Supreme National Defense University Defense Logistics and Technology

https://amfad.sndu.ac.ir E-ISSN: 2980-8073

Vol. 9, No. 3, Issue. 31, Autumn 2026 **Received:** 2025/01/05 **Accepted:** 2025/05/08

Research paper

Optimal Parameter Estimation in Inertial Navigation Systems and INS/GPS Integration Using an Enhanced Kalman Filter

Jasem Jamali
Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran (Corresponding Author).
Mohammad Hossein Fatehi Dindarloo
Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
Mohammad Ali Rahgoshai
Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
Omid Mahdiyar
Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
Mohammad Ansari
PhD Candidate in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran

Abstract

This study aims to propose a novel approach for optimizing integrated inertial navigation and Global Positioning System (GPS) systems to reduce computational errors and improve system accuracy under complex environmental conditions. The main focus of the study is the strategic integration of generalized proportional–integral–derivative (PID) controllers with a standard Kalman filter, providing a simple and efficient framework for addressing challenges arising from measurement noise and signal disturbances. The study is based on detailed simulations conducted in MATLAB. The simulation data were used to evaluate system performance across a broad range of realistic environments, including densely urban areas, dense forests, and challenging maritime conditions. The designed experiments, based on two different configurations, demonstrated that incorporating integral and derivative terms into the Kalman filter structure reduces estimation errors, improves system stability, and substantially enhances the accuracy of integrated navigation systems. The proposed approach not only has potential applications in autonomous vehicles, robotic systems, and aerial and maritime navigation, but also provides a foundation for further research and development in the field of integrated navigation systems.

Keywords: Kalman Filter; Inertial Navigation System; Proportional–Integral–Derivative Filter; Integrated Navigation Technologies; INS/GPS Integration

سال نهم، شماره سوم (پیاپی ۳۱)، پاییز ۱۴۰۵، صص. ۲۳۹-۲۷۰
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶ ـ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸

مقاله پژوهشی

تخمین بهینه پارامترها در سیستم‌های ناوبری اینرسی و تلفیق INS/GPS با استفاده از فیلتر کالمن بهبودیافته

جاسم جمالی
استادیار گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران (نویسنده مسئول)
Email: jasemjamali55@gmail.com
محمد حسین فاتحی دیندارلو؛ محمدعلی رهگشای؛ امید مهدیار
استادیار گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
محمد انصاری
دانشجوی دکتری برق، گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران

چکیده

این مقاله با هدف ارائه رویکردی نوین برای بهینه‌سازی سیستم‌های ناوبری تلفیقی اینرسی و موقعیت‌یاب جهانی تدوین شده است که در راستای کاهش خطاهای محاسباتی و ارتقای دقت عملکرد این سیستم‌ها در شرایط محیطی پیچیده شکل گرفته است. محور اصلی پژوهش بر ترکیب راهبردی کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی تعمیم‌یافته با فیلتر کالمن استاندارد است؛ ترکیبی که قابلیت مقابله با چالش‌های ناشی از نویز داده‌ها و اختلالات سیگنالی را با ارائه یک ساختار ساده و کارآمد به‌همراه دارد. این پژوهش مبتنی بر شبیه‌سازی‌های دقیق در نرم‌افزار MATLAB انجام شده و جامعه آماری آن، داده‌های شبیه‌سازی‌شده‌ای است که عملکرد سیستم‌ها را در طیف گسترده‌ای از محیط‌های واقعی، ازجمله مناطق شهری پُرتراکم، جنگل‌های انبوه و شرایط دریایی سخت، ارزیابی می‌کند. آزمایش‌های طراحی شده با بهره‌گیری از دو طرح متفاوت، نشان دادند که افزودن ترم‌های انتگرالی و مشتقی به ساختار فیلتر کالمن، منجر به کاهش خطاهای محاسباتی، بهبود پایداری و افزایش چشم‌گیر دقت سیستم‌های تلفیقی شده است. این روش نه‌تنها در کاربردهای عملی مانند خودروهای خودران، صنایع رباتیک، ناوبری هوایی و دریایی تحولی ایجاد کرده است، بلکه زمینه‌ای مناسب برای توسعه تحقیقات آینده در حوزه سیستم‌های تلفیقی فراهم می‌آورد.

کلیدواژه‌ها: فیلتر کالمن، سامانه ناوبری اینرسی، فیلتر تناسبی-انتگرالی-مشتقی، فناوری‌های ناوبری تلفیقی

20.1001.1.28212606.1405.9.3.7.3 https://amfad.sndu.ac.ir/ E-ISSN: 2980-8073

صحت مطالب بر عهده نویسنده مقاله است و بیانگر دیدگاه دانشگاه عالی دفاع ملی نیست.

مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینهٔ ناوبری ترکیبی با تمرکز بر «سامانه ناوبری اینرسی»[1] و «سامانه موقعیت‌یاب جهانی»[2] به‌طور قابل‌توجهی بهبودهایی در دقت، مقاومت و کاهش خطاهای ناوبری ارائه داده‌اند. تحقیقات متعددی انجام شده‌اند که به بررسی روش‌های تلفیق داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته مانند فیلتر کالمن استاندارد و روش‌های مبتنی بر ماهواره‌های «مدار پایین زمین»[3] (LEO) پرداخته‌اند. روش‌های موجود مانند فیلتر کالمن ساده و الگوریتم‌های مبتنی بر ماهواره‌های مدار پایین زمین به‌دلیل وابستگی به مدل‌های خطی و حساسیت به نویز و اختلالات محیطی، در شرایط پیچیده عملکرد مطلوبی ندارند. این تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از داده‌های می‌تواند جایگزینی قابل‌اعتماد برای محیط‌هایی باشد که سیگنال‌های «سامانه موقعیت‌یاب جهانی»[4] (GPS) محدود یا غیرقابل دسترس هستند. روش‌هایی مانند همسوسازی اولیه و تکنیک‌های کالیبراسیون آنلاین در ناوبری ترکیبی توانسته‌اند دقت ناوبری را حتی در محیط‌های پیچیده افزایش دهند. فناوری‌های تلفیقی باید بتوانند با مقاومت بالا و دقت قابل‌توجه، خطاهای محیطی و نویزهای ناشی از سنسورهای کمکی را کاهش دهند (رهگشای و همکاران، ۲۰۱۷). سیستم‌های ناوبری مدرن بر پایه ترکیب داده‌های موقعیت‌یابی از منابع مختلف و الگوریتم‌های مقاوم طراحی شده‌اند. به‌عنوان مثال، ترکیب روش‌های مبتنی بر ماهواره‌های مدار پایین زمین با فیلتر کالمن پیشرفته، امکان افزایش دقت در تخمین موقعیت در شرایط نامطلوب را فراهم کرده است (ژو و همکاران، ۲۰۲۵). سیستم‌های تلفیقی موجود همچنان محدودیت‌هایی دارند، وابستگی شدید آن‌ها به‌دقت مدل‌های سنسورهای اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی منجر به عملکرد پایین در مواجهه با اختلالات محیطی می‌شود. علاوه بر این، روش‌های موجود معمولاً نیازمند الگوریتم‌های پیچیده و هزینه‌های سنگین برای پیاده‌سازی عملی هستند. بسیاری از تحقیقات با تمرکز بر کاهش خطاهای موقعیت‌یابی و افزایش مقاومت سیستم‌ها در برابر نویز، هنوز نتوانسته‌اند به

1. Inertial Navigation System (INS)
2. Global Positioning System (GPS)
3. Low Earth Orbit (LEO)
4. Global Positioning System (GPS)

راه‌حل‌های ساده و کم‌هزینه برسند. تحقیق انجام شده با ارائه یک رویکرد تلفیقی جدید، سعی در پر کردن شکاف بین وضع مطلوب و وضع موجود دارد. این رویکرد مبتنی بر ترکیب «کنترل‌کننده‌های تناسبی–انتگرالی–مشتقی تعمیم‌یافته» (GPID) و فیلتر کالمن استاندارد است. نوآوری‌های این تحقیق شامل افزودن بخش‌های انتگرالی و مشتقی به الگوریتم تلفیق، کاهش خطاهای اندازه‌گیری و ارائه ساختاری ساده و مقاوم برای پیاده‌سازی عملی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دقیق نشان داده‌اند که این روش در شرایط پیچیده محیطی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مرسوم دارد. همچنین، قابلیت پیاده‌سازی آنلاین و بار محاسباتی کم این الگوریتم امکان توسعه در سیستم‌های ناوبری خودران، دریایی و هوایی را فراهم کرده است (چن و لی، ۲۰۲۳).

