(2):234-250.

 <https://10.66224/masm.5.2.234>

### KEYWORDS

Data Fusion,  
Inertial Navigation Systems,  
Doppler Velocity Log.

### ABSTRACT

The challenge of designing and implementing optimal data fusion methods that are both robust to uncertainties and simple enough for practical deployment has become a significant topic of interest in a wide range of navigation and positioning systems. In this study, inspired by the principles of Proportional-Integral-Derivative (PID) control theory and integrating them with the conventional structure of the standard Kalman filter, we propose a novel data fusion approach. This method is specifically designed to improve robustness against measurement uncertainties from the Doppler Velocity Log (DVL) sensor in an integrated marine navigation system based on INS/DVL. The proposed approach aims to enhance the system's resilience without introducing excessive computational complexity. Simulation results demonstrate that the integrated navigation system using the proposed algorithm outperforms traditional Kalman filter-based systems in terms of accuracy and response time, particularly under conditions involving sensor errors or uncertainty. These findings highlight the potential of the method for real-world applications in marine navigation scenarios.

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

Underwater navigation has long been a critical challenge due to the absence of GPS signals and the vulnerability of acoustic sensors to environmental disturbances. A widely accepted solution is the integration of Inertial Navigation Systems (INS) with Doppler Velocity Log (DVL) sensors. Although the Kalman filter is conventionally employed as the core data fusion method in such systems, its practical performance often deteriorates in the presence of modeling errors, noise uncertainty, and unexpected DVL disturbances. These limitations underscore the need for robust yet computationally efficient alternatives capable of maintaining navigation accuracy in challenging underwater conditions.

#### 2. Methodology

To address this problem, a novel Proportional-Integral (PI)-based data fusion scheme is proposed. The approach is inspired by the well-established principles of PID control and modifies the structure of the conventional Kalman filter by embedding proportional and integral components directly into the estimation

\* Corresponding author. Tel.: 989394136629

E-mail address: [m.rahgoshai@kazerunsfu.ac.ir](mailto:m.rahgoshai@kazerunsfu.ac.ir)

DOI: <https://10.66224/masm.5.2.234>

Received: July 16, 2025; Received in revised form: August 03, 2025; Accepted: September 01, 2025.

© Author



process. This hybrid structure provides additional robustness against systematic DVL errors and stochastic noise while avoiding the complexity typically associated with advanced nonlinear filters. The proposed architecture is depicted in Figure 1, which shows the integration of INS and DVL with the PI-based fusion mechanism. This design ensures that the algorithm remains suitable for real-time deployment in autonomous underwater vehicles, where computational resources are limited.

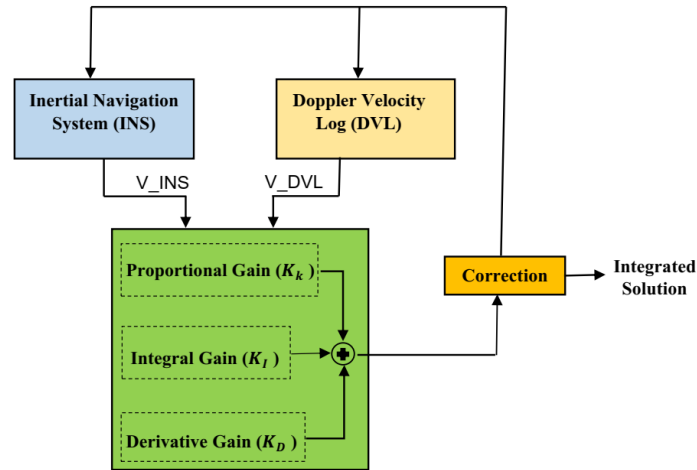


Figure 1. Schematic of the proposed PI-based data fusion algorithm for INS/DVL integration

### 3. Validation

The performance of the proposed algorithm was evaluated through extensive simulations reflecting realistic underwater conditions. As illustrated in Figure 2, the test scenarios included trajectory tracking under nominal conditions, the presence of DVL bias drift, random measurement noise, and abrupt sensor outages of varying duration. For benchmarking, the PI-based method was compared against the conventional KF-based method under identical conditions. The validation procedure was designed to assess accuracy, stability, and responsiveness under both nominal and degraded sensor performance.

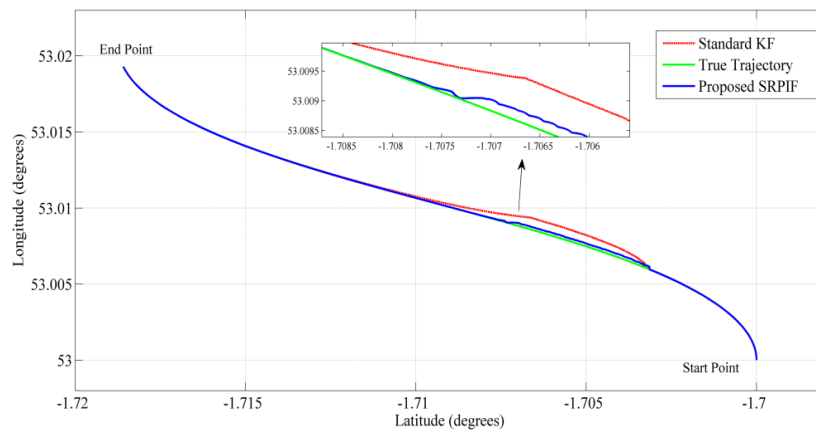


Figure 2. Simulation setup for INS/DVL integrated system under disturbance and sensor outage scenarios

### 4. Results

Simulation results demonstrate that the PI-based fusion approach consistently outperforms the conventional KF-based method. As shown in Figure 3, the proposed method achieves lower attitude error and faster error convergence compared with the conventional KF-based approach. Furthermore, the recovery capability following DVL signal loss is highlighted in position error in Figure 4, where the PI-based algorithm exhibits superior

robustness and quicker stabilization after sensor outage. These improvements are obtained without increasing computational cost, confirming the practicality of the method for real-time applications.

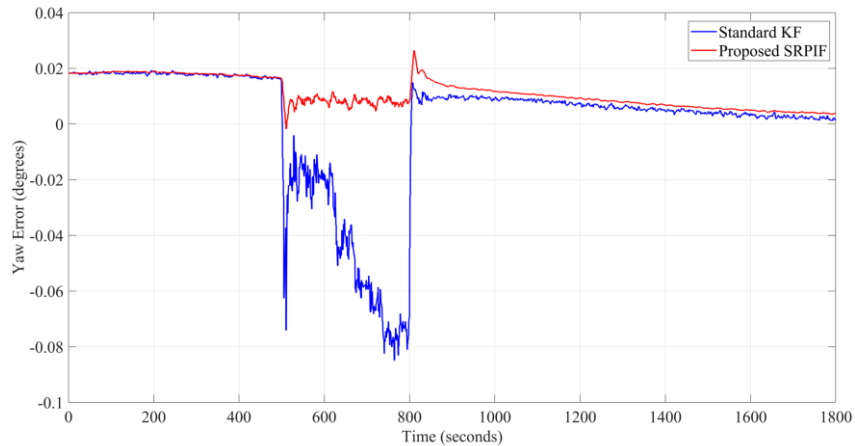


Figure 3. Comparison of attitude error (yaw error) between the proposed PI-based method the conventional KF-based method

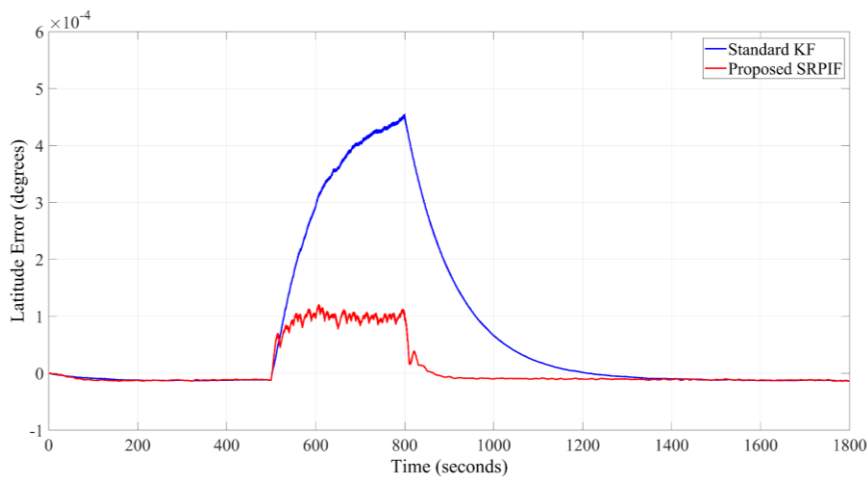


Figure 4. Comparison of position error between the proposed PI-based method and the conventional KF-based method

## 5. Conclusion

This study presents a robust and computationally efficient PI-based data fusion algorithm for INS/DVL integration in underwater navigation systems. By bridging concepts from control theory and statistical estimation, the method enhances resilience against uncertainties that challenge traditional Kalman filtering. The promising results obtained in simulation highlight its potential for real-world applications in autonomous marine vehicles, offering both accuracy and robustness under unpredictable operating conditions.



