

تلفیق اطلاعات ژيروسکوپ و مغناطیس سنج برای تخمین وضعیت پرتابه‌های با سرعت بالا بر مبنای ترکیب فیلتر ذره‌ای و PSO

علی اصغری^۱ سعید نصراللهی بروجنی^۲ نعمت‌اله قهرمانی^۳

مجتمع برق و کامپیوتر

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷)

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از تلفیق خروجی مغناطیس‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌های ارزان قیمت میکرو الکترومکانیکی، وضعیت پرتابه‌های با سرعت بالا با استفاده از فیلتر ذره‌ای ترکیب‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات تخمین‌زده می‌شود. در سرعت‌های بالا ژيروسکوپ‌های ارزان قیمت سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی دارای خطای زیادی هستند و مغناطیس‌سنج‌ها نیز به دلیل وجود میدان‌های مغناطیسی غیر از زمین دقت پایینی دارند. برای حل این مشکلات، تلفیق اطلاعات این دو حسگر برای تخمین وضعیت پیشنهاد می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن معادلات دینامیکی و مشاهده باید از تخمین‌گر غیرخطی استفاده شود. فیلتر کالمن توسعه‌یافته با صرف‌نظر نمودن از جملات مرتبه بالای بسط تیلور خطایی را وارد محاسبات می‌نماید که این خطا در سامانه‌های غیرخطی سریع قابل صرف‌نظر نیست. فیلتر ذره‌ای برخلاف فیلتر کالمن، برای سامانه‌های غیرخطی نتایج خوبی دارد. بزرگترین ضعف این فیلتر، بار محاسباتی بالای آن است که باعث محدودیت کاربردش گشته است. برای کاهش مدت‌زمان انجام محاسبات فیلتر ذره‌ای از الگوریتم ترکیب‌شده فیلتر ذره‌ای با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از ۱۰۰ نمونه آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این الگوریتم در مسئله تلفیق اطلاعات ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج در تخمین زوایا است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، تخمین وضعیت، ژيروسکوپ، فیلتر ذره‌ای، مغناطیس‌سنج

Data Fusion of Gyroscope and Magnetometer to Estimate the Attitude of High-Speed Projectiles Based on Particle Filter and PSO

A.Asghari

S.Nasrollahi

N.Ghahremani

Department of Electrical
and Computer Engineering
Malek-Ashtar University

(Received:24/May/2019; Accepted:18/September/2019)

ABSTRACT

In this paper, the attitude of high-speed projectiles has been estimated using data fusion of magnetometer and Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscope. MEMS gyroscopes have the high error for high speed. Also, magnetometers have low accuracy due to the presence of Non-Earth magnetic fields. For this reason, data fusion of magnetometer and MEMS gyroscope have been suggested. Due to the nonlinearity of the system equations and observation, a nonlinear estimator must be used. The developed Kalman filter inserts an error by ignoring the high order sentences of Taylor's expansion, which cannot be ignored in fast nonlinear systems. Unlike the Kalman filter, the particle filter has good results for nonlinear systems. The biggest weakness of this filter is its high computational time, which limits its applicability. To reduce the computational time of particle filter, a particle swarm optimization algorithm has been used. The simulation results were evaluated using 100 samples of the test, which illustrates the desirable performance of the combined particle filter with the particle swarm optimization algorithm in the data fusion of gyroscope and magnetometer information in the estimation of angles.

Keywords: Particle swarm optimization algorithm, Attitude estimation, Gyroscope, Particle filter, Magnetometer.

^۱ - کارشناسی ارشد: alias1371@yahoo.com

^۲ - دانشجوی دکتری: Nasrollahi@mut.ac.ir

^۳ - دانشیار (نویسنده پاسخگو): ghahremani@mut.ac.ir

۱- مقدمه

میدان مغناطیسی زمین می‌تواند یک دستگاه مختصات طبیعی برای فضاوردی و دریانوردی فراهم کند [۱]. وضعیت یک وسیله را می‌توان با اندازه‌گیری اجزای میدان مغناطیسی آن وسیله که ناشی از میدان مغناطیسی زمین است، به‌دست آورد. با توجه به محدودیت محدوده اندازه‌گیری ژيروسکوپ، استفاده از آن در یک پرتابه واقعی با سرعت بالا و چرخش سریع، با دقت پایین همراه است. با توسعه فناوری اندازه‌گیری مغناطیسی، تحقیقات فراوانی برای اندازه‌گیری پارامترهای پرواز و ناوبری با استفاده از مغناطیس‌سنج‌ها انجام گرفته است. یک حسگر مغناطیسی دارای مزایایی مانند سرعت پاسخ سریع، ابعاد کوچک، مقاومت در برابر شوک بالا و بدون انباشتگی خطا است [۲-۴]. حسگرهای مغناطیسی برای سنجش وضعیت پرتابه با سرعت بالا و با چرخش سریع کاربرد دارند [۵-۶].

متغیرهای وضعیت پرتابه شامل زاویه غلت، زاویه فراز و زاویه سمت است. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری وضعیت پرتابه‌ها تنها با استفاده از حسگرهای مغناطیسی ارائه شده است. در مرجع [۷] از ۳ جفت مغناطیس دومحوره متعامد برای تعیین وضعیت پرتابه‌های غیرچرخشی با روش نرخ اکستریم استفاده شده است. در مرجع [۸] سه روش مختلف عبور از صفر، نرخ اکستریم دومحوره غیر متعامد و نرخ اکستریم سه محوره متعامد باهم مقایسه شده است. در مرجع [۹] روش نرخ اکستریم دومحوره غیر متعامد با جایگیری‌های مختلف حسگرها پیاده‌سازی و اجرا شده است که برای زوایای غلت و فراز دقت کمتر از ۱(deg) گزارش شده است. در مرجع [۱۰] روش نرخ تقاطع خروجی دو حسگر با استفاده از حسگر سه محوره غیرمتعامد ارائه شده است. روش حسگرهای غیرمتعامد مغناطیسی [۱۱] از دو حسگر غیرمتعامد مغناطیسی برای جمع‌آوری داده‌های میدان مغناطیسی در طی یک دوره چرخش پرتابه استفاده می‌کند. با فرض این‌که زاویه سمت و زاویه فراز در یک دور چرخش پرتابه، تقریباً ثابت هستند، زاویه غلت پرتابه را می‌توان به‌طور مستقیم محاسبه کرد. دو روش برای محاسبه زاویه فراز پرتابه‌های چرخشی وجود دارد: یکی روش عبور از صفر [۱۲-۱۳] و دیگری روش نسبت اکستریم [۱۴]. هر دو

روش می‌توانند تخمین وضعیت پرتابه را در یک نقطه خاص از خروجی حسگرها به‌دست آورند. روش عبور از صفر از اطلاعات فاز دو حسگر برای محاسبه وضعیت پرتابه استفاده می‌کند [۱۵]. درحالی‌که در روش نسبت اکستریم اطلاعات نقاط اکستریم دو حسگر مبنای محاسبه وضعیت پرتابه است. با این حال، به‌دلیل این‌که این دو روش مقادیر خاصی از داده‌های مغناطیسی در یک دوره چرخش پرتابه را مورد استفاده قرار می‌دهند، در برابر اغتشاشات تصادفی آسیب‌پذیر هستند. در این دو روش هر قدر که خطای مقدار نمونه‌گیری کوچک‌تر شود، خطای وضعیت تخمین زده‌شده نیز کوچک‌تر خواهد شد [۱۶].