افزایش دقت سیستم‌های ناوبری تلفیقی: این تحقیق با ارائه یک روش نوین، دقت در تعیین موقعیت و وضعیت را بهبود می‌بخشد که برای کاربردهای حیاتی مانند هواپیماها و خودروهای خودران بسیار اهمیت دارد.

تقویت قابلیت اطمینان سیستم‌ها: روش پیشنهادی با کاهش خطاهای ناشی از نویز و اختلالات سیگنال سامانه موقعیت‌یاب جهانی، عملکردی پایدارتر و قابل اطمینان‌تر ارائه می‌دهد.

کاهش هزینه‌های عملیاتی: با کاهش نیاز به سیستم‌های پیچیده‌تر یا پرهزینه، این روش می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجه در هزینه‌ها شود.

توسعه دانش در حوزه ناوبری: ترکیب اصول کنترل‌کننده‌های پیشرفته و فیلتر کالمن، دستاوردهای جدیدی در بهبود الگوریتم‌های ناوبری تلفیقی ارائه می‌دهد.

کاربرد در محیط‌های چالش‌برانگیز: این روش توانایی عملکرد مطلوب حتی در شرایط محیطی سخت مانند جنگل‌های متراکم یا مناطق دریایی را دارد.

ضرورت پژوهش:

- ❖ پایداری کم‌تر بدون این روش: نبود این تحقیق می‌تواند منجر به ضعف سیستم‌های ناوبری در شرایط محیطی چالش‌برانگیز و اختلالات سامانه موقعیت‌یاب جهانی شود.

- ❖ هزینه‌های بالای ناشی از خطا: دقت پایین در سیستم‌های ناوبری می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و خطرات ناشی از خطاها را افزایش دهد.
- ❖ عدم پاسخ‌گویی به نیازهای صنعتی: در نبود این تحقیق، صنایع حساس مانند هواپیماها و زیردریایی‌ها ممکن است از راهکارهای مناسب و مقرون‌به‌صرفه محروم شوند.
- ❖ نقص در توسعه دانش: عدم انجام این پژوهش به معنای از دست دادن فرصت‌های مهم برای پیشرفت در حوزه الگوریتم‌های تلفیقی و ناوبری است.
- ❖ افزایش خطرات ایمنی: در صورت نبود دقت کافی، خطرات ایمنی در سیستم‌های حساس مانند خودروهای خودران و هواپیماها افزایش می‌یابد.

پرسش‌های اصلی و فرعی

پرسش اصلی

چگونه می‌توان با استفاده از ترکیب کنترل‌کننده تناسبی–انتگرالی–مشتقی تعمیم‌یافته و فیلتر کالمن استاندارد، دقت و پایداری سیستم‌های ناوبری تلفیقی اینرسی و موقعیت‌یاب جهانی را بهبود بخشید؟

پرسش‌های فرعی

- ❖ چگونه می‌توان دقت سامانه ناوبری تلفیقی را با استفاده از ترکیب کنترل‌کننده‌های تناسبی–انتگرالی–مشتقی تعمیم‌یافته و فیلتر کالمن افزایش داد؟
- ❖ این روش پیشنهادی چگونه می‌تواند خطاهای سنسوری ناشی از سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی و سیستم‌های ناوبری اینرسی را کاهش دهد؟
- ❖ چه تأثیری بر مقاومت سامانه ناوبری در برابر شرایط محیطی پیچیده مانند نویز و قطع سیگنال سامانه موقعیت‌یاب جهانی دارد؟
- ❖ چگونه طراحی ساختاری ساده این روش می‌تواند منجر به کاهش بار محاسباتی و تسهیل پیاده‌سازی عملی در سیستم‌های واقعی شود؟
- ❖ روش پیشنهادی در حفظ دقت و پایداری سامانه در شرایط محیطی چالش‌برانگیز،

مانند مناطق شهری متراکم یا جنگل‌های انبوه، چگونه عمل می‌کند؟

❖ این تحقیق چگونه می‌تواند الگوریتم‌های موجود را در سیستم‌های رباتیک، هواپیمایی و خودروهای خودران بهبود بخشد؟

۱. پیشینه پژوهش

جدول ۱: پیشینهٔ پژوهش

محل انتشار	اهداف و نتایج	روش‌شناسی	سال انتشار	نویسنده
مجله بین‌المللی مهندسی	هدف: افزایش دقت ناوبری؛ نتیجه: کاهش خطاهای موقعیت‌یابی	استفاده از فیلتر کالمن با اتصال محکم برای بهبود دقت ناوبری	۲۰۱۷	ولی زاده و حمیدی
مهندسی اپتیک	هدف: بهبود هم‌ترازی اولیه؛ نتیجه: کاهش خطاهای زاویه‌ای	استفاده از فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی تعمیم‌یافته برای هم‌ترازی اولیه سامانه ناوبری اینرسی	۲۰۱۷	رهگشای، کریم‌اقایی و شعبانی‌نیا
ناوبری ماهواره‌ای	هدف: تحلیل روندهای آینده؛ نتیجه: بهبود عملکرد حسگرهای اینرسی	بررسی فناوری حسگرهای اینرسی برای کاربردهای ناوبری	۲۰۲۰	الشیمی و یوسف
مجله بین‌المللی مهندسی	هدف: تخمین دقیق نویز؛ نتیجه: کاهش خطای میانگین مربعات	طراحی فیلتر کالمن تطبیقی مبتنی بر تخمین نویز بازگشتی برای کاهش نویز سامانه	۲۰۲۰	سید مصطفی حسینی، محمدرضا جلیلی
هوافضا	هدف: بهبود هم‌ترازی؛ نتیجه: افزایش دقت در شرایط پروازی	استفاده از واحد اندازه‌گیری اینرسی چرخشی و ماهواره‌های مدار پایین زمین برای هم‌ترازی سامانه ناوبری اینرسی در پرواز	۲۰۲۱	فرهَنگیان، بنزرروک و لندری
مهندسی اقیانوس	هدف: کاهش نویز سامانه؛ نتیجه: بهبود دقت ناوبری در	استفاده از فیلتر کالمن تطبیقی برای سامانه ناوبری اینرسی و مسافت‌سنج سرعت صوت	۲۰۲۳	وانگ، لئو و کائو

محل انتشار	اهداف و نتایج	روش‌شناسی	سال انتشار	نویسنده
	محیط‌های زیرآبی			
مجله علوم نوظهور	هدف: بهبود کنترل سرعت؛ نتیجه: افزایش دقت و پایداری سامانه	طراحی کنترل‌کننده هوشمند براساس مدل داده‌های طبقه‌بندی شده برای کنترل سرعت موتور القایی سه‌فاز	۲۰۲۳	مورالس، فابارا و پوزو

در این پژوهش، تحلیل جامعی از تلفیق داده‌های سامانه‌های ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی ارائه شده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ترکیب این دو فناوری می‌تواند بهبود قابل توجهی در دقت و پایداری سیستم‌های ناوبری ایجاد کند. بااین‌حال، شکاف‌های تحقیقاتی همچنان در زمینهٔ کاهش تأثیرات اختلالات محیطی و بهبود الگوریتم‌های پردازش داده وجود دارد. این تحقیق با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته ریاضی و شبیه‌سازی‌های دقیق، به بررسی الگوریتم‌های پیشنهادی پرداخته و توانایی آن‌ها را در مواجهه با چالش‌های واقعی ارزیابی شده است.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده توانمندی روش پیشنهادی در کاهش خطاهای موقعیت‌یابی و افزایش عملکرد کلی سامانه ناوبری در شرایط مختلف محیطی است. این تحقیق با ارائه چهارچوب‌های عملی و شبیه‌سازی دقیق، گامی مهم در جهت بهبود سامانه‌های ناوبری پیشرفته برداشته است.

۲. مفهوم‌شناسی

۲-۱. فیلتر کالمن (Kalman Filter)

فیلتر کالمن یک الگوریتم تخمین حالت بهینه برای سیستم‌های خطی است که با استفاده از مدل‌های سامانه و نویزهای اندازه‌گیری، حالت واقعی سامانه را تخمین می‌زند (نورالدین و همکاران، ۲۰۱۲).