## طراحی الگوریتم تلفیق داده مقاوم برای یک سیستم موقعیت یاب مستقل زیرسطحی DVL در حضور عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری INS/DVL

محمدعلی رهگشای الف\*، محمد انصاری ب

الف استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون، ایران، [m.rahgoshai@kazerunsfu.ac.ir](mailto:m.rahgoshai@kazerunsfu.ac.ir)  
ب دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق مخابرات، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، ایران، [en.mohammad.ansaari@gmail.com](mailto:en.mohammad.ansaari@gmail.com)

واژگان کلیدی	چکیده
تلفیق داده، سیستم‌های ناوبری اینرسی، سرعت سنج داپلری.	نیاز روزافزون به روش‌های تلفیق داده‌ای که بتوانند در برابر خطاها و عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری‌ها پایدار مانده و در عین حال از پیچیدگی محاسباتی بالایی برخوردار نباشند، جایگاه ویژه‌ای برای طراحی تخمین‌گرهای مقاوم در سیستم‌های ناوبری دریایی ایجاد کرده است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از اصول کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی و ادغام آن‌ها با ساختار فیلتر کالمن استاندارد، یک روش تلفیق مقاوم برای سیستم ناوبری INS/DVL پیشنهاد می‌شود که هدف آن افزایش تحمل‌پذیری نسبت به نامعینی‌های موجود در اندازه‌گیری‌های سرعت‌سنج داپلری است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های سیستم ناوبری نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم پیشنهادی، دقت و سرعت همگرایی تخمین در فیلتر را به‌طور چشمگیری بهبود می‌دهد و در سناریوهای شامل خطا یا نویز در داده‌های DVL، نسبت به ساختار تلفیقی مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد عملکرد قلیل‌اتکاتری ارائه می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای سیستم‌های ناوبری دریایی در محیط‌های عملیاتی واقعی باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰	

### ۱- مقدمه

سیستم‌های موقعیت‌یابی (ناوبری) را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی و بر اساس تکنیک بکار رفته در آن‌ها جهت استخراج موقعیت وسیله به دو دسته اصلی و مهم تقسیم کرد: سیستم‌های مبتنی بر تکنیک محاسبه مرده<sup>۱</sup> (DR) و سیستم‌های مبتنی بر تکنیک موقعیت ثابت<sup>۲</sup> (PF) [۱]. سیستم‌های مبتنی بر تکنیک محاسبه مرده بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط حسگرهای نصب شده بر روی وسیله که وظیفه اندازه‌گیری حرکات خطی و دورانی وسیله را بر عهده دارند و انجام یک سری عملیات‌های محاسباتی به تعیین موقعیت، سرعت و وضعیت وسیله می‌پردازند. از سوی دیگر، سیستم‌های مبتنی بر روش‌های موقعیت ثابت بر اساس رد و بدل سیگنال با یک یا چند سیستم مرجع و آگاهی از اطلاعات موقعیتی آن سیستم‌ها به محاسبه موقعیت وسیله می‌پردازند. در حالت کلی سیستم‌های مبتنی بر تکنیک محاسبه مرده دارای دقت کوتاه‌مدت مناسبی هستند اگرچه دقت بلندمدت آن‌ها با گذشت زمان همواره به طرز محسوسی کاهش پیدا می‌کند. در طرف دیگر سیستم‌های موقعیت‌یابی مبتنی بر روش موقعیت ثابت دارای دقت کوتاه‌مدت نویزی و نامناسبی هستند ولی در بلندمدت دچار خطای افزایشنده نمی‌شوند و دقت مناسبی دارند.

<sup>1</sup> Dead-reckoning (DR)

<sup>2</sup> Position Fixing (PF)

جهت بهره‌مندی هم‌زمان از مزایا و پوشش معایب دو تکنیک فوق‌الذکر، از سیستم‌های ناوبری تلفیقی یا یکپارچه استفاده می‌شود. در سیستم‌های ناوبری تلفیقی، حداقل به‌طور هم‌زمان از یک سیستم ناوبری بر اساس تکنیک محاسبه مرده و یک سیستم مبتنی بر تکنیک موقعیت ثابت استفاده می‌گردد که منجر به ارائه یک پاسخ دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌شود [۲] و به همین دلیل استفاده از سیستم‌های تلفیقی در زمینه‌های مختلف دارای کاربرد است. به‌عنوان شناخته‌شده‌ترین سیستم ناوبری مبتنی بر تکنیک محاسبه مرده، سیستم ناوبری اینرسی<sup>۱</sup> (INS) معمولاً از اطلاعات خارجی یک یا چند سیستم مبتنی بر روش موقعیت ثابت به‌عنوان حسگر کمکی استفاده می‌کند. از پرکاربردترین سیستم‌های ناوبری تلفیقی در کاربردهای دریایی و زیرسطحی می‌توان به سیستم INS/DVL اشاره نمود که در آن از سیستم سرعت‌سنج داپلری<sup>۲</sup> (DVL) به‌عنوان سنسور (سیستم) کمکی استفاده می‌شود [۳، ۴]. در واقع سرعت‌سنج‌های داپلری با استفاده از یک مکانیزم فعال و انتشار موج در یک فرکانس خاص به اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت در دستگاه بدنی<sup>۳</sup> می‌پردازند. با توجه به اینکه DVL ها ذاتاً دارای خطای افزایشنده با زمان نیستند، از این سیستم‌ها به‌عنوان یک سیستم کمکی در تلفیق با سیستم‌های ناوبری اینرسی دریایی به‌فوق استفاده می‌شود. از دیگر مزایای مهمی که سبب استفاده فراوان سیستم INS/DVL در کاربردهای زیرسطحی شده است آن است که استفاده از اطلاعات سنسورهای موقعیت‌یاب ماهواره‌ای به دلیل عدم رسوخ سیگنال در آب، میسر نمی‌باشد و نمی‌توان از این سنسور برای کاربردهای زیرسطحی استفاده نمود [۵].

یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک سیستم ناوبری یکپارچه، تخمین‌گر بهینه حالت است که خطاهای سیستم ناوبری را در مراحل هم‌سوسازی اولیه و ناوبری تخمین می‌زند. عملکرد یک سیستم ناوبری تلفیقی مستقیماً تحت تأثیر تکنیک‌های تخمین بهینه حالت مورداستفاده در طرح تلفیق قرار می‌گیرد. فیلتر کالمن<sup>۴</sup> (KF) یکی از مهم‌ترین تخمین‌گرهای بهینه حالت است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی و صنعتی از جمله سیستم‌های ناوبری یکپارچه مورداستفاده قرار می‌گیرد [۶]. در کنار مزایای مهم تخمین‌گر مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد، یک عیب مهم در استفاده از این تخمین‌گر وجود دارد که آن عدم داشتن خاصیت مقاوم بودن است. در واقع برای دستیابی به یک راه‌حل بهینه در فیلتر کالمن استاندارد، تعیین مدل‌های مناسب برای سیستم اصلی و نویزهای تصادفی یک عامل کلیدی محسوب می‌گردد [۷]. در یک سیستم ناوبری تلفیقی، مدل سیستم تقریباً قطعی و مشخص است. این در حالی است که، تعیین یک مدل مناسب برای نویزهای تصادفی فرآیند<sup>۵</sup> و اندازه‌گیری که بر اساس انتخاب دو ماتریس کورایانس خطای نویز فرآیند<sup>۶</sup> ( $Q$ ) و ماتریس کورایانس خطای نویز اندازه‌گیری<sup>۷</sup> ( $R$ ) است، به یک مسئله چالش‌برانگیز تبدیل می‌شود.