روش دیفرانسیلی ردیابی دو کاناله [۱۷] از یک فیلتر دیفرانسیلی برای پردازش داده‌ها از حسگرهای مغناطیسی سه محوره استفاده می‌کند. در نتیجه خطای وضعیت پرتابه در مواجهه با اغتشاشات تصادفی کاهش می‌یابد. برای کاهش اغتشاشات تصادفی که در روش نسبت اکستریم وجود دارد، یک روش نسبت انتگرالی در [۱۸] ارائه شده است. این روش می‌تواند اغتشاشات تصادفی را با ایجاد مدل انتگرالی کاهش داده و دقت محاسبه وضعیت نسبت به روش نسبت اکستریم را افزایش دهد. مراجع [۳]، [۱۹-۲۰] با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی پس‌زمینه (B_M^1) در خروجی مغناطیس‌سنج روش‌های تعیین زوایای زوایای پرتابه را توسعه داده‌اند. روش‌های تعیین زوایای پرتابه تنها با استفاده از مغناطیس‌سنج با در نظر گرفتن فرض ساده‌کننده ثابت بودن زوایای فراز و سمت است. همچنین نرخ به‌هنگام شدن داده‌های اندازه‌گیری زوایای به‌دست آمده بستگی به سرعت دوران پرتابه دارد. زیرا، نمونه‌برداری از خروجی حسگر در نقاط خاص (به‌طور مثال صفر شدن یا بیشینه شدن خروجی حسگر) رخ می‌دهد. برای غلبه بر این مشکلات می‌توان داده‌های مغناطیس‌سنج را با داده‌های شتاب‌سنج، ژيروسکوپ ادغام نمود.

در مرجع [۲۱] برای تخمین زوایای پرتابه با استفاده از داده‌های حسگرهای ارزان‌قیمت ژيروسکوپ، شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج و فیلتر کالمن تعمیم‌یافته یک الگوریتم ارائه شده است. در این مرجع خروجی ژيروسکوپ به عنوان معادلات دینامیک و خروجی شتاب‌سنج‌ها و

¹- Background Magnetic Field

اخیر، الگوریتم‌های تکاملی^۷ برای بهبود عملکرد فیلتر ذره‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش فیلتر ذره‌ای تکاملی می‌تواند ذرات را به ناحیه‌ای با درست‌نمایی دقیق‌تر حرکت دهد و همچنین تنوع ذرات را بهبود بخشد که این امر باعث افزایش دقت تخمین حالت‌ها می‌شود. استفاده از الگوریتم‌های تکاملی سبب حل مشکل فقر نمونه و در نتیجه استفاده از تعداد ذرات کمتری خواهد شد. اولین کاربرد الگوریتم‌های تکاملی، عملگرهای الگوریتم ژنتیک، در مرجع [۳۱] ارائه شده است. در ادامه محققان زیادی از الگوریتم‌های تکاملی برای حل مشکلات فیلتر ذره‌ای استفاده کردند و نمونه‌های مختلفی از فیلترهای ذره‌ای تکاملی را معرفی کرده‌اند. نتایج به دست آمده از این فیلترها، حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم‌های پیشنهادی نسبت به فیلتر ذره‌ای دارد. در مراجع [۳۲-۳۳] از ترکیب الگوریتم ژنتیک با فیلتر ذره‌ای برای حل مسئله فقر نمونه و تباهیدگی استفاده شده است. در [۳۴-۳۵] برای حل مسئله فقر نمونه و وابستگی به تعداد نمونه‌ها با ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات^۸ (PSO) با فیلتر ذره‌ای، فیلتر جدیدی به نام فیلتر ذره‌ای بهینه‌سازی شده با انبوه ذرات ارائه شده است. در [۳۶] از الگوریتم PSO برای بهبود تابع توزیع پیشنهادی فیلتر ذره‌ای در کاربرد موقعیت‌یابی یک ربات متحرک استفاده شده است.

در این مقاله، با استفاده از تلفیق خروجی مغناطیس‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌های ارزان‌قیمت سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی^۹، وضعیت پرتابه‌های با سرعت بالا تخمین زده می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن معادلات دینامیک و مشاهده برای تلفیق داده حسگرها از فیلتر ذره‌ای استفاده شده است. همچنین، برای کاهش بار محاسباتی و بهبود عملکرد بلادرنگ فیلتر ذره‌ای در حل مسئله تلفیق اطلاعات ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج، از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات در مرحله نمونه‌برداری فیلتر ذره‌ای استفاده شده است. در این روش مشاهده از مغناطیس‌سنج‌ها با در نظر گرفتن فرض ساده کننده ثابت بودن زوایای فراز و سمت نخواهد بود. همچنین نرخ به هنگام شدن داده‌های اندازه‌گیری زوایای به‌دست‌آمده

مغناطیس‌سنج‌ها به‌عنوان مشاهدات در نظر گرفته شده است. در مراجع [۲۲-۲۳] برای جبران اثرات میدان‌های مغناطیسی غیرزمینی در اندازه‌گیری مغناطیس‌سنج، اثرات نیروهای خارجی بر اندازه‌گیری شتاب‌سنج، و جبران خطای انحراف ژيروسکوپ فیلتر کالمن تطبیقی مقاوم پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۴] از شبکه‌های عصبی برای کاهش نرخ رشد خطا در سامانه‌های ناوبری استفاده شده است. در مراجع [۶ و ۲۵] برای کاهش خطای موقعیت و وضعیت پرتابه علاوه بر ژيروسکوپ، شتاب‌سنج و مغناطیس‌سنج از سامانه موقعیت‌یاب جهانی نیز استفاده شده است. در مرجع [۲۶] برای جبران خطای رانش حسگرهای اینرسی از حسگرهای مافوق صوت و مغناطیس‌سنج برای تعیین وضعیت و موقعیت پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۶] از حسگرهای مافوق صوت برای جبران خطای انباشته شده موقعیت ناشی از انتگرال‌گیری استفاده شده است. در مرجع [۲۷] یک سامانه تعیین وضعیت مبتنی بر هفت شتاب‌سنج خطی تک‌محوره و حسگر مغناطیسی سه محوره ارائه شده است.