۲-۲. «سامانه ناوبری اینرسی»[1] (INS)

سامانه ناوبری اینرسی با استفاده از سنسورهای ژیروسکوپ و شتاب‌سنج، حرکات و موقعیت وسیله نقلیه را اندازه‌گیری کرده و مسیر حرکت را محاسبه می‌کند. (الشیمی و یوسف، ۲۰۲۰)

۲-۳. «فیلتر تناسبی-انتگرالی-مشتقی»[2] (PID)

فیلتر تناسبی-انتگرالی-مشتقی یک کنترلر بازخوردی است که با استفاده از سه جزء تناسبی، انتگرالی و مشتقی، خطاها را تصحیح کرده و عملکرد سامانه را بهبود می‌بخشد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

۲-۴. سیستم‌های ناوبری تلفیقی

سیستم‌های ناوبری تلفیقی از ترکیب چند سامانه ناوبری مختلف برای بهبود دقت و عملکرد کلی استفاده می‌کنند، مانند تلفیق سامانه ناوبری اینرسی و (سامانه موقعیت‌یاب جهانی). (فرهنگیان و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۸۰).

۳. مبانی نظری پژوهش

در این پژوهش، ترکیب تئوری «کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی» (PID) و فیلتر کالمن به‌عنوان روش تلفیق داده‌ها در سیستم‌های ناوبری تلفیقی بررسی شده است. اساس این ترکیب، بهره‌مندی از مزایای هر دو روش برای بهبود دقت و پایداری سامانه در برابر خطاها و نامعینی‌های اندازه‌گیری است (چن و همکاران، ۲۰۲۴: ۵۴۹).

۳-۱. تئوری کنترل‌کننده‌های (تناسبی- انتگرالی- مشتقی)

کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) با استفاده از سه جزء تناسبی (P)، انتگرالی

1. Inertial Navigation System (INS)
2. Proportional-Integral-Derivative Filter - PID Filter

(I) و مشتقی (D) خطاهای سامانه را تصحیح می‌کنند. جزء تناسبی با توجه به خطای فعلی عمل می‌کند، جزء انتگرالی خطاهای گذشته را در نظر می‌گیرد و جزء مشتقی با توجه به تغییرات خطا در آینده عمل می‌کند. این ترکیب باعث می‌شود که سامانه بتواند به‌سرعت به خطاهای ورودی پاسخ دهد و هم‌زمان خطاهای بلندمدت را نیز اصلاح کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

۴. روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، از روش‌های متنوع کمّی بهره گرفته شده است تا تحلیل جامعی از مسائل مربوط به تلفیق داده‌های سیستم‌های ناوبری ترکیبی شامل سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی ارائه شود. این رویکرد، امکان دستیابی به نتایجی دقیق و معتبر را فراهم آورده و چهارچوب‌های مؤثر و کاربردی برای پیاده‌سازی عملی را ارائه کرده است. اساس اندازه‌گیری‌های سنسورهای اینرسی و شتاب سنج و ژیروسکوپ شتاب را در سه محور (X,Y,Z) اندازه‌گیری می‌کند. از داده‌های عددی حاصل از شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های آماری برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های تلفیقی استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات سنسورهای «اینرسی پلتفرم چرخان»[1] (IMU) و «سامانه موقعیت‌یاب جهانی»[2](GPS) بوده که در شرایط محیطی مختلف تحلیل شده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته و با بررسی پارامترهای عملکردی نظیر «خطای جمع مربعات»(RMS) دقت، پایداری و مقاومت سامانه تلفیقی در برابر اختلالات محیطی و نویز سیگنال‌ها ارزیابی شده‌اند. این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی‌های ریاضی دقیق و پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب امکان تحلیل و بهبود دقت و کاهش خطاها را فراهم کرده است. مراحل تحقیق و ساختار سامانه تلفیقی به‌طور عمیق مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل شامل شناسایی نقاط قوت و ضعف سیستم‌های موجود، شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی میان وضع مطلوب و وضع موجود و ارائه روش‌های نوین برای پر کردن این شکاف‌ها بوده است. همچنین، تأثیر الگوریتم پیشنهادی

1. Inertial Measurement Unit (IMU)
2. Global Positioning System (GPS)

بر عملکرد کلی سامانه ناوبری در شرایط پیچیده محیطی، نظیر مناطق شهری با ساختمان‌های بلند یا مناطق جنگلی با اختلالات سیگنالی، بررسی شده است. در این تحقیق، تلاش شده تا قابلیت‌های کاربردی روش پیشنهادی در صنایع حمل‌ونقل هوشمند، خودروهای خودران، ناوبری هوایی و دریایی و سامانه‌های نظامی تحلیل و ارزیابی شود. این رویکرد امکان ارائه نتایج دقیق، عملی را فراهم کرده است. داده‌های عددی حاصل از شبیه‌سازی به‌عنوان نمونه آماری برای تحلیل عملکرد الگوریتم تلفیقی استفاده شده‌اند و تحلیل‌ها نقاط ضعف و قوت روش‌های موجود را به‌طور مؤثری مشخص کرده‌اند. این تلفیق نه‌تنها به درک بهتر عملکرد روش پیشنهادی کمک کرده است، بلکه امکان به‌کارگیری آن در سیستم‌های ناوبری پیشرفته را نیز فراهم آورده است. این روش، با حفظ دقت و ارائه کاربردهای عملی، چهارچوبی مناسب برای توسعه زیرساخت‌های ناوبری پیشرفته ارائه کرده است.

۵. یافته‌های پژوهش و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

شبیه‌سازی‌های با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. خطاها را در سه حالت وضعیت، موقعیت و سرعت تحلیل کرده است. این شبیه‌سازی‌ها برای ارزیابی عملکرد سامانه ناوبری تلفیقی اینرسی[1] و سامانه موقعیت‌یاب جهانی[2] و مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های مرسوم مانند فیلتر کالمن استاندارد به انجام رسیده است. چهار نوع سناریوی مختلف به نام‌های مسیرهای ثابت، خط مستقیم، دایره‌ای و S شکل توسعه داده شده است تا عملکرد سامانه در شرایط مختلف محیطی بررسی شود. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش‌های آماری تحلیل شده‌اند. این تحلیل‌ها شامل محاسبه جمع مربعات خطاهای[3](RMS) برای وضعیت، سرعت و موقعیت وسیله نقلیه است.

خطاهای زوایای وضعیت در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. مقایسه خطاهای زوایای وضعیت بین فیلتر کالمن استاندارد و روش پیشنهادی نشان‌دهنده بهبود عملکرد روش

1. Inertial Navigation System (INS)
2. Global Positioning System (GPS)
3. Root Mean Square (RMS)

پیشنهادی در کاهش خطاها و افزایش دقت در این سامانه است.

۵-۱. نتایج خطاهای وضعیت

نتایج آزمون شبیه‌سازی برای خطاهای زوایای وضعیت در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج و خطاهای وضعیت محاسبه شده در جدول (۴)، مشخص می‌شود که تخمین‌گر استاندارد کالمن فیلتر در حضور خطای موقعیت و سرعت سامانه موقعیت‌یاب جهانی، به‌ویژه در زاویه سمت، تخمین مناسبی خصوصاً پس از بروز خطا تخمین نمی‌زند و با نرخ کندی همگرا می‌شود. روش پیشنهادی خطاهای وضعیت را در فاصله زمانی که خطای چندمسیری رخ می‌دهد، نزدیک به صفر نگه می‌دارد. از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی می‌تواند در سیستم‌های ژایروکامپس دریایی که تضمین وضعیت زاویه‌ای دقیق یک مسئله حیاتی است، استفاده شود.

۵-۲. نتایج خطاهای موقعیت

نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای طول، عرض جغرافیایی و ارتفاع به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. مسیر کل مسیر در صفحه دوبُعدی طول و عرض جغرافیایی نیز به‌صورت جداگانه در شکل (۹)، برای فیلتر کالمن استاندارد و روش پیشنهادی با توجه به مسیر ایدئال نشان داده شده است. مقایسه دقیق خطای موقعیت نیز در جدول (۵)، برای هر دو طرح ادغام ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نتایج موقعیت‌یابی روش پیشنهادی راه‌حل دقیق‌تر و قوی‌تری در پاسخ به خطای چندمسیری سامانه موقعیت‌یاب جهانی دارد.

براساس تئوری کنترل «تناسبی – انتگرالی – مشتقی»[1] (PID)، افزایش ثابت مشتق، می‌تواند منجر به بهبود سرعت و همچنین افزایش نوسانات در پاسخ شود. از طرف دیگر، ثابت انتگرال مستقیماً بر دقت پاسخ تأثیر می‌گذارد. هر چه ثابت انتگرال بیشتر باشد، خطای کمتری در پاسخ به دست می‌آید. تنظیم‌های مختلف ثابت‌های انتگرال و مشتق به‌طور مستقیم بر

1. Proportional-Integral-Derivative (PID)

عملکرد فیلتر پیشنهادی تأثیر می‌گذارد که در نوسان، سرعت و دقت حل منعکس می‌شود. با تنظیم مناسب ثابت‌های انتگرال و مشتق، می‌توان عملکرد فیلتر قابل قبولی را برای یک سامانه ناوبری اینرسی کمکی خاص به دست آورد. همان‌طور که از نتایج جدول (۴)، مشخص است، فیلتر تناسبی-انتگرالی-مشتقی پیشنهادی طرح ۲ در مقایسه با تناسبی-انتگرالی- مشتقی پیشنهادی طرح ۱، پاسخ نوسانی دقیق‌تری دارد.