یک مدل مناسب برای ماتریس  $Q$  معمولاً با توجه به مشخصات حسگرهای اینرسی ژيروسکوپ و شتاب‌سنج که در یک سیستم ناوبری اینرسی استفاده می‌شوند و همچنین حرکت دینامیکی اسمی که وسیله نقلیه تجربه می‌کند به دست می‌آید. این در حالی است که در سیستم‌های ناوبری تلفیقی، مدل‌سازی ماتریس  $R$  به سادگی ماتریس  $Q$  نیست. در واقع، خروجی سیستم مبتنی بر تکنیک موقعیت ثابت که به‌عنوان بردار اندازه‌گیری در تخمین‌گر استفاده می‌شود، می‌تواند توسط چندین منبع، دارای خطای غیرقابل پیش‌بینی شود، که این امر می‌تواند عملکرد سیستم یکپارچه را به طرز چشمگیری کاهش دهد. سیستم‌های ناوبری INS/DVL نیز از این قاعده مستثنی نیستند و سرعت‌سنج‌های داپلری معمولاً دارای خطاهایی نظیر خطای باپاس، خطای نصب، نویز محیطی و... می‌باشند که فرآیند کلی تلفیق داده را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. واضح است که در حضور این دسته از خطاها تنظیم یک مقدار ثابت برای ماتریس  $R$  ممکن است به یک راه‌حل بهینه برای سیستم یکپارچه منجر نشود.

در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای از روش‌های پیشرفته برای افزایش دقت و پایداری سیستم‌های تلفیق INS/DVL معرفی شده‌اند که عمدتاً بر پایه فیلترهای مقاوم، تطبیقی و مبتنی بر مدل‌های آماری غیرگوسی توسعه یافته‌اند. برای نمونه، در [۸] از یک چارچوب M-estimation برای افزایش مقاومت INS/DVL در برابر خطاهای غیرعادی استفاده شده است. در [۹] یک رویکرد

<sup>1</sup> Inertial Navigation System (INS)

<sup>2</sup> Doppler Velocity Log (DVL)

<sup>3</sup> Body Frame

<sup>4</sup> Kalman Filter

<sup>5</sup> Process Noise

<sup>6</sup> Process Noise Covariance Matrix

<sup>7</sup> Measurement Noise Covariance Matrix

مبتنی بر گروه‌های لی و توزیع Student-t ارائه کرده‌اند که به صورت ویژه در برابر نویزهای سنگین و اندازه‌گیری‌های آلوده مقاوم است. همچنین در [۱۰] روش تخمین حالت با تحریک رویداد محور را معرفی کرده‌اند که پایداری دینامیک را در سناریوهای نویز هم‌بسته بهبود می‌دهد. با وجود دقت مناسب این روش‌ها، اکثر آن‌ها به مدل‌سازی پیچیده، تنظیم تطبیقی پارامترهای چندگانه یا محاسبات سنگین نیاز دارند. همین چالش باعث شده است که توسعه یک روش مقاوم و درعین حال ساده و مناسب برای پیاده‌سازی آنلاین، همچنان یک نیاز مهم در ادبیات INS/DVL باشد.

ترکیب تئوری کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) و فیلتر کالمن استاندارد اخیراً در برخی تحقیقات حوزه موقعیت‌یابی به صورت کلی ارائه شده است [۱۱-۱۴]. ایده کلی ترکیب تئوری فیلتر کالمن و کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی این است که علاوه بر اندازه‌گیری زمان حال، از اندازه‌گیری‌های گذشته و پیش‌بینی آینده برای تخمین بردار حالت فعلی استفاده شود که می‌تواند سبب ایجاد عملکرد مطلوب‌تری در مقایسه با فیلتر کالمن استاندارد شود [۱۵]. در [۱۶، ۱۷] از یک فیلتر تناسبی-انتگرالی-مشتقی تعمیم‌یافته برای اولین بار در مسئله همسوسازی اولیه سیستم‌های ناوبری اینرسی استفاده شد. فرآیند همسوسازی اولیه با فرض ایستابودن یا شبه‌ایستابودن وسیله بدون استفاده از هیچ‌گونه اندازه‌گیری کمکی خارجی انجام می‌شود. این فرآیند معمولاً از اندازه‌گیری‌های بردارهای سرعت چرخش و گرانش زمین در دستگاه‌های مختصات مختلف استفاده می‌کند که خالص هستند و هیچ‌گونه عدم قطعیتی در آن‌ها وجود ندارد. بنابراین، مدل‌سازی ماتریس  $Q$  بسیار مهم‌تر از مدل‌سازی  $R$  در فرآیند همسوسازی اولیه است.

در این پژوهش با بهره‌گیری از رویکردی متفاوت نسبت به مطالعات هم‌راستا با موضوع همسوسازی اولیه، تلاش شده است از دیدگاه تازه‌ای به ترکیب کنترل‌کننده‌های PID با تخمین‌گرهای فیلتر کالمن نگاه شود و این ایده در فاز ناوبری یک سیستم تلفیقی INS/DVL به کار گرفته شود. در مرحله ناوبری، برخلاف فاز همسوسازی اولیه، عدم قطعیت موجود در داده‌های حسگرهای کمکی تأثیر قابل توجهی بر کارایی تخمین‌گر دارد و توصیف دقیق ماتریس کوواریانس خطاهای اندازه‌گیری  $R$  یکی از عوامل تعیین‌کننده عملکرد سیستم محسوب می‌شود. هرگونه خطا در مدل‌سازی این ماتریس در شرایطی که داده‌های کمکی با نامعینی همراه‌اند، می‌تواند موجب افت محسوس دقت و پایداری سیستم ناوبری یکپارچه گردد.

در این راستا، یک طرح تلفیق داده مقاوم بر اساس فیلتر تعمیم‌یافته تناسبی-انتگرالی-مشتقی<sup>۱</sup> (GPID) به عنوان تخمین‌گر بهینه حالت برای یک سیستم موقعیت‌یابی مستقل زیرسطحی INS/DVL پیشنهاد شده است. با توجه به ویژگی مقاوم‌بودن رویکرد پیشنهادی، عملکرد سیستم یکپارچه در حضور عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری سیستم DVL در مقایسه با طرح یکپارچه‌سازی مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد به میزان زیادی بهبود یافته است. در مقایسه با روش‌های اخیر که عموماً مبتنی بر فیلترهای مقاوم و تطبیقی با ساختارهای پیچیده و مدل‌سازی‌های غیرخطی هستند، پژوهش حاضر یک ساختار جدید، ساده و تحلیلی ارائه می‌دهد که تعادلی میان مقاومت و پیچیدگی محاسباتی برقرار می‌کند.

نخستین نوآوری این مقاله توسعه یک ساختار GPID مبتنی بر معیار حداقل میانگین مربعات خطا (MMSE) در فاز ناوبری INS/DVL است. ساختار پیشنهادی برخلاف تحقیقات پیشین، بهره‌تناسبی را به صورت بهینه از رابطه کلاسیک کالمن استخراج می‌کند و سپس ترم‌های انتگرالی و مشتقی را به صورت تحلیلی و کنترل‌شده به آن می‌افزاید. نوآوری دوم معرفی یک نسخه ساده و مقاوم با نام SRPIF است که تنها با دو پارامتر ثابت و بدون نیاز به مدل‌سازی نویز غیرگوسی، تنظیم تطبیقی، یا قوانین پیچیده کنترل، مقاومت قابل توجهی در برابر خطاهای DVL ایجاد می‌کند. درنهایت، پژوهش یک تحلیل ریاضی رسمی از مقاومت این ساختار ارائه می‌دهد که در مطالعات اخیر INS/DVL مشاهده نشده است. این ویژگی‌ها سبب می‌شود روش پیشنهادی در مقایسه با فیلترهای مقاوم جدید، از نظر سادگی محاسباتی و قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های واقعی مزیت قابل توجهی داشته باشد.

با انجام یک پروسه شبیه‌سازی جامع مبتنی بر تولید داده برای یک سیستم ناوبری تلفیقی INS/DVL، کارایی و قابلیت روش پیشنهادی نشان داده شده و با طرح تلفیق مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد مقایسه می‌شود که بیانگر برتری در عملکرد روش

<sup>1</sup> Generalized Proportional-Integral-Derivative (GPID)

تلفیق پیشنهادی نسبت به روش تلفیق مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد است.

ساختار مقاله به صورت مرحله به مرحله تنظیم شده است تا مسیر توسعه روش پیشنهادی به روشنی دنبال شود. ابتدا در بخش دوم، مدل‌های دینامیکی و روابط اندازه‌گیری که مبنای فرآیند تلفیق قرار گرفته‌اند تشریح می‌شوند. بخش سوم به تبیین چارچوب کلی فیلتر GPID و نحوه به کارگیری آن در یک سیستم تلفیقی اختصاص دارد. در بخش چهارم، نسخه‌ای ساده شده و مقاوم از این فیلتر با عنوان SRPIF معرفی شده و رفتار آن در مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های حسگر کمکی مورد تحلیل و اثبات قرار می‌گیرد. در پایان، بخش پنجم نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های سیستم را ارائه می‌کند و عملکرد روش پیشنهادی را در سناریوهای مختلف ارزیابی می‌نماید.