در بسیاری از کاربردها، معادلات اندازه‌گیری و مشاهدات تابع غیرخطی از حالت‌ها هستند. بنابراین، فیلتر ذره‌ای می‌تواند گزینه مناسبی برای تخمین حالت‌های مسئله تلفیق داده‌های ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج باشد. فیلتر ذره‌ای، پیاده‌سازی مبتنی بر نمونه‌برداری^۱ است که در آن تابع چگالی احتمال پسین^۲ با مجموعه‌ای از ذرات وزن داده شده تخمین زده می‌شود [۲۸-۲۹]. اگرچه از کاربرد فیلتر ذره‌ای در سامانه‌های غیرخطی و غیرگوسی، نتایج خوبی به‌دست آمده است اما این فیلتر دارای نقاط ضعفی است، که از آن جمله می‌توان به مسئله فقر نمونه^۳، تباهیدگی^۴ و از بین رفتن تنوع میان ذرات در مرحله نمونه‌برداری مجدد^۵، مسئله انتخاب تابع چگالی احتمالی پیشنهادی^۶ و بار محاسباتی اشاره کرد [۳۰]. تحقیقات بسیاری در جهت بهبود عملکرد فیلتر ذره‌ای انجام گرفته است. طی سال‌های

¹ - Sample Based

² - Posterior Probability Density Function

³ - Sample Impoverishment

⁴ - Degeneracy

⁵ - Resampling

⁶ - Proposal Probability Density Function

⁷ - Evolutionary Algorithms

⁸ - Particle Swarm Optimization

⁹ - Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)

زمین و همچنین وضعیت پرتابه است که با روابط زیر بیان می‌شود [۸]:

$$\begin{aligned} M_x &= |M| \cos(I) \cos \psi \cos \theta - |M| \sin(I) \sin \theta \\ M_y &= -|M| \cos(I) (\cos \phi \sin \psi - \sin \phi \sin \theta \cos \psi) \\ &\quad + |M| \sin(I) \sin \phi \cos \theta \\ M_z &= |M| \cos(I) (\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi) \\ &\quad + |M| \sin(I) \cos \phi \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، M میدان مغناطیسی زمین، ϕ زاویه غلت، θ زاویه فراز، ψ زاویه سمت و I زاویه انحراف میدان مغناطیسی زمین است. مغناطیس‌سنج علاوه بر میدان مغناطیسی زمین، میدان مغناطیسی پس‌زمینه که به صورت اغتشاش است را نیز اندازه‌گیری می‌کند که با رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۰]:

$$M_m = M + M_{BMF} = M + M_p + M_i + M_e \quad (2)$$

در رابطه (۲)، M_m میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده توسط مغناطیس‌سنج است که شامل میدان مغناطیسی زمین و میدان مغناطیسی پس‌زمینه می‌شود. میدان مغناطیسی پس‌زمینه شامل سه قسمت M_p, M_i, M_e می‌شود. M_p میدان مغناطیسی ثابت است که به دلیل وجود مواد فرومغناطیسی در پرتابه به وجود می‌آید که در طول زمان و حرکت تغییر نمی‌کند و ثابت باقی می‌ماند که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$M_p = [M_{px} \quad M_{py} \quad M_{pz}]^T \quad (3)$$

M_i میدان مغناطیسی القایی است که در طول زمان و جابجایی در فضا تغییر می‌کند و با رابطه (۴) بیان می‌شود [۲۰]:

$$M_i = K \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

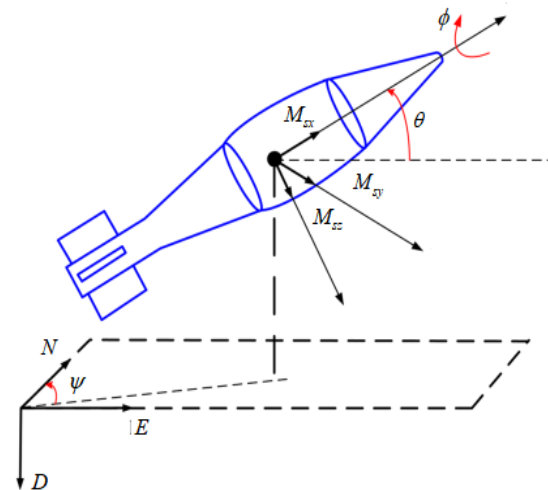
در رابطه (۴)، (M_x, M_y, M_z) میدان مغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی زمین در مختصات بدنه پرتابه است و K ماتریس ضرایب القایی پرتابه است که با اندازه و مواد به کار رفته شده در پرتابه رابطه دارد و مقدار ثابتی است. M_e نیز میدان مغناطیسی ناشی از جریان گردابی است که با رابطه (۵) بیان می‌شود [۲۰]:

$$M_e = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

بستگی به سرعت دوران پرتابه نخواهد داشت زیرا نمونه‌برداری از خروجی حسگر در نقاط خاص (به طور مثال صفر شدن یا بیشینه شدن خروجی حسگر) رخ نمی‌دهد و به صورت متناوب و با یک زمان نمونه‌برداری مشخص از خروجی مغناطیس‌سنج‌ها استفاده خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از ۱۰۰ نمونه آزمایش بررسی و تحلیل شده‌است. نتایج نشان می‌دهد در مسئله تخمین زوایا عملکرد فیلتر تکاملی نسبت به فیلتر ذره‌ای بهتر است. مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲ بیان مسئله تخمین وضعیت با ادغام داده‌های حسگرهای ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج ارائه شده است. در بخش ۳، روابط و معادلات فیلتر ذره‌ای به همراه الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات تشریح شده است. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. نهایتاً، در بخش ۵، نتایج جمع‌بندی شده است.

۲- بیان مسئله

در این بخش، مسئله تلفیق اطلاعات ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج بیان شده است. نحوه قرارگیری مغناطیس‌سنج‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۰].



شکل (۱): نحوه قرارگیری مغناطیس‌سنج‌ها در بدنه [۲۰].