۵-۳. نتایج خطاهای سرعت

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های بررسی شده در این تحقیق، خطاهای سرعت در سناریوی شبیه‌سازی شده دایره‌ای بوده است. در این آزمایش، مسیر حرکتی به‌صورت دایره‌ای برای بازهٔ زمانی یک ساعت (۳۶۰۰ ثانیه) طراحی شد و تأثیر خطاهای چندمسیری سامانه موقعیت‌یاب جهانی در بازهٔ زمانی ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ ثانیه به‌طور عمدی بررسی گردید. نمودارها و جداول مقایسه‌ای نتایج نشان می‌دهند که فیلتر کالمن استاندارد در مواجهه با خطاهای چندمسیری، به‌ویژه در بازهٔ زمانی اعمال خطا، عملکرد ضعیفی از خود نشان داده و نرخ هم‌گرایی آن کند بوده است. روش پیشنهادی که از فیلتر تناسبی-انتگرالی-مشتقی استفاده می‌کند، توانسته است با تنظیم دقیق ثابت‌های مشتقی و انتگرالی، این خطاها را در بازهٔ زمانی ایجاد خطا تقریباً به صفر برساند. نتایج به‌دست‌آمده تأیید می‌کند که روش پیشنهادی نه‌تنها در کاهش خطاهای سرعت کارآمد بوده، بلکه مقاومت بیشتری در برابر خطاهای حسگر نشان داده و دقت بالاتری در مقایسه با فیلترهای معمولی دارد. این روش می‌تواند به‌طور گسترده در سیستم‌های ناوبری پیشرفته مانند خودروهای خودران، پهپادها و سیستم‌های دریایی و هوایی مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۴. بهبود دقت سامانه ناوبری تلفیقی

در این پژوهش روش پیشنهادی توانسته است دقت «سامانه ناوبری تلفیقی اینرسی»[1] و

1. Inertial Navigation System (INS)

«سامانه موقعیت‌یاب جهانی»[1] را به‌طور چشم‌گیری بهبود ببخشد. برای مثال، (زمانی که داده‌های «سامانه ناوبری اینرسی»[2] (INS) و «سامانه موقعیت‌یاب جهانی»[3](GPS) تلفیق می‌شوند، سامانه پیشنهادی توانسته است خطاهای موقعیت- وضعیت را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این بهبود نشان‌دهنده پایداری الگوریتم پیشنهادی در شرایط مختلف است.

روش پیشنهادی به کاهش انحراف از مسیر واقعی در شرایط حرکتی پیچیده مانند شتاب‌گیری و توقف‌های ناگهانی کمک کرده است.

عملکرد سامانه در شرایطی که سیگنال موقعیت‌یاب جهانی دچار اختلال بود، همچنان توانسته موقعیت وسیله نقلیه را در راستای سه محور (XYZ) با دقت بالایی تخمین بزند.

۵-۵. مقاومت در برابر خطاهای محیطی

از دید کیفی، این سامانه توانسته است مقاومت خوبی در برابر خطاهای چند مسیری موقعیت‌یاب جهانی و داده‌های ناقص حاصل از سنسورهای اینرسی (ژیرسکوپ و شتاب سنج) نشان دهد. این ویژگی، الگوریتم پیشنهادی را برای استفاده در شرایط محیطی متغیر و چالش‌برانگیز مناسب کرده است. الگوریتم تلفیق توانسته اطلاعات ناوبری وسیله نقلیه را حتی در شرایطی که سیگنال «موقعیت‌یاب جهانی» (GPS) قطع شده یا دچار نویز شده بود، به‌خوبی بازیابی کند.

۵-۶. تطبیق‌پذیری در سناریوهای مختلف

عملکرد سامانه در شرایط حرکتی مختلف براساس داده‌های به دست آمده (مانند چرخش‌های سریع، تغییر مسیر، یا حرکت در مسیرهای پیچیده) قابل قبول بوده است. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند در خودروهای خودران یا سیستم‌های ناوبری هواپیماها کاربرد داشته باشد.

2. Global Positioning System (GPS)
3. Inertial Navigation System (INS)
4. Global Positioning System (GPS)

۵-۷. برتری در مقایسه با روش‌های معمول

این پژوهش همچنین نشان داده که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های معمول تلفیق داده‌ها، عملکردی بهینه‌تر و پایداری بیشتری ارائه داده است. در مقایسه با سایر روش‌ها، روش تلفیقی پیشنهادی توانسته تأثیر اختلالات محیطی بر داده‌های موقعیتی را کاهش داده و اطلاعات دقیق‌تری برای هدایت وسیله نقلیه فراهم کند. همچنین استفاده از روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب فیلتر کالمن و کنترل‌کننده (تناسبی-انتگرالی-مشتقی) باعث کاهش قابل‌توجه خطاهای موقعیت‌یابی شده است. این بهبود نشان می‌دهد که سامانه ناوبری تلفیقی دقت بیشتری در تخمین موقعیت وسیله نقلیه در شرایط مختلف محیطی ارائه می‌دهد.

۵-۸. مقاومت در برابر اختلالات سیگنال: سامانه موقعیت‌یاب جهانی

الگوریتم پیشنهادی توانسته است عملکرد مقاومی در مواجهه با شرایط محیطی چالش‌برانگیز، ازجمله وقفه یا نویز در سیگنال سامانه موقعیت‌یاب جهانی، ارائه دهد. سامانه با استفاده از داده‌های اینرسی (IMU) توانسته است موقعیت وسیله نقلیه را حتی در زمان قطع سیگنال سامانه موقعیت‌یاب جهانی با دقت بالایی تخمین بزند.

۵-۹. پایداری در سناریوهای مختلف حرکتی

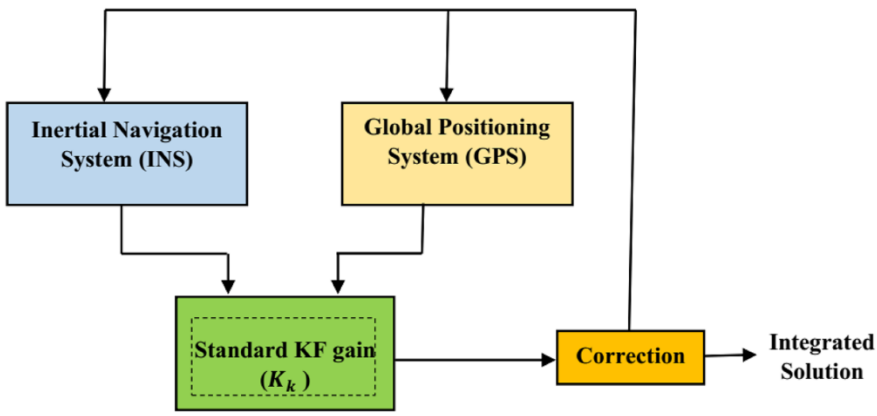
سامانه پیشنهادی در شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های میدانی در سناریوهای حرکتی متنوعی (مانند شتاب‌گیری، تغییر مسیر ناگهانی و توقف) عملکرد پایداری داشته است.

۵-۱۰. کارایی در شرایط محیطی پیچیده

روش پیشنهادی در محیط‌های شهری با موانع زیاد (مانند ساختمان‌های بلند) و محیط‌های باز (مانند جاده‌ها یا فضاهای باز طبیعی) توانسته است خطاهای چندمسیری سامانه موقعیت‌یاب جهانی را کاهش داده و دقت ناوبری را حفظ کند.