## ۲- مدل سازی دینامیک خطا و اندازه‌گیری در سیستم INS/DVL

در این مقاله، از یک مدل دینامیک خطای ۹ حالتی برای سیستم ناوبری تلفیقی INS/DVL استفاده شده است. در اکثر کاربردهای ناوبری بر روی کره زمین، مدل ساده شده ۹ حالتی بدون ایجاد خطای قابل توجهی استفاده می‌شود. این مدل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱]:

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gw_p(t) \quad (1)$$

$$x = [\delta\varphi_{3 \times 1}^n \quad \delta v_{3 \times 1}^n \quad \delta p_{3 \times 1}^n]^T \quad (2)$$

که در آن بردارهای خطای وضعیت، سرعت و موقعیت در دستگاه مختصات جغرافیایی شرق-شمال-بالا<sup>۱</sup> (ENU) به ترتیب به صورت معادلات (۳) الی (۵) می‌باشند:

$$\delta\varphi^n = [\delta\varphi_E \quad \delta\varphi_N \quad \delta\varphi_U]^T \quad (3)$$

$$\delta v^n = [\delta v_E \quad \delta v_N \quad \delta v_U]^T \quad (4)$$

$$\delta p^n = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h]^T \quad (5)$$

همچنین بردار نویز فرآیند به صورت زیر است:

$$w_p = [\delta\omega^n \quad \delta a^n]^T \quad (6)$$

$$\delta\omega^n = [\delta\omega_E \quad \delta\omega_N \quad \delta\omega_U]^T \quad (7)$$

$$\delta a^n = [\delta a_E \quad \delta a_N \quad \delta a_U]^T \quad (8)$$

معادلات (۷) و (۸) به ترتیب نمایانگر مشخصات تصادفی حسگرهای ژيروسکوپ و شتاب‌سنج بکار رفته در سیستم INS/DVL در دستگاه مختصات جغرافیایی ENU است.

همچنین ماتریس‌های F و G به ترتیب ماتریس دینامیک خطای سیستم و ماتریس نویز فرآیند هستند که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$F = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & F_{\varphi v} & 0_{3 \times 3} \\ F_{v\varphi} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & F_{pv} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G = \begin{bmatrix} -I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

در معادله (۹) سه درایه  $F_{\varphi v}$ ،  $F_{v\varphi}$  و  $F_{pv}$  ماتریس‌هایی با ابعاد ۳ در ۳ هستند که به ترتیب دینامیک خطای سرعت مربوط به بخش خطای وضعیت، دینامیک خطای وضعیت مربوط به بخش خطای سرعت و دینامیک خطای موقعیت مربوط به بخش

<sup>1</sup> East-North-Up (ENU)

خطای سرعت می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F_{\varphi v} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(R_M + h)} & 0 \\ -\frac{1}{(R_N + h)} & 0 & 0 \\ -\frac{\tan L}{(R_N + h)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_{v\varphi} = \begin{bmatrix} 0 & f_U & -f_N \\ -f_U & 0 & f_E \\ f_N & -f_E & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$F_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(R_M + h)} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{(R_N + h)\cos L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

در معادلات فوق  $L$  و  $h$  به ترتیب عرض و ارتفاع جغرافیایی،  $R_M$  و  $R_N$  فاصله‌های شعاعی در مدل کره زمین،  $f_U$  و  $f_E$ ،  $f_N$  به ترتیب شتاب‌های وارده بر وسیله در سه راستای شمالی، شرقی و قائم دستگاه مختصات جغرافیایی می‌باشند.

در سیستم INS/DVL، تخمین گر اختلاف بین خروجی سرعت محاسبه‌شده در سیستم INS و اندازه‌گیری‌های سرعت DVL در دستگاه ناوبری را به‌عنوان بردار اندازه‌گیری در نظر می‌گیرد. مدل اندازه‌گیری مورد استفاده در تخمین گر را می‌توان به صورت معادلات زیر بیان کرد:

$$z(t) = [v_{INS} - v_{DVL}] = Cx(t) + w_m(t) \quad (14)$$

که در آن ماتریس  $C$  به صورت زیر است:

$$C = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}] \quad (15)$$

همچنین  $w_m$  بردار نویز اندازه‌گیری می‌باشد.

مشابه بسیاری از کاربردهای دیگر، معمولاً در طرح ادغام INS/DVL، شکل گسسته مدل حالت استفاده می‌شود. فرم زمان گسسته معادلات (۱) الی (۱۵) به صورت زیر بیان می‌شود:

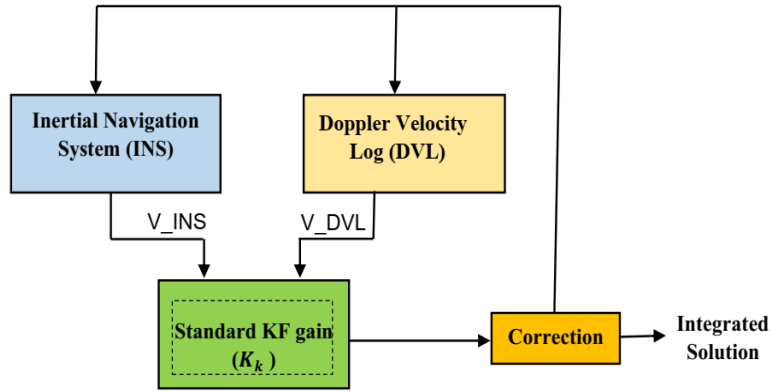
$$x(k+1) = Ax(k) + w_p(k) \quad (16)$$

$$y(k) = Hx(k) + w_m(k) \quad (17)$$

که در آن  $x(k)$  و  $y(k)$  بردارهای حالت و اندازه‌گیری سیستم هستند. همچنین ماتریس‌های  $A$  و  $H$  به ترتیب نمایش‌های گسسته ماتریس‌های  $F$  و  $C$  می‌باشند. بردارهای  $w_p$  و  $w_m$  نیز به بردارهای خطای فرآیند و اندازه‌گیری هستند که به‌عنوان یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و ماتریس‌های کوواریانس خطای  $Q$  و  $R$  در نظر گرفته می‌شوند.

### ۳- طرح تلفیق پیشنهادی بر اساس ترکیب تئوری کنترل کننده PID و فیلتر کالمن

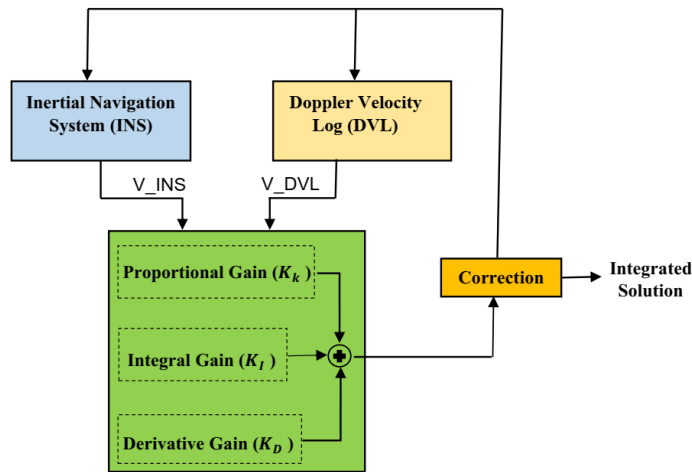
در این قسمت اصول و طرح کلی ایده تلفیق پیشنهادی در این مقاله به تفصیل ارائه می‌گردد. بلوک دیاگرام اجزای اصلی یک سیستم ناوبری INS/DVL بر اساس طرح تلفیق به‌وسیله KF استاندارد در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی تلفیق داده مبتنی بر تخمین گر فیلتر کالمن استاندارد در یک سیستم INS/DVL

بر اساس بلوک دیاگرام شکل (۱)، از اختلاف سرعت محاسبه شده توسط سیستم INS و اندازه‌گیری‌های سرعت DVL به‌عنوان بردار اندازه‌گیری در تخمین گر فیلتر کالمن استاندارد استفاده می‌شود. در هر چرخه، تخمین گر فیلتر کالمن استاندارد یک بهره بهینه را محاسبه می‌کند و خطاهای سیستم ناوبری تلفیقی را بر اساس آن تخمین می‌زند. در نهایت، خطاهای تخمین زده شده به سیستم بازخورد داده می‌شوند و پاسخ بهینه به دست می‌آید.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، فیلتر کالمن استاندارد به‌شدت به مدل‌های فرآیند و اندازه‌گیری وابسته است. همین امر ما را برانگیخت که یک طرح تلفیق داده مقاوم بر اساس ترکیب تئوری کنترل PID و تخمین گر KF پیشنهاد کنیم. بلوک کلی اجزای طرح ادغام پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ بلوک دیاگرام طرح تلفیق داده پیشنهادی GPIDF در یک سیستم INS/DVL

همان‌طور که از مقایسه شکل‌های (۱) و (۲) مشخص است، برخلاف طرح تلفیق مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد، طرح پیشنهادی از دو بخش اضافی (بخش‌های انتگرالی و مشتقی) در بلوک تخمین گر خود استفاده می‌کند. در واقع طرح پیشنهادی مبتنی بر فیلتر GPIDF معادل با طرح ادغام مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد است هنگامی که ترم‌های انتگرالی و مشتقی بر روی صفر تنظیم شوند.