در شکل ۱ (N, E, D) دستگاه مختصات زمین و (x, y, z) دستگاه مختصات بدنه پرتابه است و (M_x, M_y, M_z) مولفه‌های میدان مغناطیسی در مختصات بدنه پرتابه و در سه جهت (x, y, z) است که ناشی از میدان مغناطیسی

سرعت زاویه‌ای زوایای سمت و فراز و از یک ژيروسکوپ تک‌محوره نرخ بالا برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای غلت استفاده می‌شود. همچنین از یک مغناطیس‌سنج تک‌محوره برای اندازه‌گیری M_x و از یک مغناطیس‌سنج دومحوره برای اندازه‌گیری M_y, M_z استفاده می‌شود. مشتق زوایای اویلر که با استفاده از خروجی ژيروسکوپ‌ها به دست می‌آید به‌عنوان معادلات دینامیکی و خروجی مغناطیس‌سنج‌ها به‌عنوان معادلات مشاهده در نظر گرفته می‌شوند. برای تعیین واریانس نويز معادلات دینامیک از روابط (۹-۱۱) استفاده شده است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\phi} \\ \Delta\dot{\theta} \\ \Delta\dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_{gx} \\ \Delta\omega_{gy} \\ \Delta\omega_{gz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} D_{\dot{\phi}} \\ D_{\dot{\theta}} \\ D_{\dot{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (\sin(\phi)\tan(\theta))^2 & (\cos(\phi)\tan(\theta))^2 \\ 0 & \cos(\phi)^2 & (-\sin(\phi))^2 \\ 0 & \frac{(\sin(\phi))^2}{\cos(\theta)} & \frac{(\cos(\phi))^2}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{gx} \\ D_{gy} \\ D_{gz} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\xrightarrow{D_{gy}=D_{gz}=D_g} \begin{bmatrix} D_{\dot{\phi}} \\ D_{\dot{\theta}} \\ D_{\dot{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{gx} + \tan(\theta)^2 D_g \\ D_g \\ \frac{D_g}{\cos(\theta)^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

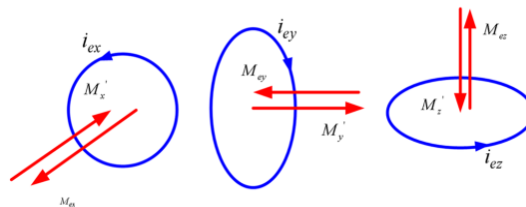
برای تعیین واریانس نويز معادلات مشاهده نیز از رابطه (۱۲) استفاده شده است:

$$DY = \begin{bmatrix} DM_{sx} \\ DM_{sy} \\ DM_{sz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{Mx} \\ D_{My} \\ D_{Mz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

همچنین، فرم گسسته خروجی مغناطیس‌سنج‌ها به صورت رابطه (۱۳) است:

$$y_k = \begin{bmatrix} M_{sx_k} \\ M_{sy_k} \\ M_{sz_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{x_k} \\ M_{y_k} \\ M_{z_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{px_k} \\ M_{py_k} \\ M_{pz_k} \end{bmatrix} + K \cdot \begin{bmatrix} M_{x_k} \\ M_{y_k} \\ M_{z_k} \end{bmatrix} - E \cdot \begin{bmatrix} \frac{M_{x_k} - M_{x_{k-1}}}{T_s} \\ \frac{M_{y_k} - M_{y_{k-1}}}{T_s} \\ \frac{M_{z_k} - M_{z_{k-1}}}{T_s} \end{bmatrix} \quad (13)$$

(M'_x, M'_y, M'_z) تغییرات میدان مغناطیسی نسبت به زمان در مختصات بدنه پرتابه است و e_{ij} ضریب گردابی در محور z تحت تأثیر میدان مغناطیسی محور i ام است که در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۰]:



شکل (۲): جریان گردابی و میدان مغناطیسی ناشی از آن [۲۰].

با استفاده از روابط (۳-۵) داریم [۱۹]:

$$M_{BMF} = \begin{bmatrix} M_{px} \\ M_{py} \\ M_{pz} \end{bmatrix} + K \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} - E \cdot \begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

روش‌های مختلفی در مراجع [۳۷-۴۰] برای تعیین پارامترهای میدان مغناطیسی پس‌زمینه ارائه شده است که در این مقاله فرض بر مشخص بودن این پارامترها است. در مرجع [۱۹] برای پارامترها مقادیر زیر برای یک نوع خاص از پرتابه‌ها ارائه شده است که در این مقاله نیز از همین مقادیر در شبیه‌سازی استفاده شده است؛ این درحالی است که برای هر نوع از پرتابه این مقادیر باید شناسایی شود:

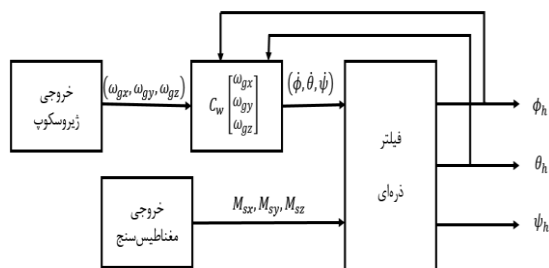
$$M_p = \begin{bmatrix} 44mT \\ -37mT \\ 15mT \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 2.45 & 0.13 & 0.18 \\ 0.22 & 3.56 & 0.11 \\ 0.26 & 0.13 & 3.76 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.142 & -0.036 & -0.012 \\ -0.013 & 0.156 & 0.054 \\ 0.007 & -0.099 & 0.089 \end{bmatrix}$$

رابطه مشتق زوایای اویلر و خروجی ژيروسکوپ برای سه محور توسط رابطه (۸) بیان می‌شود که در آن $\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}$ خروجی ژيروسکوپ و $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ مشتق زوایای اویلر است [۲۶]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

از یک ژيروسکوپ دومحوره نرخ پایین برای اندازه‌گیری



شکل (۳): بلوک دیاگرام تخمین زوایا با استفاده از تلفیق خروجی ژيروسکوپ و مغناطیس سنج.

در شکل ۳ ماتریس C_w به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_w = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi_h) \tan(\theta_h) & \cos(\phi_h) \tan(\theta_h) \\ 0 & \cos(\phi_h) & -\sin(\phi_h) \\ 0 & \frac{\sin(\phi_h)}{\cos(\theta_h)} & \frac{\cos(\phi_h)}{\cos(\theta_h)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

۳- الگوریتم فیلتر ذره‌ای تکاملی

در این بخش ابتدا الگوریتم فیلتر ذره‌ای تشریح می شود. سپس الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بیان می شود و در پایان الگوریتم فیلتر ذره‌ای ترکیب شده با الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات ارائه می گردد.