۵-۱۱. پیاده‌سازی آسان و بار محاسباتی کم

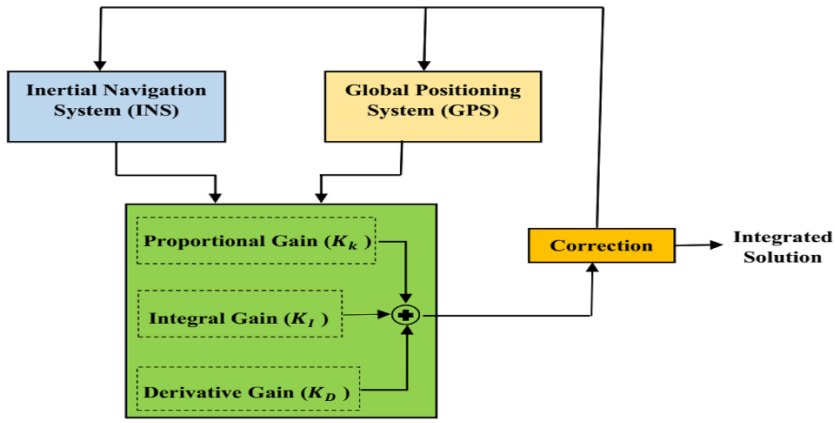
به‌دلیل ساختار ساده و کم‌هزینه الگوریتم پیشنهادی، این روش قابلیت پیاده‌سازی در زمان واقعی پاسخ‌دهی به داده‌ها در «زمانی بسیار کوتاه» را در سیستم‌های ناوبری عملیاتی و خودروهای خودران داراست. در این قسمت اصول و طرح کلی ایده تلفیق پیشنهادی در این مقاله به تفصیل ارائه می‌گردد. بلوک دیاگرام ادغام سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی براساس استاندارد فیلتر کالمن در شکل (۱)، نشان داده شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام ادغام سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی براساس فیلتر کالمن استاندارد

براساس این بلوک دیاگرام، سرعت و موقعیت محاسبه شده سامانه ناوبری اینرسی (INS) با اندازه‌گیری‌های سرعت و موقعیت سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) که به‌عنوان بردار اندازه‌گیری در تخمین‌گر فیلتر کالمن در نظر گرفته می‌شوند، مقایسه می‌شوند. در هر چرخه، فیلتر کالمن یک گین K_k بهینه را محاسبه می‌کند و خطاهای مربوط به سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی را تخمین می‌زند. در نهایت، خطاهای تخمین زده شده به سیستم‌های سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی بازخورد داده می‌شوند و راه‌حل یکپارچه به دست می‌آید. همان‌طور که قبلاً گفته شد، تخمین گر استاندارد فیلتر کالمن به‌شدت به مدل‌های فرایند و اندازه‌گیری وابسته است؛ همین امر ما را برانگیخت که در این

مقاله یک طرح یکپارچه‌سازی مقاوم را براساس ترکیب تئوری کنترل تناسبی–انتگرالی–مشتقی تعمیم یافته (GPID) و برآوردگر «فیلتر کالمن» پیشنهاد کنیم. بلوک دیاگرام طرح ادغام پیشنهادی در شکل (۲)، نشان داده شده است.



شکل ۲: بلوک دیاگرام ادغام سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی براساس روش تلفیق پیشنهادی براساس تئوری تناسبی– انتگرالی– مشتقی تعمیم یافته (GPID)

برخلاف طرح تلفیق مبتنی بر فیلتر کالمن (KF) استاندارد، طرح پیشنهادی از دو بخش اضافی (بخش‌های انتگرالی و مشتقی) در بلوک تخمین‌گر خود استفاده می‌کند. درواقع طرح پیشنهادی مبتنی بر فیلتر تناسبی– انتگرالی– مشتقی تعمیم یافته معادل با طرح ادغام مبتنی بر فیلتر کالمن استاندارد است هنگامی که ترم‌های انتگرالی و مشتقی بر روی صفر تنظیم شوند.

۵-۱۲. شبیه‌سازی سیستمی و نتایج

در این قسمت برای ارزیابی عملکرد طرح یکپارچه‌سازی پیشنهادی، یک شبیه‌سازی جامع برای یک سامانه ناوبری تلفیقی سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی در این بخش انجام شده است. علاوه بر عدم دسترسی به یک سامانه ناوبری یکپارچه واقعی در آزمایشگاه، آزمایش شبیه‌سازی را برای دستکاری آسان اندازه‌گیری سامانه موقعیت‌یاب جهانی و ایجاد خطاهای مصنوعی در اندازه‌گیری‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی در فواصل

زمانی خاص انجام شده است. این مقاله از مدل ریاضی و شبیه‌سازی MATLAB بیان شده، برای تولید «واحد اندازه‌گیری اینرسی»[1](IMU) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی استفاده می‌کند که چهار نوع سناریو مختلف به نام‌های مسیرهای ثابت، خط مستقیم، دایره و S شکل را توسعه می‌دهد. مشخصات خطاهای واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی اضافه شده به اندازه‌گیری‌های ایدئال تولید شده است.

جدول ۲: مشخصات خطاها، واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)

۰/۰۱ deg / hr	**خطاهای ثابت ژیروسکوپ**
۰/۰۰۱deg / $\sqrt{hr}$	خطاهای ژیروسکوپ
±۵۰ μg	خطاهای ثابت شتاب سنج
۰/۳m/s/$\sqrt{hr}$	خطاهای تصادفی شتاب سنج
۵ M	خطای موقعیت گیرنده GPS
۰/۱ m/s	خطای سرعت گیرنده GPS

سیستم‌های ناوبری اینرسی براساس دقت و عملکرد خود به درجه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که ارتباط مستقیمی با مشخصات خطای سنسورهای اینرسی پیاده‌سازی شده در سامانه ناوبری دارد. در این مقاله، ما فرض می‌کنیم که یک درجه تاکتیکی سامانه ناوبری اینرسی در آزمون با مشخصات خطا در جدول (۲) استفاده شده است. بااین‌حال، انتخاب درجات مختلف سامانه ناوبری اینرسی مستقیماً بر عملکرد سامانه یکپارچه تأثیر می‌گذارد، ما همان مشخصات خطا را در جدول (۲) پیاده‌سازی کردیم تا به‌طور خاص تأثیر طرح یکپارچه‌سازی را بر عملکرد سامانه ناوبری کمکی ارزیابی کنیم. پس از تولید واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی طرح‌های یکپارچه‌سازی براساس استاندارد فیلتر کالمن و فیلتر تناسبی–انتگرالی–مشتقی (PID) تعمیم‌یافته پیشنهادی به‌طور جداگانه ارزیابی می‌شوند. همان‌طور که قبلاً ذکر کردیم، خطای چند مسیری منبع اصلی

1. Inertial Measurement Unit (IMU)

خطای سیگنال سامانه موقعیت‌یاب جهانی است که می‌تواند در مناطق شهری نزدیک ساختمان‌های بلند یا جنگل‌های متراکم رخ دهد. برای ارزیابی عملکرد طرح پیشنهادی، اندازه‌گیری سامانه موقعیت‌یاب جهانی عمداً توسط خطای چند مسیری در یک بازهٔ زمانی خاص از آزمایش شبیه‌سازی خراب می‌شود. سناریوی دایره‌ای برای مسیر حرکت سامانه یکپارچه سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی انتخاب شده است. کل زمان شبیه‌سازی ساعت (۳۶۰۰ ثانیه) در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که سیگنال سامانه موقعیت‌یاب جهانی توسط برخی از منابع خطای چند مسیری در بازهٔ زمانی ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ ثانیه خراب شده است. در این بازه، سامانه موقعیت‌یاب جهانی و اندازه‌گیری سرعت توسط خطاهای چند مسیری مشخص شده در جدول (۳) دستکاری می‌شود.

جدول ۳: مشخصات خطاها، واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)

۵۰ m	**خطای موقعیت GPS توسط چند مسیر خراب شده است**
۰/۵ m/s	خطای سرعت گیرنده GPS توسط چند مسیر خراب شد

در آزمایش‌های شبیه‌سازی از دو تنظیم مختلف قطعات انتگرال و مشتق در ادغام پیشنهادی استفاده می‌شود:

$$(k_i = 1 \& k_d = 0) \quad \text{طرح ۱:}$$

$$(k_i = 1.5 \& k_d = 3) \quad \text{طرح ۲:}$$

بااین‌حال، گزینه‌های مختلف دیگر برای این ثابت‌ها قابل اجرا هستند و می‌توانند در سامانه آزمایش و استفاده شوند، این دو طرح مختلف برای نشان دادن بهینه اثر ترم‌های انتگرالی و مشتقی سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی انتخاب شده است. این نتایج نشان‌دهنده کارایی و دقت بالاتر روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم تلفیق داده‌ها است. روش پیشنهادی با کاهش خطاها و افزایش دقت در شرایط مختلف محیطی می‌تواند به بهبود عملکرد سیستم‌های ناوبری تلفیقی کمک کند. نتایج آزمون شبیه‌سازی برای خطاهای زوایای وضعیت در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده است.