بر اساس دینامیک خطا و مدل‌های اندازه‌گیری تلفیق INS/DVL که در معادلات (۱) تا (۱۷) توضیح داده شده است، معادلات تخمین گر GPIDF را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۱۶]:

$$\hat{x}(0|0) = \bar{x}_0 \quad (18)$$

$$x_1(0) = 0 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}(0) - \tilde{y}(-1) &= 0 & (20) \\ \tilde{y}(k) &= y(k) - H\hat{x}(k|k) & (21) \\ \hat{x}(k|k-1) &= A\hat{x}(k-1|k-1) & (22) \\ r(k) &= y(k) - H\hat{x}(k|k-1) & (23) \\ x_p(k) &= K_p(k)r(k) & (24) \\ x_I(k) &= x_I(k-1) + K_I(k)\tilde{y}(k-1) & (25) \\ x_D(k) &= K_D(k)(\tilde{y}(k-1) - \tilde{y}(k-2)) & (26) \\ \hat{x}(k|k) &= \hat{x}(k|k-1) + x_p(k) + x_I(k) + x_D(k) & (27) \end{aligned}$$

که  $K_p$ ،  $K_I$  و  $K_D$  نشان‌دهنده بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی است که به ترتیب در محاسبه ترم‌های  $x_p$ ،  $x_I$  و  $x_D$  استفاده می‌شوند.

به‌سادگی می‌توان نشان داد که وقتی بهره‌های انتگرالی و مشتقی در ساختار فوق برابر با صفر قرار داده شوند، ساختار پیشنهادی GPIDF به یک فیلتر کالمن استاندارد تبدیل می‌شود و درواقع فیلتر کالمن استاندارد یک نسخه خاص از ساختار کلی فیلتر GPIDF است.

جهت برقراری بهینگی در ساختار پیشنهادی GPIDF برای سیستم‌های ناوبری تلفیقی، باید ترم‌های  $K_p$ ،  $K_I$  و  $K_D$  در هر گام زمانی به‌صورت بهینه محاسبه شوند. فرمول‌های مربوط به محاسبه بهینه ترم تناسبی  $K_p$  بر اساس معیار حداقل مربعات خطا در تخمین‌گرهای کالمن استاندارد استخراج شده است. در ساختار پیشنهادی GPIDF، بهینه‌سازی و محاسبه ترم‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی نیز بر اساس معیار حداقل میانگین مربع خطا (MMSE) به دست می‌آید. درواقع باید در هر گام محاسباتی معادله زیر برای بهره‌های فیلتر پیشنهادی برقرار باشد تا بتوان ادعا کرد که پاسخ سیستم یک پاسخ بهینه است زیرا از معیار حداقل مربعات خطا پیروی می‌کند [۱۶]:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{NN^T}(k) & \Lambda_{NM^T}(k) & \Lambda_{NU^T}(k) \\ \Lambda_{NM^T}(k) & \Lambda_{MM^T}(k) & \Lambda_{MU^T}(k) \\ \Lambda_{NU^T}(k) & \Lambda_{MU^T}(k) & \Lambda_{UU^T}(k) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} K_p(k)^T \\ K_I(k)^T \\ K_D(k)^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Lambda_{LN^T}(k)^T \\ \Lambda_{LM^T}(k)^T \\ \Lambda_{LU^T}(k)^T \end{bmatrix} = 0 \quad (28)$$

در معادله فوق،  $\Lambda_{ij^T}(k) = \mathbb{E}\{i(k)j(k)^T\}$ ،  $L(k)$ ،  $M(k)$  و  $N(k)$  را می‌توان بر اساس شرایط آماری نویزهای شتاب‌سنج وژیروسکوپ و همچنین مشخصات آماری نویز DVL برای یک سیستم به‌خصوص به دست آورد و معادله فوق در هر گام زمانی جهت محاسبه بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی استفاده می‌شود.

#### ۴- طرح تلفیق پیشنهادی مبتنی بر فیلتر SRPIF

همان‌طور که در قسمت قبل مشاهده شد، جهت پیاده‌سازی عملی یک تخمین‌گر بر مبنای ایده GPIDF نیاز است تا پردازش‌گر سیستم ناوبری INS/DVL در هر نمونه از نرخ کاری سیستم (معمولاً ۱۰۰ هرتز یا ۲۰۰ هرتز) معیار حداقل مربعات خطا و فرمول مورد نظر را جهت برقراری و محاسبه بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی بررسی کند. این امر سبب ایجاد بار محاسباتی و تأخیر احتمالی و ایجاد خطای تخمین می‌شود.

در این بخش جهت بهبود عملکرد تخمین‌گر مبتنی بر ایده پیشنهادی، یک تخمین‌گر با ساختار ساده و درعین حال مقاوم ارائه می‌شود.

بر اساس معادلات (۱۸) تا (۲۷)، یک فیلتر PID بهبودیافته با ساختار محاسباتی ساده را پیشنهاد کرده‌ایم که دارای خاصیت مقاوم بودن مطلوب و بار محاسباتی کم برای پیاده‌سازی آنلاین است. معادلات SRPIF به شرح زیر است:

$$P(0|0) = P_0 \quad (29)$$

$$P(k|k-1) = A P(k-1|k-1) A^T + W(k-1) \quad (30)$$

$$K_P(k) = P(k|k-1) H^T (H P(k|k-1) H^T + R(k))^{-1} \quad (۳۱)$$

$$K_I(k) = k_i * K_P(k) \quad (۳۲)$$

$$K_D(k) = k_d * K_P(k) \quad (۳۳)$$

$$P(k|k) = (I - K_P(k)H)P(k|k-1) \quad (۳۴)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + x_p(k) + x_I(k) + x_D(k) \quad (۳۵)$$

همان‌طور که در معادلات فوق مشخص است گین تناسبی  $K_P$  در هر مرحله بر اساس فرمول بهینگی در کالمن فیلتر استاندارد به دست می‌آید. پس از محاسبه بهره تناسبی، جهت سادگی و رعایت اصل بهینگی، بهره‌های انتگرالی و مشتقی تنها به صورت مضربی از  $K_P$  در هر مرحله در نظر گرفته می‌شود. در معادلات (۳۲) و (۳۳)،  $k_i$  و  $k_d$  ثابت‌های انتگرال و مشتق هستند که جهت محاسبه گین‌های انتگرالی و مشتقی استفاده می‌شود. همچنین ترم‌های  $x_p$ ،  $x_I$  و  $x_D$  به ترتیب با معادلات (۲۴) تا (۲۶) تعیین می‌شوند.

در ساختار پیشنهادی، بهره تناسبی  $K_P$  تنها مؤلفه‌ای است که مستقیماً از رابطه بهینگی فیلتر کالمن و بر اساس معیار MMSE محاسبه می‌شود. برای جلوگیری از تغییر جهت بردار بهره بهینه و حفظ ساختار اصلی فیلتر، بهره‌های انتگرالی و مشتقی به صورت ضریبی از این بهره انتخاب شده‌اند. این فرمول‌بندی باعث می‌شود که مؤلفه‌های انتگرالی و مشتقی تخمین‌گر بدون برهم‌زدن جهت بردار بهره بهینه، صرفاً شدت اثر خود را تنظیم کنند و ساختار بهینگی فیلتر حفظ شود.