۳-۱- الگوریتم فیلتر ذره‌ای

الگوریتم فیلتر ذره‌ای بر مبنای روش‌های مونت کارلو زنجیره‌ای، از نمایش ذره‌ای چگالی احتمال، برای تخمین پارامترهای یک توزیع دلخواه بهره می برد. الگوریتم فیلتر ذره‌ای برای تخمین بهینه متغیرهای حالت در شرایطی که مدل غیرخطی با توزیع نوین غیرگوسی است، استفاده می شود. این فیلتر از دو مرحله پیش بینی و به هنگام سازی تشکیل می شود. در مرحله پیش بینی، از مدل دینامیکی برای پیش بینی تابع چگالی احتمال متغیرهای حالت در لحظه آینده بر اساس اندازه گیری‌ها تا لحظه جاری استفاده می شود. در مرحله به هنگام سازی از آخرین اندازه گیری برای بهبود تابع چگالی احتمال حاصل از پیش بینی استفاده می شود [۴۱]. فرض کنید معادلات دینامیکی و مشاهده به صورت زیر بیان شود:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, \omega_k) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، $x_k \in R^n$ و $y_k \in R^{n_y}$ به ترتیب نشان دهنده حالت و مقادیر اندازه گیری شده در زمان گسسته k هستند.

در رابطه (۱۳)، $[M_{x_k}, M_{y_k}, M_{z_k}]^T$ خروجی بدون اغتشاش مغناطیس سنج‌ها است و $[M'_x, M'_y, M'_z]^T$ در رابطه (۶) که مشتق میدان مغناطیسی در مختصات بدنه نسبت به زمان است را با توجه به زمان نمونه برداری کوچک T_s می توان در حالت گسسته به صورت تقریبی با رابطه
$$\left[\frac{M_{x_k} - M_{x_{k-1}}}{T_s}, \frac{M_{y_k} - M_{y_{k-1}}}{T_s}, \frac{M_{z_k} - M_{z_{k-1}}}{T_s} \right]^T$$
 جایگزین کرد. به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\begin{bmatrix} M_{x_k} \\ M_{y_k} \\ M_{z_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |M|_k (\cos(I) \cos \psi_k \cos \theta_k - \sin(I) \sin \theta_k) \\ |M|_k \cos(I) (\sin \phi_k \sin \theta_k \cos \psi_k - \cos \phi_k \sin \psi_k) \\ -|M|_k \sin(I) \sin \phi_k \cos \theta_k \\ |M|_k \cos(I) (\sin \phi_k \sin \psi_k + \cos \phi_k \sin \theta_k \cos \psi_k) \\ + |M|_k \sin(I) \cos \phi_k \cos \theta_k \end{bmatrix} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) چگالی میدان مغناطیسی زمین است که در نقاط مختلف از زمین دارای مقادیر متفاوتی است و باید در طول حرکت پرتابه این تغییرات در نظر گرفته و تخمین زده شود. از آنجا که این تغییرات آهسته است پس می توان تغییرات آن را به صورت صفر ولی همراه با نویز برای تخمین در فیلتر ذره‌ای در نظر گرفت. فرم گسسته معادله (۸) و تغییرات شدت میدان مغناطیسی که به عنوان معادلات دینامیک در فیلتر ذره‌ای مورد استفاده قرار خواهد گرفت در رابطه (۱۵) بیان شده است:

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} \phi_{k+1} \\ \theta_{k+1} \\ \psi_{k+1} \\ |M|_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_k \\ \theta_k \\ \psi_k \\ |M|_k \end{bmatrix} + T_s \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi_k) \tan(\theta_k) & \cos(\phi_k) \tan(\theta_k) & 0 \\ 0 & \cos(\phi_k) & -\sin(\phi_k) & 0 \\ 0 & \frac{\sin(\phi_k)}{\cos(\theta_k)} & \frac{\cos(\phi_k)}{\cos(\theta_k)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{gx_k} \\ \omega_{gy_k} \\ \omega_{gz_k} \\ v_{|M|} \end{bmatrix} \quad (15)$$

در ادامه بلوک دیاگرام تخمین وضعیت پرتابه با استفاده تلفیق خروجی ژيروسکوپ و مغناطیس سنج در شکل ۳ نشان داده شده است:

جمعیت و بر اساس شبیه‌سازی رفتار اجتماعی پرندگان است. در الگوریتم PSO هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضای جستجو که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس، با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن‌که جواب مورد نظر به دست آید. در واقع انبوه ذرات که مقدار کمینه یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند [۴۳].

χ_i ذره i ام است که دارای d بعد است $\chi_i = (\chi_{i1}, \chi_{i2}, \dots, \chi_{id})$ و برای هر یک از ابعاد ذره محدوده‌ای در نظر گرفته می‌شود که نباید از آن خارج شود که به صورت (۲۳) نشان داده می‌شود [۴۳]:

$$\chi_{lb} < \chi < \chi_{ub} \quad (23)$$

سرعت ذره i ام نیز با $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ نشان داده می‌شود. $F_{PSO}(\chi_i)$ تابع هدف است که به‌ازای هر ذره دارای مقداری مشخص است و بهترین تجربه ذره i ام با χ_{ibest} نشان داده می‌شود که به این معنی است که ذره i ام در این مختصات دارای بهترین مقدار $F_{PSO}(\chi_i)$ بوده است. بهترین تجربه کل ذرات نیز با χ_{gbest} نشان داده می‌شود که به این معنی است که به‌ازای تمامی مختصات بررسی شده برای تمامی ذرات، این مختصات دارای بهترین مقدار $F_{PSO}(\chi_i)$ بوده است [۴۳]. در ابتدا ذرات به صورت تصادفی در محدوده تعیین شده در (۲۳) تعیین می‌شود و همچنین سرعت اولیه صفر در نظر گرفته می‌شود. سپس سرعت و موقعیت هر ذره در زمان $(t+1)$ از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$v_i(t+1) = w_{PSO} v_i(t) + c_{1PSO} \Phi_1(P_{ibest} - \chi_i(t)) + c_{2PSO} \Phi_2(P_{gbest} - \chi_i(t)) \quad (24)$$

$$\chi_i(t+1) = \chi_i(t) + v_i(t+1)$$

در رابطه (۲۴) c_{1PSO}, c_{2PSO} ثابت‌های مثبت هستند که مقادیر آن‌ها ۲ در نظر گرفته می‌شوند. P_{ibest} بهترین تجربه ذره i تا زمان t و P_{gbest} بهترین تجربه تمامی ذرات تا زمان t است. Φ_1, Φ_2 اعداد مثبتی هستند که به صورت

همچنین $\omega_k \in R^{n_0}$ و $v_k \in R^{n_0}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقدار نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری در زمان گسسته k است که به صورت نویز سفید و از هم مستقل و با تابع چگالی احتمال معلوم هستند. الگوریتم فیلتر ذره‌ای به صورت زیر است:

• در ابتدا N ذره با تابع چگالی $p(x_0)$ تولید می‌شود که با $x_{0,i}^+ (i=1, \dots, N)$ نشان داده می‌شود.