با توجه به این نتایج و خطاهای وضعیت جمع مربعات خطاهای (RMS) محاسبه شده در جدول (۴)، مشخص می‌شود که تخمین گر استاندارد فیلتر فیلتر کالمن در حضور خطای موقعیت و سرعت سامانه موقعیت‌یاب جهانی، به‌ویژه در زاویه سمت، تخمین مناسبی خصوصاً پس از بروز خطا به دست نمی‌دهد و با نرخ کندی همگرا می‌شود. این در حالی است که روش پیشنهادی خطاهای وضعیت را در فاصله زمانی که خطای چند مسیری رخ می‌دهد، نزدیک به صفر نگه می‌دارد.

از یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی می‌تواند در سیستم‌های دریایی که تضمین وضعیت زاویه‌ای دقیق یک مسئله حیاتی است، استفاده شود. طرح پیشنهادی تلفیق فیلتر تناسبی–انتگرالی–مشتقی تعمیم یافته با یک فیلتر کالمن استاندارد.

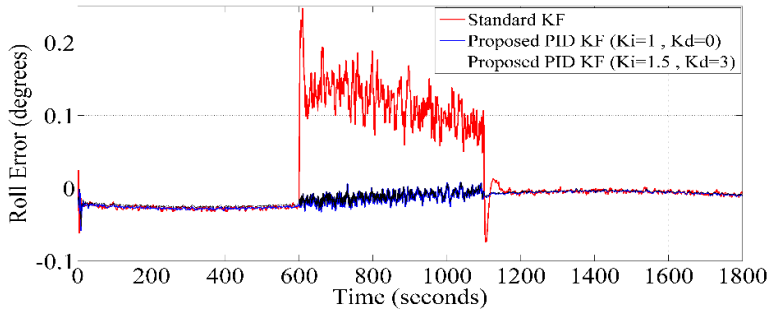
جدول ۴: خطای زوایای وضعیت برای ارائه این دو طرح

روش ادغام	خطای RMS زاویه رول	خطای RMS زاویه پیچ	خطای RMS زاویه سمت
فیلتر کالمن استاندارد	۰/۰۶۶۵	۰/۰۶۸۳	۰/۱۵۳۸
«PID KF»[۲] پیشنهادی (طرح ۱)	۰/۰۱۷۶	۰/۰۱۸۸	۰/۰۴۴۱
PID KF پیشنهادی (طرح ۲)	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۶۹	۰/۰۴۰۲

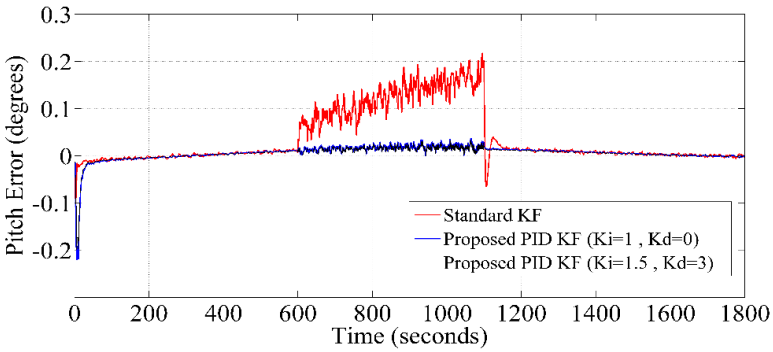
نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای طول، طول و ارتفاع به ترتیب در شکل (۶) تا (۸) نشان داده شده است. مسیر کل مسیر در صفحه دوبُعدی طول و عرض جغرافیایی نیز به‌صورت جداگانه در شکل (۹) برای کالمن فیلتر استاندارد و روش پیشنهادی با توجه به مسیر ایدئال نشان داده شده است. مقایسه دقیق خطای موقعیت نیز در جدول (۵) برای هر دو طرح ادغام ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نتایج موقعیت‌یابی روش پیشنهادی راه‌حل دقیق‌تر و قوی‌تری در پاسخ به خطای چند مسیری سامانه موقعیت‌یاب جهانی دارد. براساس تئوری کنترل‌کننده تناسبی– انتگرالی– مشتقی (PID) با افزایش ثابت مشتق، k_d، می‌تواند منجر به بهبود سرعت و همچنین افزایش نوسانات در پاسخ شود. از طرف دیگر، ثابت انتگرال مستقیماً بر

1. Gyrocompass
5. Proportional-Integral-Derivative (PID)/ Kalman Filter

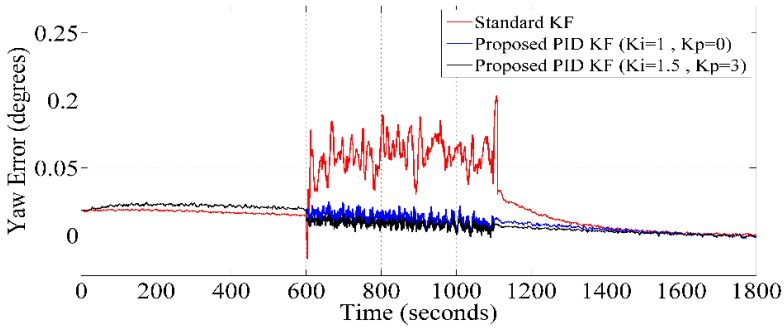
دقت پاسخ تأثیر می‌گذارد. هر چه ثابت انتگرال k_Iبیشتر باشد، خطای کمتری در پاسخ به دست می‌آید. تنظیم‌های مختلف ثابت‌های انتگرال و مشتق به‌طور مستقیم بر عملکرد فیلتر پیشنهادی تأثیر می‌گذارد که در نوسان، سرعت و دقت حل منعکس می‌شود. با تنظیم مناسب ثابت‌های انتگرال و مشتق، می‌توان عملکرد فیلتر قابل قبولی را برای یک سامانه ناوبری اینرسی کمکی خاص به دست آورد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، فیلتر کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی طرح ۲ در مقایسه با فیلتر کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی طرح ۱، پاسخ نوسانی دقیق‌تری دارد.



شکل ۳: خطای زاویه رول محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن استاندارد و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID) پیشنهادی



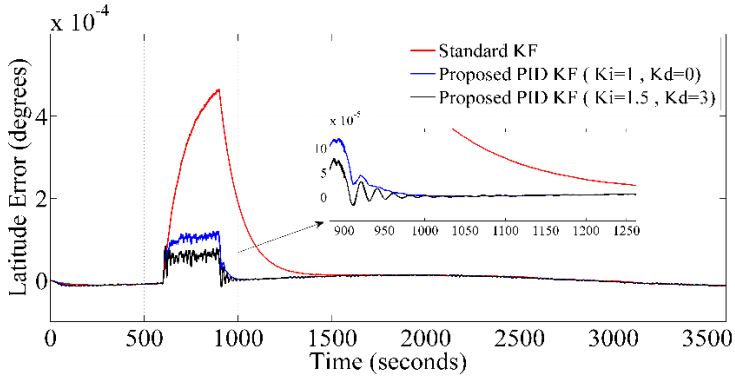
شکل ۴: خطای زاویه پیچ محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن استاندارد و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی



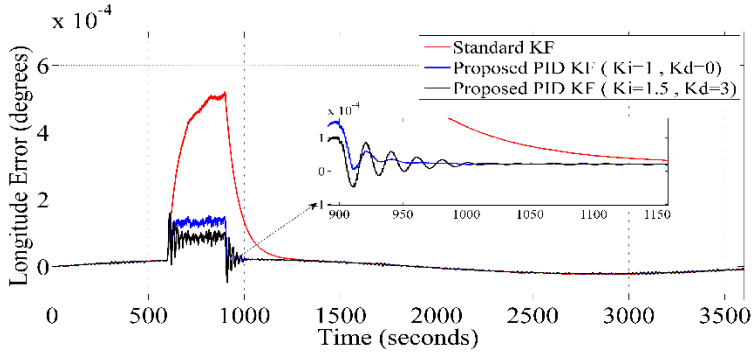
شکل ۵: خطای زاویه سمت محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن استاندارد و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی

جدول ۵: خطاهای موقعیت برای روش‌های ادغام کالمن فیلتر استاندارد و فیلتر پیشنهادی

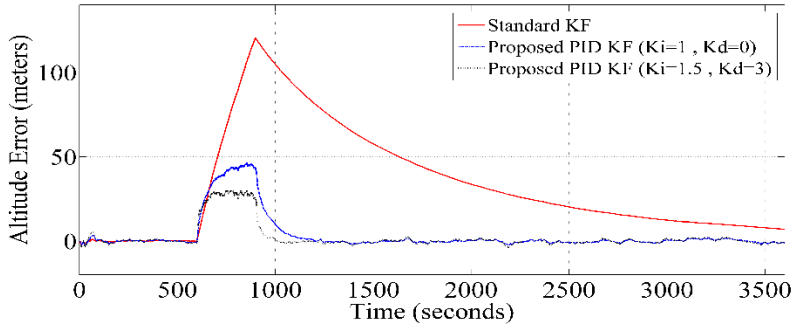
روش ادغام	خطای RMS عرض جغرافیایی	خطای RMS طول جغرافیایی	خطایRMS ارتفاع جغرافیایی	خطای موقعیت افقی (Km)
فیلتر کالمن استاندارد	10.6 e-05	18.8 e-05	61.39	1.37
PID KF پیشنهادی (طرح ۱)	4.25 e-05	5.58 e-05	16.49	0.44
PID KFپیشنهادی (طرح ۱)	2.61 e-05	3.95 e-05	11.04	0.30



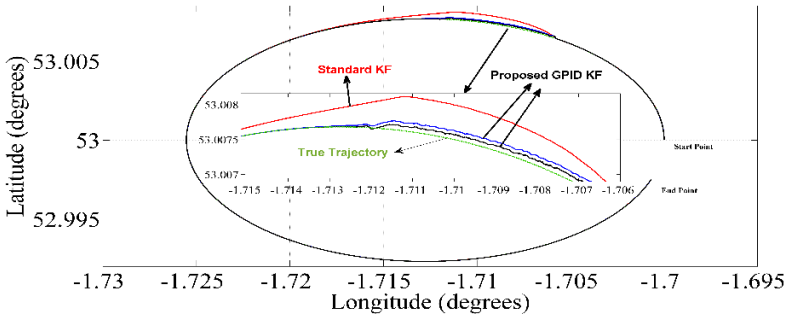
شکل ۶: خطای عرض جغرافیایی محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن (KF) استاندارد و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی



شکل ۷: خطای طول جغرافیایی محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن (KF) استاندارد و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی



شکل ۸: خطای ارتفاع محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن (KF) استاندارد و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی



شکل ۹: ترسیم مسیر دوبُعدی محاسبه شده در طرح فیلتر کالمن (KF) و طرح‌های فیلتر تناسبی- انتگرالی- مشتقی (GPID) پیشنهادی

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

این تحقیق با ارائه یک روش نوین در تلفیق داده‌های ناوبری ترکیبی سامانه ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی توانست به کاهش خطاهای اندازه‌گیری و افزایش پایداری سیستم‌ها در شرایط محیطی پیچیده دست یابد. استفاده از کنترل‌کننده‌های فیلتر تناسبی–انتگرالی–مشتقی (GPID) در کنار فیلتر کالمن استاندارد، رویکرد بهتری ارائه کرده است که به‌طور قابل‌توجهی عملکرد سیستم‌های ناوبری تلفیقی را ارتقا داده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های نشان داد که روش پیشنهادی، دقت موقعیت‌یابی را بهبود بخشیده و مقاومت سامانه در برابر اختلالات محیطی و نویزهای سیگنال را افزایش داده است. در شرایطی که سیگنال‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی محدود یا غیرقابل‌دسترس هستند، این روش با استفاده از داده‌های واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و تلفیق با الگوریتم‌های پیشرفته، امکان موقعیت‌یابی دقیق و مطمئن را فراهم کرده است. به‌علاوه، این تحقیق توانسته است شکاف موجود بین وضع مطلوب و وضع موجود را با ارائه یک ساختار ساده و قابل‌اجرا پر کند. این روش، به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر کاهش بار محاسباتی، قابلیت پیاده‌سازی آنلاین و ارتقای دقت سامانه، توانسته است جایگزینی مناسب برای روش‌های پیچیده و پرهزینه موجود باشد. همچنین، با استفاده از رویکرد ترکیبی و ادغام داده‌های چندمنبعی، الگوریتم پیشنهادی امکان توسعه کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های حمل‌ونقل هوشمند، سیستم‌های خودران، ناوبری هوایی و دریایی و سامانه‌های نظامی را فراهم کرده است. ازمنظر علمی، نتایج این تحقیق نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه دقت و مقاومت سیستم‌های تلفیقی است که می‌تواند پایه‌ای محکم برای توسعه زیرساخت‌های ناوبری پیشرفته فراهم کند. بااین‌حال، نیاز به تحقیقات بیشتر جهت بهبود الگوریتم‌های پیشنهادی و آزمایش در شرایط محیطی واقعی برای ارزیابی جامع‌تر احساس می‌شود.

۶-۱. پیشنهادهای پژوهش

۶-۱-۱. پیشنهادات اجرایی

❖ سازمان بنادر و دریانوردی ایران

نهادهای مرتبط: سازمان بنادر و دریانوردی، وزارت راه و شهرسازی، دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دریایی.

➢ وظایف و پیگیری‌ها

- ✓ پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در سیستم‌های ناوبری کشتی‌ها و قایق‌ها؛
- ✓ همکاری با دانشگاه‌ها و شرکت‌های فناورانه برای بهینه‌سازی تجهیزات ناوبری شامل سنسورهای دقیق اینرسی واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و گیرنده‌های پیشرفته سامانه موقعیت‌یاب جهانی(GPS)؛
- ✓ انجام آزمایشات میدانی در محیط‌های واقعی برای بررسی عملکرد الگوریتم در شرایط سخت دریایی مانند کمبود سیگنال در اقیانوس‌ها.

❖ سازمان هواپیمایی کشوری ایران

نهادهای مرتبط: سازمان هواپیمایی کشوری، شرکت‌های هواپیمایی داخلی، وزارت راه و شهرسازی.

➢ وظایف و پیگیری‌ها

- ✓ ارتقای سیستم‌های ناوبری هوایی با اجرای الگوریتم‌های جدید برای کاهش خطاهای موقعیتی و زاویه‌ای؛
- ✓ تجهیز هواپیماها به سنسورهای اینرسی با دقت بالا و گیرنده‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) تطبیق‌یافته با الگوریتم پیشنهادی؛
- ✓ شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سامانه در شرایط جوی پیچیده نظیر اختلالات سیگنالی در مناطق دورافتاده.

❖ **وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح ایران**

نهادهای مرتبط: وزارت دفاع، نیروهای مسلح جمهوری اسلامی ایران، سازمان صنایع دفاعی.

➢ **وظایف و پیگیری‌ها**

- ✓ طراحی و به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی در سامانه‌های نظامی برای بهبود ناوبری در مأموریت‌های حساس؛
- ✓ توسعه تجهیزات نظامی پیشرفته شامل حسگرهای با دقت بالا و سیستم‌های ناوبری مقاوم در برابر شرایط محیطی چالش‌برانگیز؛
- ✓ اجرای آزمایشات عملیاتی در شبیه‌سازی‌های نظامی و مأموریت‌های واقعی.

❖ **مرکز تحقیقات هوا فضا ایران**

نهادهای مرتبط: مرکز تحقیقات فضایی، وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشگاه هوافضا.

➢ **وظایف و پیگیری‌ها**

- ✓ طراحی و اجرای شبیه‌سازهای سه‌بُعدی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شرایط متنوع محیطی؛
- ✓ ارائه تحلیل‌های دقیق از داده‌های شبیه‌سازی‌شده و همکاری با سایر نهادها برای بهبود سامانه؛
- ✓ توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات برای مدیریت و پردازش داده‌های بزرگ مرتبط با شبیه‌سازی‌ها.

❖ **شرکت‌های فناوری اطلاعات و مخابراتی داخلی**

نهادهای مرتبط: شرکت‌های فناور داخلی، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری، وزارت صمت.

➢ **وظایف و پیگیری‌ها**

- ✓ تولید حسگرهای دقیق واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) و گیرنده‌های پیشرفته سامانه موقعیت‌یاب جهانی(GPS)؛
- ✓ تطبیق‌یافته با نیازهای سیستم‌های ناوبری پیشرفته؛
- ✓ توسعه نرم‌افزارهای ناوبری سازگار با الگوریتم پیشنهادی و ارتقای آن‌ها برای کاربرد در سیستم‌های دریایی، هوایی و نظامی؛
- ✓ تحقیق و توسعه برای پیشبرد فناوری‌های مرتبط و صادرات تجهیزات پیشرفته به بازارهای جهانی.