شایان ذکر است که در نسخه عملیاتی فیلتر پیشنهادی SRPIF، ترم مشتقی به دلیل حساسیت ذاتی به نویز و احتمال ایجاد نوسان در حضور خطاهای اندازه‌گیری DVL و سنسورهای اینرسی، برابر صفر در نظر گرفته شده است. در فاز نوبری سیستم‌های INS/DVL، نویز سرعت و شتاب معمولاً نسبت به سایر کاربردها بزرگ‌تر است و استفاده از ترم مشتقی می‌تواند موجب تقویت این نویزها گردد. بنابراین، نسخه ساده‌تر شامل ترم‌های تناسبی و انتگرالی انتخاب شده که ضمن حفظ پایداری و مقاومت، بار محاسباتی را کاهش داده و برای پیاده‌سازی عملی مناسب‌تر است. ساختار کامل GPID در بخش قبل صرفاً برای ارائه چارچوب کلی نظری ذکر شده و نسخه SRPIF فرم کاربری و مقاوم آن را ارائه می‌دهد.

#### ۴-۱- تجزیه و تحلیل مقاومت طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF

در حضور بخش انتگرال‌گیر به‌کاررفته در تخمین‌گر SRPIF، طرح تلفیق پیشنهادی یک راه‌حل مقاوم ارائه می‌دهد که با موفقیت اثر نامطلوب عدم قطعیت‌ها و خطاهای اندازه‌گیری سرعت DVL را بر روی سیستم نوبری یکپارچه کاهش می‌دهد. برای نشان دادن اثربخشی طرح پیشنهادی، در این بخش تحلیل مقاومت برای طرح تخمین‌گر پیشنهادی SRPIF ارائه می‌شود. همان‌طور که قبلاً در مقدمه ذکر شد، چالش اصلی در یک سیستم نوبری یکپارچه، شناسایی یا حذف اثر خطاهای نویز اندازه‌گیری سنسورهای کمکی بر عملکرد سیستم است. مشخصات نویز فرآیند فقط مربوط به حسگرهای اینرسی مورد استفاده در سیستم INS است و می‌توان آن را با یک سری از تست‌های آزمایشگاهی از پیش تعیین کرد. بنابراین، بدون از دست دادن کلیت، معادلات فضای حالت (۱۶) تا (۱۷) را بدون بردار نویز فرآیند در نظر می‌گیریم:

$$x(k+1) = Ax(k) \quad (۳۶)$$

$$y(k) = Hx(k) + w_m(k) \quad (۳۷)$$

بر اساس معادلات (۲۹) تا (۳۵)، برآوردگر یک مرحله‌ای را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\hat{x}(k+1|k+1) = A\hat{x}(k|k) + K_P(y(k) - H\hat{x}(k|k)) + x_I(k) \quad (۳۸)$$

بر اساس معادله (۲۵) دینامیک  $x_I(k)$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$x_I(k+1) = x_I(k) + K_I(k)(y(k) - H\hat{x}(k|k)) \quad (۳۹)$$

با تعریف خطای تخمین به صورت  $e(k) = x(k) - \hat{x}(k|k)$  داریم:

$$e(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1|k+1) \quad (۴۰)$$

دینامیک خطای تخمین با جایگزینی معادلات (۳۶) و (۳۸) در معادله (۴۰) به صورت زیر دست می‌آید:

$$\begin{aligned} e(k+1) &= Ax(k) - A\hat{x}(k|k) - K_p Hx(k) \\ &+ K_p H\hat{x}(k|k) - K_p w_m(k) - x_1(k) \\ &= (A - K_p H)e(k) - K_p w_m(k) - x_1(k) \end{aligned} \quad (41)$$

بردار اغتشاش  $d(k)$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$d(k) = -K_p w_m(k) - x_1(k) \quad (42)$$

بنابراین، معادله دینامیک خطا را می توان به فرم زیر نوشت:

$$e(k+1) = (A - K_p H)e(k) + d(k) \quad (43)$$

همچنین معادله دینامیکی  $d(k)$  را می توان با استفاده از معادلات (۴۱) و (۳۹) به صورت زیر نیز نوشت:

$$d(k+1) = -K_p w_m(k+1) - x_1(k+1) = -K_p w_m(k+1) - x_1(k) - K_I C e(k) \quad (44)$$

با جمع و تفریق مقدار  $-K_p w_m(k)$  به رابطه (۴۳) رابطه زیر به دست می آید:

$$d(k+1) = d(k) - K_p (w_m(k+1) - w_m(k)) - K_I C e(k) \quad (45)$$

با توجه به معادلات (۴۳) و (۴۵) دینامیک بردار خطای اضافه شده<sup>۱</sup> را می توان به فرم زیر بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A - K_p H) & I_{9 \times 9} \\ -K_I C & I_{9 \times 9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{9 \times 9} \\ -K_p (w_m(k+1) - w_m(k)) \end{bmatrix} \quad (46)$$

در یک سیستم INS، سنسورهای ژيروسکوپها و شتابسنجها ذاتاً اندازه گیری های خروجی خود را با نرخ بالا (۱۰۰ هرتز یا بالاتر) در دسترس قرار می دهند. این در حالی است که سنسورهای کمکی که جهت استفاده در الگوریتم های تلفیق با سیستم INS مورد استفاده قرار می گیرند دارای نرخ خروجی کمتری (۱ هرتز) می باشند [۱۸]. بر اساس این ایده واقع بینانه، تفاوت ناچیزی بین دو خروجی متوالی سنسورهای اینرسی وجود دارد. بنابراین، معادله (۴۶) را می توان به صورت تقریبی در نظر گرفت:

$$\begin{bmatrix} e(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} (A - K_p C) & I_{9 \times 9} \\ -K_I C & I_{9 \times 9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ d(k) \end{bmatrix} \quad (46)$$

طبق رابطه (۴۶)، اگر مقادیر  $K_p$  و  $K_I$  به طور مناسب انتخاب شوند، می توان مقادیر ویژه ماتریس  $\begin{bmatrix} (A - K_p C) & I_{9 \times 9} \\ -K_I C & I_{9 \times 9} \end{bmatrix}$  را بگونه ای جایابی نمود که تمامی آن ها دارای مقدار حقیقی منفی باشند و در نتیجه ماتریس تبدیل به یک ماتریس پایدار مجانبی گردد. بنابراین با توجه به رابطه (۴۶) بردار دینامیک خطا با هر شرط اولیه ای به ازای  $k \rightarrow \infty$  به صورت مجانبی به سمت صفر میل می کند. با توجه به رابطه (۴۲)، تمایل  $d(k)$  به سمت صفر به این معنی است که قسمت انتگرالی تخمین گر،  $x_1(k)$  اثر نامطلوب بردار  $-K_p w_m(k)$  را حذف می کند.

## ۵- شبیه سازی سیستمی و نتایج

در این قسمت برای ارزیابی عملکرد طرح یکپارچه سازی پیشنهادی، یک شبیه سازی جامع برای یک سیستم ناوبری تلفیقی INS/DVL انجام شده است. علاوه بر عدم دسترسی به یک سیستم ناوبری INS/DVL عملیاتی جهت انجام تست ها، برای دستکاری آسان اندازه گیری های سرعت در سیستم DVL و ایجاد خطای تعمدی در فواصل زمانی خاص، انجام تست ها بوسیله شبیه سازی در محیط نرم افزار MATLAB صورت پذیرفته است. در این مقاله از مدل ریاضی بیان شده در [۱۹] برای تولید داده سنسورهای شتابسنج و ژيروسکوپ IMU استفاده شده است که چهار نوع سناریو مختلف حرکتی به صورت مسیر ثابت، خط مستقیم، دایره و S شکل را توسعه می دهد.

سیستم های ناوبری اینرسی بر اساس دقت و عملکرد خود به درجه های مختلفی تقسیم می شوند که ارتباط مستقیمی با مشخصات خطای سنسورهای اینرسی بکار رفته در آن دارد. در این شبیه سازی فرض شده است که از یک سیستم با درجه

<sup>۱</sup> Augmented Error Vector

تاکتیکی استفاده شده است. مشخصات خطای سنسورهای اینرسی بکارگرفته شده در INS و همچنین خطای سرعت DVL که به اندازه‌گیری‌های ایده‌آل تولید شده اضافه شده‌اند به صورت جدول (۱) است:

جدول ۱ مشخصات خطای سنسورهای اینرسی بکارگرفته شده در INS و خطای سرعت DVL

Gyro constant errors	0.01 deg / hr
Gyro random errors	0.001 deg / $\sqrt{hr}$
Accelerometer constant errors	$\pm 50 \mu g$
Accelerometer random errors	0.03 $m/s/\sqrt{hr}$
DVL velocity bias	0.05 m/s
DVL velocity random noise	0.2 m/s

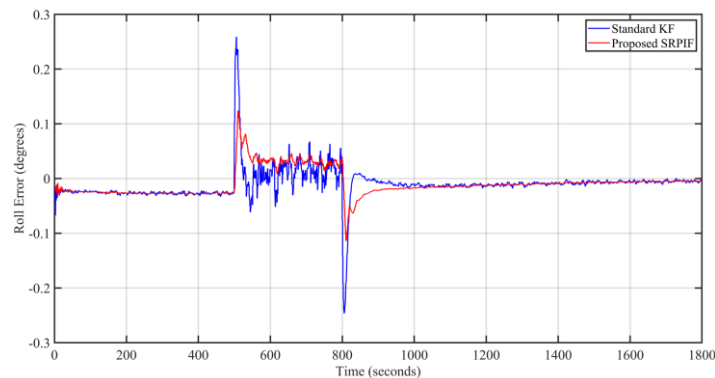
پس از تولید داده‌های سیستم، طرح‌های یکپارچه‌سازی بر اساس فیلتر کالمن استاندارد و فیلتر PID تعمیم‌یافته پیشنهادی به‌طور جداگانه ارزیابی می‌شوند.