• برای زمان‌های $k=1, 2, \dots$ مراحل زیر انجام می‌شود:
۱- با داشتن تابع توزیع چگالی نویز فرآیند و معادلات معلوم فرآیند، حالت پیش‌بین ذره i ام در زمان k ام به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۱]:

$$x_{k,i}^- = f_k(x_{k-1,i}^+, \omega_{k-1}^i) \quad i=1, \dots, N \quad (18)$$

ω_{k-1}^i بردار نویز است که به صورت رندوم و با تابع چگالی مشخص ω_{k-1} برای هر ذره تولید می‌شود.

۲- احتمال نسبی هر ذره q_i به شرط مشاهده y_k و با تابع توزیع چگالی معلوم نویز مشاهده از رابطه (۱۹) به دست می‌آید:

$$q_i = P[(y_k = y^*) | (x_k = x_{k,i}^-)] = P[v_k = y^* - h(x_{k,i}^-)] \quad (19)$$

۳- q_i ها با استفاده از رابطه (۲۰) نرمالیزه می‌شوند به طوری که مجموع تمام احتمال نسبی ذرات یک می‌شود:

$$q_i = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^N q_j} \quad (20)$$

۴- تخمین برای هر ذره با استفاده از یک الگوریتم باز نمونه‌برداری و استفاده از q_i ها به دست می‌آید که از الگوریتم باز نمونه‌برداری چندجمله‌ای استفاده شده است و توسط رابطه (۲۱) بیان شده است:

$$r = \text{Generate random number} \quad (21)$$

$$\sum_{m=1}^{j-1} q_m < r, \sum_{m=1}^j q_m \geq r \Rightarrow x_{k,i}^+ = x_{k,j}^-$$

۵- تخمین حالت نیز از رابطه (۲۲) که میانگین‌گیری

بین تخمین ذرات است به دست می‌آید:

$$x_k^+ = E(x_k | y_k) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{k,i}^+ \quad (22)$$

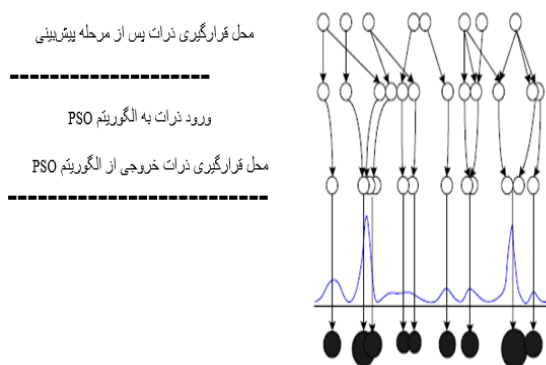
۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات در سال ۱۹۹۵ طراحی و معرفی شد [۴۲]. PSO یک الگوریتم جستجوی مبتنی بر

می‌شوند. مختصات ابتدایی هر ذره در PSO برابر با مختصات هر ذره از PF است و همچنین مقادیر تابع هدف اولیه هر ذره در PSO برابر وزن‌های هر ذره از PF است. تابع هدف در حلقه PSO به صورت رابطه زیر است:

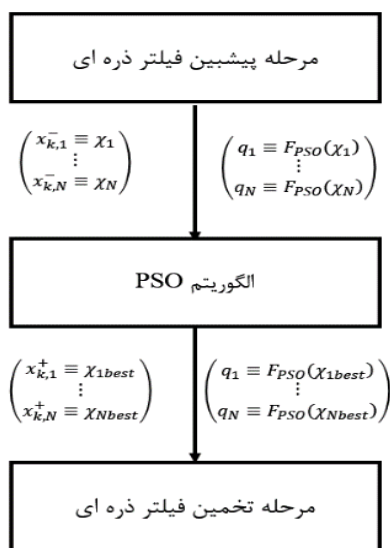
$$F_{PSO} = e^{-\frac{1}{2}(y_k - \hat{y}_k)^T R^{-1}(y_k - \hat{y}_k)} \quad (26)$$

F_{PSO} تابعی است که در ناحیه‌ای با تابع درست‌نمایی بالا بیشینه می‌شود و در آن، R ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری، \hat{y}_k اندازه‌گیری پیش‌بینی شده و y_k اندازه‌گیری واقعی است. نحوه عملکرد این الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): فرایند بهینه‌سازی PF با استفاده از الگوریتم PSO.

بلوک دیاگرام الگوریتم PSO-PF در زمان k در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): بلوک دیاگرام الگوریتم PSO-PF.

تصادفی و با تابع توزیع یکنواخت بین صفر و یک در هر مرحله تولید می‌شوند. w_{PSO} نیز بردار وزن است که تأثیر بردار سرعت در مرحله قبل را در بردار سرعت فعلی نشان می‌دهد که برابر با ۱ انتخاب می‌شود و در هر مرحله در عدد ۰/۹۹ ضرب می‌شود. حال اگر یکی از ابعاد ذره خارج از محدوده تعیین شده باشد، آنگاه مقدار آن با رابطه (۲۵) تغییر داده می‌شود تا در محدوده تعیین شده قرار بگیرد:

$$\chi_{ij} = \begin{cases} \chi_{ij} & \text{if } \chi_{lb_j} \leq \chi_{ij} \leq \chi_{ub_j} \\ \chi_{lb_j} & \text{if } \chi_{ij} < \chi_{lb_j} \\ \chi_{ub_j} & \text{if } \chi_{ij} > \chi_{ub_j} \end{cases} \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) χ_{ij} بعد از i ام ذره i ام است و χ_{ub_j} حد بالای بعد از j ام و χ_{lb_j} حد پایین بعد از j ام است. در ادامه و با جایگذاری موقعیت هر ذره در تابع هدف، اگر نتیجه به دست آمده از بهترین تجربه ذره و یا بهترین تجربه کلی ذرات بهتر باشد، موقعیت ذره در بهترین موقعیت ذره و یا بهترین موقعیت کلی ذرات جایگذاری می‌شود [۴۳].