۶-۱-۲. پیشنهادهای تحقیقاتی

- ✓ بررسی تأثیر الگوریتم‌های یادگیری ماشین در سیستم‌های ناوبری تلفیقی؛
- ✓ مطالعه استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی برای بهبود دقت و پایداری سیستم‌های ناوبری اینرسی و سامانه موقعیت‌یاب جهانی؛
- ✓ ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها در شرایط محیطی پیچیده نظیر مناطق شهری متراکم؛
- ✓ تحلیل جامع روش‌های مقاوم در برابر اختلالات سیگنالی؛
- ✓ طراحی و بهبود «الگوریتم‌های مقاوم»[1] که بتوانند خطاهای ناشی از اختلالات سامانه موقعیت‌یاب جهانی را کاهش دهند؛
- ✓ ارزیابی کاربرد این روش‌ها در محیط‌هایی با سیگنال ضعیف یا تداخل بالا؛
- ✓ استفاده از فناوری‌های نوین حسگرها در ناوبری ترکیبی؛
- ✓ تحقیق در مورد توسعه حسگرهای اینرسی با دقت بالا و فناوری‌های جدید مانند «تشخیص و فاصله‌یابی با پالس‌های نور»[2] و «تشخیص و فاصله‌یابی با امواج رادیویی[3]« برای بهبود عملکرد سامانه تلفیقی؛

1. Robust Algorithms
2. LIDAR
3. RADAR

- ✓ مقایسه عملکرد این حسگرها در شرایط واقعی و شبیه‌سازی شده؛
- ✓ مطالعه اثرات تغییرات جغرافیایی و جوی بر سیستم‌های ناوبری؛
- ✓ تحلیل رفتار سامانه تلفیقی در محیط‌های متنوع، مانند مناطق کوهستانی، صحرایی یا دریایی و بررسی کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی در این شرایط؛
- ✓ طراحی چهارچوب استاندارد برای ارزیابی سیستم‌های ناوبری تلفیقی؛
- ✓ ایجاد یک چهارچوب استاندارد و جامع برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها و تجهیزات مختلف در حوزه سیستم‌های تلفیقی؛
- ✓ ارائه ابزارهایی برای تحلیل داده‌ها و بهبود عملکرد سامانه در پروژه‌های آینده.

References

Aggarwal, P. (2010). "*MEMS-based integrated navigation. Artech House*", https://doi.org/10.1186/s43020-019-0001-5.

Bagherzadeh, S. Z., & Toosizadeh, S. (2022). "*Eye tracking algorithm based on multi model Kalman filter*", HighTech and Innovation Journal, 3(1), 15-27.

Chen, S., & Li, H. (2023). "*Robust navigation system design using multi-sensor fusion*", Sensors and Control Systems Journal.

El-Sheimy, N., & Youssef, A. (2020). "*Inertial sensors technologies for navigation applications: State of the art and future trends*", Satellite Navigation, 1(1), 1-21.

Farhangian, F., & Landry, R. Jr. (2020). "*Accuracy improvement of attitude determination systems using EKF-based error prediction filter and PI controller*", Sensors, 20(14), 4055. https://doi.org/10.3390/s20144055.

Farhangian, F., Benzerrouk, H., & Landry, R. Jr. (2021). "*Opportunistic in-flight INS alignment using LEO satellites and a rotatory IMU platform*", Aerospace, 8(10), 280.

Ghaderi, F., Toloei, A., & Ghasemi, R. (2023). "*Quadrotor control for tracking moving target, and dynamic obstacle avoidance based on potential field method*" International Journal of Engineering, 36(10), 1720-1732.

Gonzalez, R. (2023). "*NaveGo: An open-source MATLAB/GNU Octave toolbox for processing integrated navigation systems*", GitHub Repository.

Hooshmand, M., Yaghobi, H., & Jazaeri, M. (2023). "*Irradiation and temperature estimation with a new extended Kalman particle filter for maximum power point tracking in photovoltaic systems*" International Journal of Engineering, 36(6), 1099-1113.

Liu, K., Wang, Q., & Zhang, T. (2024). "*Adaptive Kalman filter for GNSS/INS integration in urban environments*", Urban Navigation Journal.

Mohammadi, A., Sheikholeslam, F., Emami, M., & Mirjalili, S. (2023). "*Designing INS/GNSS integrated navigation systems by using IPO algorithms*", Springer.

Morales, L. A., Fabara, P., & Pozo, D. F. (2023). "*An intelligent controller based on LAMDA for speed control of a three-phase inductor motor*", Emerging Science Journal, 7(3), 676-690.

Niu, X., & Ding, L. (2024). "*High-precision navigation with MEMS-based sensors*", Journal of Inertial Systems.

Noureldin, A., Karamat, T. B., & Georgy, J. (2012)."*Fundamentals of inertial navigation, satellite-based positioning and their integration*", Springer Science & Business Media..

Rahgoshay, M. A., & Karimaghaie, P. (2020). "*Robust in-field estimation and calibration approach for strapdown inertial navigation systems accelerometers bias acting on the vertical channel. IET Radar*", Sonar & Navigation, 14(3), 407-414.

Rahgoshay, M. A., Karimaghaie, P., & Shabaninia, F. (2017). "*Initial alignment of fiber-optic inertial navigation system with large misalignment angles based on generalized proportional-integral-derivative filter*", International Journal on Smart

Sensing & Intelligent Systems, 10(3).

Rahgoshay, M. A., Karimaghaie, P., & Shabaninia, F. (2017). "*Robust inertial frame-based alignment of fiber-optic gyro strapdown inertial navigation systems using a generalized proportional–integral–derivative filter*", Optical Engineering, 56(9), 095102.

Rocha, K. D., & Terra, M. H. (2021). "*Robust Kalman filter for systems subject to parametric uncertainties*", Systems & Control Letters, 157, 105034.

Setoodeh, P., Habibi, S., & Haykin, S. (2022). "*Kalman Filter*".

Siddharth, D., Saini, D., & Singh, P. (2021). "*An efficient approach for edge detection technique using Kalman filter with artificial neural network*", International Journal of Engineering, 34(12), 2604-2610.

Song, J., Li, W., Liu, R., & Zhu, X. (2023)."*FGO-ILNS: Tightly coupled multi-sensor integrated navigation system*", based on factor graph optimization.

Valizadeh, A., & Hamidi, H. (2017). "*Improvement of navigation accuracy using tightly coupled Kalman filter*" International Journal of Engineering, 30(2), 215-223.

Wang, D., & Zhu, H. (2023). "*Dynamic error modeling for integrated navigation systems*", International Navigation Systems Journal.

Wang, D., Dong, Y., Li, Z., Li, Q., & Wu, J. (2019). "*Constrained MEMS-based GNSS/INS tightly coupled system with robust Kalman filter for accurate land vehicular navigation*", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 69(7), 5138-5148.

Wang, L., Kong, X., Xu, H., & Li, H. (2023)."*INS-GNSS integrated navigation algorithm based on TransGAN*", Tech Science Press.

Wang, L., Zhang, T., & Wang, Y., et al. (2024)."*Enhancing visual navigation performance by prior pose-guided active feature points distribution".*

Wang, Q., Liu, K., & Cao, Z. (2023). "*System noise variance matrix adaptive Kalman filter method for AUV INS/DVL navigation system*" Ocean Engineering, 267, 113269.

Wirawan, I. M. A., Wardoyo, R., Lelono, D., & Kusrohmaniah,S. (2022). "*Modified weighted mean filter to improve the baseline reduction approach for emotion recognition*" Emerging Science Journal, 6(6), 1255-1273.

Zhang, J., He, X., & Zhou, D. (2016). "*Generalised proportional–integral–derivative filter*", IET Control Theory & Applications, 10(17), 2339-2347.

Zhang, L., & Xu, Y. (2025). "*Machine learning-based error mitigation in GNSS/INS systems*", Journal of Artificial Intelligence in Navigation.

Zhang, T., Yuan, M., Wang, L., et al. (2024)."*A robust and efficient IMU array/GNSS data fusion algorithm*" Institute of Navigation.

Zhang, W., Ghogho, M., & Yuan, B. (2012). "*Mathematical model and matlab simulation of strapdown inertial navigation system*", Modelling and Simulation in Engineering, 2012.

Zhou, J., Wang, H., & Li, Y. (2025). "*Advanced Kalman filtering techniques for robust navigation in GPS-denied environments. Journal of Navigation Studies*", 15(5),

1024-1039.

Zhou, J., Wang, H., & Li, Y. (2025).”*Advanced integration of INS/GPS systems using Kalman filtering techniques. Journal of Navigation Systems*”, 18(2), 345–367.

Zhu, H., Zhang, G., Li, Y., & Leung, H. (2021). “*An adaptive Kalman filter with inaccurate noise covariances in the presence of outliers*”, IEEE Transactions on Automatic Control, 67(1), 374-381.