برای ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی، اندازه‌گیری سرعت DVL به‌صورت عامدانه در یک بازه زمانی خاص از آزمایش شبیه‌سازی دارای خطای نامتعرفی می‌شود. سناریوی مسیر حرکتی شناور در این تست، مسیر S شکل در نظر گرفته شده است که داده‌های مدنظر برای این مانور خاص توسط شبیه‌سازی تولید شده است. کل زمان شبیه‌سازی ۳۰ دقیقه (۱۸۰۰ ثانیه) در نظر گرفته شده است و فرض شده است که اندازه‌گیری‌های DVL توسط برخی منابع خطا در بازه زمانی ۵۰۰ تا ۸۰۰ ثانیه به مدت پنج دقیقه خراب شده است. در بازه ایجاد خطا، اندازه‌گیری‌های سرعت مطابق جدول (۲) دستکاری شده است.

جدول ۲ مشخصات خطای سنسور DVL

DVL velocity bias	0.2 m/s
DVL velocity random noise	0.5 m/s

شبیه‌سازی سیستمی برای طرح تلفیق مبتنی بر تخمین‌گر فیلتر کالمن استاندارد و همچنین طرح پیشنهادی تلفیق داده مقاوم SRPIF انجام شده و نتایج هر دو روش با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج آزمون شبیه‌سازی برای خطاهای زوایای وضعیت در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی زوایای وضعیتی، مشخص می‌شود که تخمین‌گر فیلتر کالمن استاندارد در حضور خطای سرعت DVL، به ویژه در زاویه سمت<sup>۱</sup>، تخمین مناسبی به‌خصوص پس از بروز خطا به دست نمی‌دهد این در حالی است که روش پیشنهادی خطاهای وضعیتی را در فاصله زمانی که خطای اندازه‌گیری سنسور DVL رخ می‌دهد، نزدیک به صفر نگه می‌دارد. از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی می‌تواند در سیستم‌های شمالیاب مبتنی بر سنسورهای ژيروسکوپ (ژایروکامپس<sup>۲</sup> دریایی) که تضمین وضعیت زاویه‌ای دقیق یک مسئله حیاتی است، استفاده شود.

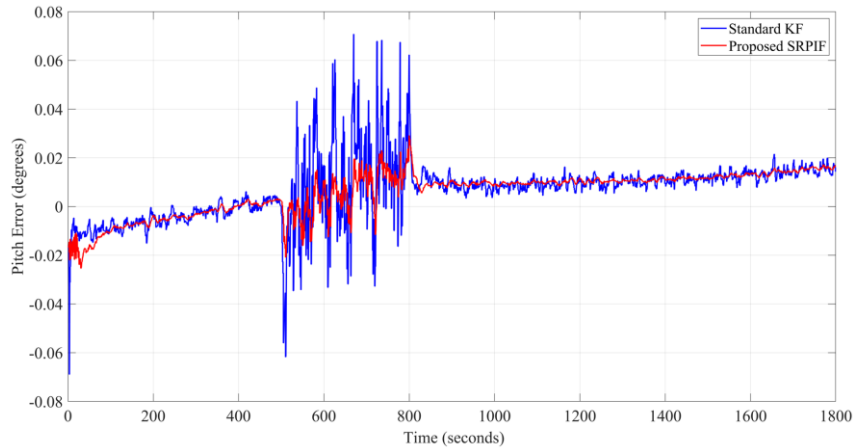


شکل ۳ خطای زاویه رول<sup>۳</sup> محاسبه‌شده در طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF

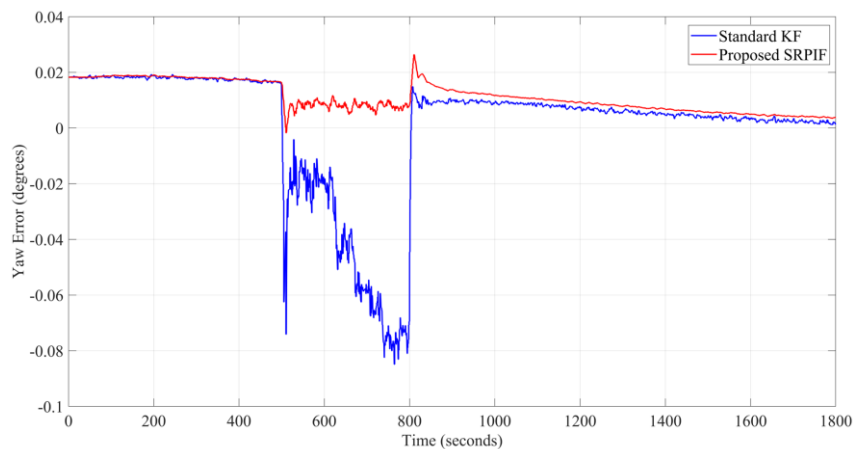
<sup>۱</sup> Heading

<sup>۲</sup> Gyro-compass

<sup>۳</sup> Roll



شکل ۴ خطای زاویه پیچ<sup>۱</sup> محاسبه شده در طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF



شکل ۵ خطای زاویه سمت محاسبه شده در طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF

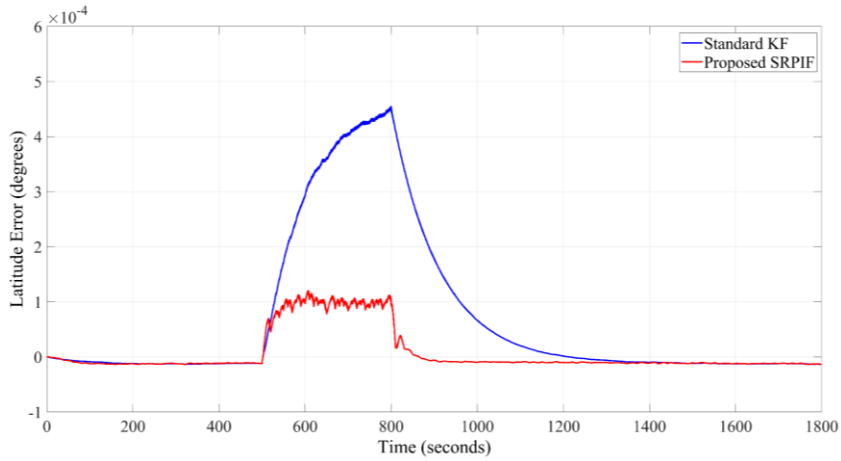
همچنین در جدول زیر خطای زوایای وضعیتی رول، پیچ و سمت در دو طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح پیشنهادی SRPIF بر اساس معیار حداقل مربعات خطا در بازه بروز خطای سنسور DVL نشان داده شده است:

جدول ۳ خطای زوایای محاسبه شده برای دو طرح فیلتر کالمن استاندارد و طرح پیشنهادی SRPIF بر اساس معیار حداقل مربعات

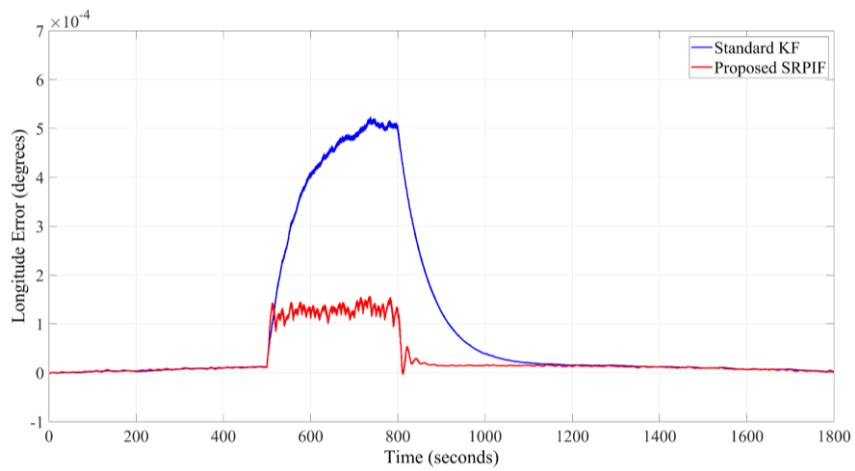
Integration Method	Roll (RMS)	Pitch (RMS)	Yaw (RMS)
Standard KF	0.0565	0.0783	0.0638
Proposed SRPIF	0.0176	0.0388	0.0141

نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای طول و عرض به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. مسیر کلی طی شده در صفحه دوبعدی طول و عرض جغرافیایی نیز به صورت جداگانه در شکل (۸) برای فیلتر کالمن استاندارد و روش پیشنهادی با توجه به مسیر ایده‌آل نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که موقعیت‌یابی توسط روش تلفیق پیشنهادی راه‌حل دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را در مواجهه با خطاهای اندازه‌گیری سیستم کمکی DVL نسبت به روش مرسوم فیلتر کالمن استاندارد ارائه می‌کند. بر اساس تئوری کنترل PID، اضافه کردن ثابت انتگرال در طرح پیشنهادی مستقیماً بر خاصیت مقاومت تلفیق داده سیستم تأثیر مثبت می‌گذارد. در حالت کلی می‌توان با تنظیم‌های مختلف ثابت‌های انتگرالی و مشتقی، سرعت و دقت سیستم را مطابق با انتظارات مورد نظر و کاربرد خاص بهینه کرد عملکرد قابل قبولی را برای یک سیستم ناوبری اینرسی تلفیقی با مشخصات به خصوص به دست آورد.

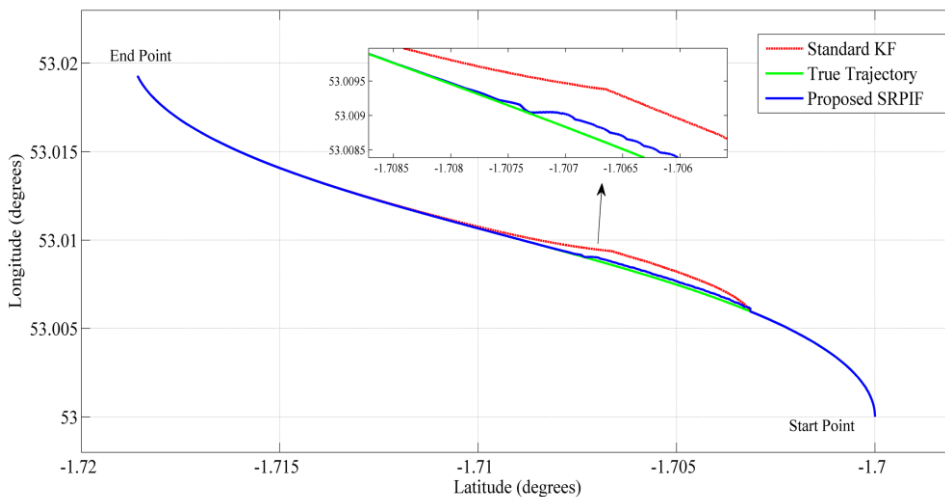
<sup>۱</sup> Pitch



شکل ۶ خطای طول جغرافیایی محاسبه‌شده در طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF



شکل ۷ خطای عرض جغرافیایی محاسبه‌شده در طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF



شکل ۸ مسیر دوبعدی محاسبه‌شده در طرح تلفیق فیلتر کالمن استاندارد و طرح تلفیق پیشنهادی SRPIF

## ۴- نتیجه‌گیری

در سامانه‌های ناوبری تلفیقی، عملکرد فیلتر کالمن استاندارد به‌طور چشمگیری به صحت مدل‌سازی و کیفیت داده‌های

حسگرهای کمکی وابسته است و هرگونه اختلال یا خطا در این داده‌ها می‌تواند سبب افت چشمگیر دقت تخمین شود. در این پژوهش، رویکردی مقاوم و درعین حال دارای ساختاری ساده معرفی شد که با الهام از ساختار کنترل‌کننده‌های PID و ادغام آن با فیلتر کالمن، امکان مقابله با خطاهای اندازه‌گیری DVL را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با وجود سادگی پیاده‌سازی، توانایی بالایی در کاهش اثرات نامطلوب نامعینی‌های موجود در داده‌های سرعت‌سنج داپلری داشته و نسبت به رویکرد استاندارد فیلتر کالمن، دقت و پایداری بهتری در شرایط بروز خطا ارائه می‌دهد. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی می‌تواند گزینه‌ای کارآمد برای ارتقای قابلیت اطمینان ناوبری در سیستم‌های INS/DVL در محیط‌های عملیاتی باشد.

## Authorship Contribution Statement

**Dr. Mohammad Ali  
Rahgoshay**



**Biography:** Received M.Sc. and Ph.D. degrees in control engineering from Shiraz University of Technology and Shiraz University, Shiraz, Iran, in 2013 and 2019, respectively. He has been an Assistant Professor with the Electrical and Electronics Engineering Department of Salman University of Kazerun, Fars, Iran. His current research interests include inertial navigation systems, data fusion, state estimation theory and nonlinear robust control.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

**Mohammad Ansari**



**Biography:** Received Ph.D. degrees in communication engineering from Islamic Azad University, Kazerun Branch in 2025. His current research interests include sensor fusion and state estimation theory.

**Contribution Statement:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

## ۷- مراجع

- [1] Noureldin A, Karamat TB, Georgy J. Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration: Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] El-Sheimy N, Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: State of the art and future trends. *Satellite Navigation*. 2020;1:2.
- [3] Hou L, Xu X, Yao Y, Wang D. An M-estimation-based improved interacting multiple model for INS/DVL navigation method. *IEEE Sensors Journal*. 2022;22:13375-86.
- [4] Li S, Zhao Y, Chen Y, Ben Y, Wang Z. A Novel GPS-Aided Robust Calibration Method for SINS/DVL Integrated Navigation System. *IEEE Sensors Journal*. 2025.
- [5] Hosseini SM, Jalili M, Meighani Nejad A. Design and construction of INS/GPS navigation system based on adaptive Kalman filter algorithm. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;3:537-59.
- [6] Chui CK, Chen G. Kalman filter: An elementary approach. *Kalman Filtering: with Real-Time Applications*: Springer; 2017. 19-31.
- [7] Simon D. Kalman filtering, embedded systems programming. *Embedded com article*. 2001.

- [8] Chen Y, He Y, Zhao Y, Li S, Yao W, Kayacan E. Seamless INS/DVL integrated navigation system via online transfer Gaussian process regression. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024.
- [9] Du S, Zhu F, Wang Z, Huang Y, Zhang Y. A novel lie group framework-based student's t robust filter and its application to INS/DVL tightly integrated navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024;73:1-21.
- [10] Ma X, Wei Z, Liu W, Wang S. Event-Triggered State Filter Estimation for INS/DVL Integrated Navigation with Correlated Noise and Outliers. *Sensors*. 2025;25:1545.
- [11] Farhangian F, Landry Jr R. Accuracy improvement of attitude determination systems using EKF-based error prediction filter and PI controller. *Sensors*. 2020;20:4055.
- [12] Rahgoshay MA, Karimaghaie P. Robust in-field estimation and calibration approach for strapdown inertial navigation systems accelerometers bias acting on the vertical channel. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2020;14:407-14.
- [13] Mallahi Kolahi P, nazemizadeh M, safari H. Position and Speed Control of the Tractor-Trailer Robot by Considering the Dynamics of the Tractor Wheels Using the PID Controller. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2023;3:53-66.
- [14] Farhadi S, Sanjari Sarmad M. Design and weight optimization of a manned hybrid octocopter. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;4:425-48.
- [15] Setoodeh P, Habibi S, Haykin S. Kalman filter. 2022.
- [16] Rahgoshay MA, Karimaghaie P, Shabaninia F. Robust inertial frame-based alignment of fiber-optic gyro strapdown inertial navigation systems using a generalized proportional–integral–derivative filter. *Optical Engineering*. 2017;56:095102.
- [17] Rahgoshay MA, Karimaghaie P, Shabaninia F. Initial alignment of fiber-optic inertial navigation system with large misalignment angles based on generalized proportional-integral-derivative filter. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2017;10:613.
- [18] Aggarwal P, Syed Z, El-Sheimy N. *MEMS-based integrated navigation*: Artech House, 2010.
- [19] Zhang W, Ghogho M, Yuan B. Mathematical model and matlab simulation of strapdown inertial navigation system. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2012;2012:264537.