۳-۳- تخمین هر ذره با استفاده از روش PSO-PF

چالش اصلی در استفاده از فیلتر ذره‌ای در مسئله تخمین حالات در سامانه‌های غیرخطی، انحراف ذرات است. عملیات نمونه‌برداری مجدد تا حدودی مسئله انحراف ذرات را حل می‌کند، اما در نهایت به پدیده فقر نمونه منجر می‌شود [۴۴]. بنابراین، با استفاده از الگوریتم PF به دلیل مشکل جدی فقر ذره، نمی‌توان به دقت مطلوبی با تعداد ذره‌های پایین دست یافت. برای جبران مسئله فقر ذره، از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات که یکی از الگوریتم‌های ابتکاری است، استفاده می‌شود. در این روش، PSO با PF ترکیب می‌شود [۴۴] تا باعث تنوع ذرات تعیین شده از PF شود. در این مقاله و در ادامه، ترکیب PSO با PF به صورت اختصاری PSO-PF به کار گرفته می‌شود. در ترکیب PSO با الگوریتم PF از یک طرف، این عملیات می‌تواند تنوع ذرات را از طریق عملیات تصادفی چندگانه حفظ کند. از سوی دیگر، این فرآیند باعث می‌شود که ذرات به نقطه‌ای تبدیل شوند که وزن بالاتری داشته باشد [۴۴]. در ادامه، ابتدا الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و سپس نحوه ترکیب این الگوریتم با PF تشریح می‌شود [۴۴]. در ترکیب PSO با PF، در هر مرحله ذرات تعیین شده در مرحله پیش‌بین فیلتر ذره‌ای به همراه وزن‌های تعیین شده برای هر ذره وارد حلقه PSO

۴- نتایج شبیه‌سازی

ذره‌ای با استفاده از رابطه (۱۲) تعیین می‌شود. در این پژوهش از مشخصات مغناطیس سنج HMC1001/1002 استفاده شده است [۴۸]. مقادیر پارامترهای حسگرها در جدول ۱ آورده شده است:

جدول (۱): مقادیر پارامترهای حسگرها.

انحراف معیار نویز	محدوده اندازه‌گیری حسگر	حسگر مورد استفاده	پارامتر اندازه‌گیری شده
۱۱/۲ deg/ sec	±۱۴۰۰۰ deg/ sec	ADIS۱۶۲۶۶	ω_{gx}
۰/۱ deg/ sec	±۱۰۰ deg/ sec	ADIS۱۶۲۶۰	ω_{gy} ω_{gz}
۸ μG	±۶ G	HMC۱۰۰۱ /۱۰۰۲	M_x M_y M_z

با اعمال مقادیر ذکر شده در جدول ۱ رابطه (۲۸) مقادیر عددی (۲۹) به دست می‌آید:

$$D_{\omega_k} = 0.005^2 * \begin{bmatrix} 11.2^2 + \tan(\theta_{h_k})^2 * 0.1^2 \\ 0.1^2 \\ \frac{0.1^2}{\cos(\theta_{h_k})^2} \\ 0.1^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

انحراف معیار نویز حسگرهای خروجی به صورت رابطه (۳۰) بدست می‌آید:

$$D_{\nu} = \begin{cases} DM_{sx} = (8\mu G)^2 \\ DM_{sy} = (8\mu G)^2 \\ DM_{sz} = (8\mu G)^2 \end{cases} \quad (30)$$

تابع توزیع احتمال $P(y_k = y^* | (x_k = x_{k,i}^-))$ نیز با توزیع گوسی و انحراف معیار $8 \mu G$ و میانگین صفر در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله پروفایل حرکتی مرجع [۶] شبیه‌سازی می‌شود که نمودارهای زاویه مرجع سه کانال غلت، فراز و سمت در شکل ۶ نشان داده شده است.

در این بخش نتایج شبیه‌سازی روابط و معادلات الگوریتم تشریح شده ارائه می‌شود. ابتدا نحوه اجرای فیلتر ذره‌ای بر روی الگوریتم تخمین زوایا با استفاده از مغناطیس‌سنج و ژيروسکوپ ارائه می‌شود. خروجی ژيروسکوپ، رابطه (۱۵)، به‌عنوان معادلات دینامیکی و خروجی مغناطیس‌سنج‌ها، رابطه (۱۳)، به‌عنوان معادلات مشاهده برای فیلتر ذره‌ای تعریف می‌شود. برای تعیین واریانس ω_k نویز در فیلتر ذره‌ای با ابتدا با استفاده از رابطه (۱۵) رابطه (۲۷) به‌دست می‌آید:

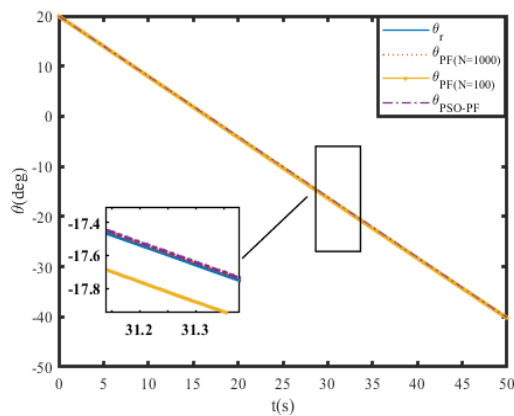
$$D_{\omega_k} = T_s^2 \begin{bmatrix} 1 & (\sin(\phi_k) \tan(\theta_k))^2 & (\cos(\phi_k) \tan(\theta_k))^2 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_k)^2 & (-\sin(\phi_k))^2 & 0 \\ 0 & (\frac{\sin(\phi_k)}{\cos(\theta_k)})^2 & (\frac{\cos(\phi_k)}{\cos(\theta_k)})^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{\omega_{gxk}} \\ D_{\omega_{gyk}} \\ D_{\omega_{gzk}} \\ D_{\nu|k|} \end{bmatrix} \quad (27)$$

حال با استفاده از رابطه (۲۷) و رابطه (۱۱) و (۱۰) ω_k به‌صورت رابطه (۲۸) به‌دست می‌آید:

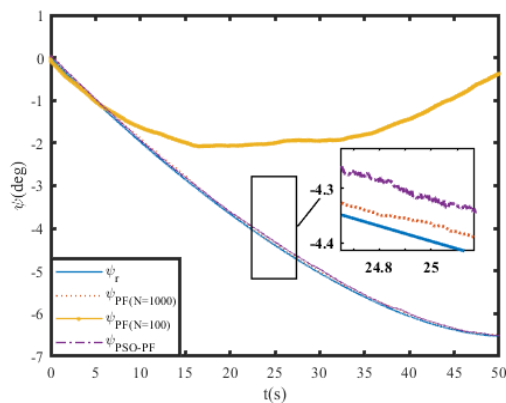
$$D_{\omega_k} = T_s^2 \begin{bmatrix} D_{gx} + \tan(\theta_{h_k})^2 D_g \\ D_g \\ \frac{D_g}{\cos(\theta_{h_k})^2} \\ D_{\nu|k|} \end{bmatrix} \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، T_s ثابت زمانی نمونه‌برداری است و همچنین D_{gx} واریانس نویز ژيروسکوپ در جهت x و D_g واریانس نویز ژيروسکوپ در جهت y, z که به‌دلیل این‌که ژيروسکوپ استفاده شده حول این دو محور یک ژيروسکوپ دومحوره است، مقدار واریانس نویز آن‌ها نیز یکسان است. ژيروسکوپ استفاده شده در جهت y, z یک ژيروسکوپ محدوده دینامیکی پایین با شماره سریال ADIS16260 می‌باشد [۴۵]. برای ژيروسکوپ در جهت x از یک ژيروسکوپ محدوده دینامیکی بالا استفاده می‌شود که برای این امر از ژيروسکوپ ADIS16266 با محدوده اندازه‌گیری ± 14000 درجه بر ثانیه استفاده شده است [۴۶].

$D_{\nu|k|}$ نیز واریانس تغییرات شدت میدان مغناطیسی است که بسیار آهسته است و با توجه به مرجع [۴۷] می‌توان برابر با 0.1 در نظر گرفت. واریانس ν_k نویز مشاهده در فیلتر

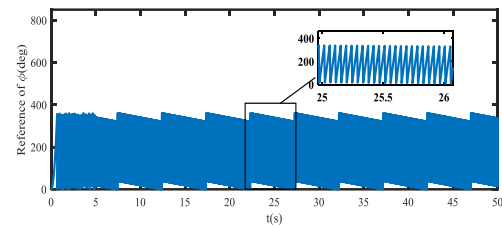


شکل (۸): زاویه فراز برای ۳ روش تخمین با نمودار مرجع.

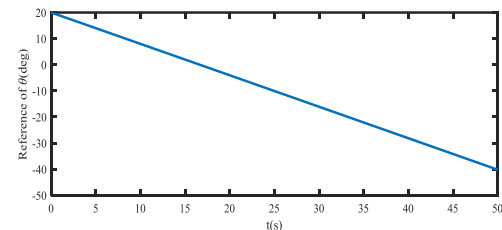


شکل (۹): زاویه سمت برای ۳ روش تخمین با نمودار مرجع.

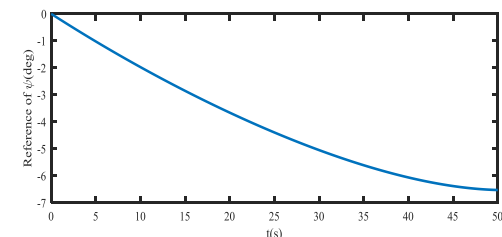
نتایج به‌ازای ۱۰۰ نمونه آزمایش (۵۰s) مورد بررسی قرار می‌گیرد تا کارایی الگوریتم به‌خوبی مورد ارزیابی قرار بگیرد. شبیه‌سازی فیلتر ذره‌ای در دو حالت ۱۰۰ ذره‌ای و ۱۰۰۰ ذره‌ای انجام شده است و همچنین شبیه‌سازی الگوریتم PSO-PF با شرایط ۲۰ ذره و ۱۰ بار تکرار حلقه PSO انجام گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این سه روش با نتایج حاصل از انتگرال‌گیری از ژيروسکوپ و نتایج مرجع [۲۷] مقایسه شده است. نتایج با ۳ معیار مدت‌زمان انجام محاسبات برای هر آزمایش، میانگین RMSE خطای زاویه برای ۱۰۰ نمونه آزمایش و میانگین بیشینه خطای ۱۰۰ آزمایش برای هر سه زاویه غلت، فراز و سمت مورد ارزیابی قرار گرفته است این نتایج در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ بهترین نتایج در هر سه زاویه مربوط به فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره است و بعد از آن مربوط به PSO-PF است. فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره نیز



(الف)



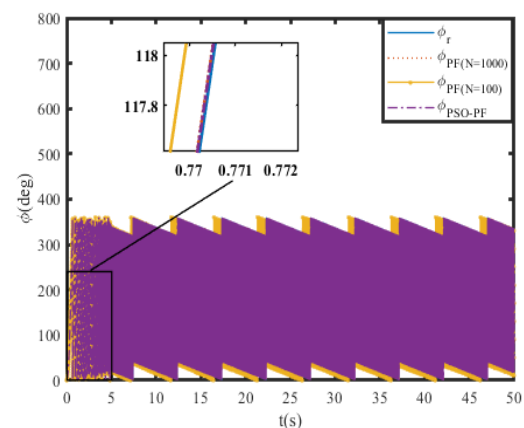
(ب)



(ج)

شکل (۶): نمودار زاویه مرجع سه کانال غلت، فراز و سمت.

سرعت زاویه‌ای غلت نزدیک به ۸۰۰۰ درجه بر ثانیه در نظر گرفته شده است. برای یک نمونه آزمایش، نتایج تخمین هر یک از سه زوایای غلت، فراز و سمت به همراه نمودار مرجع در نمودارهای ۷، ۸ و ۹ آورده شده است که تأییدی بر عملکرد مطلوب تخمین PSO-PF است.



شکل (۷): زاویه غلت برای ۳ روش تخمین با نمودار مرجع.

نتایج به دست آمده از PSO-PF که بسیار نزدیک به فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره است و مدت زمان انجام محاسبات کمتر این روش نسبت به دو روش فیلتر ذره‌ای می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین روش برای تخمین زوایا، روش PSO-PF است. نتایج به دست آمده از طریق ژيروسکوپ و همچنین نتایج گزارش شده در مرجع [۶] با این که دارای زمان انجام محاسبات کمتری هستند ولی اندازه‌گیری و تخمین زوایای به دست آمده از این سه روش نسبت به روش تخمین PSO-PF دارای دقت بسیار پایینی است.

نتایج مناسبی دارد. نتایج تخمین فیلتر ذره‌ای در مقایسه با نتایج گزارش شده در مرجع [۶] و همچنین خروجی ژيروسکوپ که با انتگرال‌گیری به دست می‌آید، بسیار بهتر است. اما بحثی که در اینجا مطرح است مدت زمان انجام محاسبات هر روش است که فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره با ۵۶۰ (s) دارای بیشترین مدت زمان انجام محاسبات است. همچنین فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره و PSO-PF نیز به ترتیب دارای مدت زمان ۴۱٫۲ و ۲۲٫۲ است که در مقایسه با فیلتر ذره‌ای ۱۰۰۰ بسیار کمتر است. همچنین با توجه به

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف الگوریتم مبتنی بر مغناطیس سنج.

زمان انجام محاسبات (s)	میانگین RMSE خطا (deg)			میانگین بیشینه خطا (deg)			روش اندازه‌گیری یا تخمین
	φ	θ	ϕ	φ	θ	ϕ	
۴۱/۲	۰/۱۶۹	۰/۰۲۸	۰/۴۰۰	۰/۳۳۹	۰/۰۵۵	۱/۱۸۶	فیلتر ذره‌ای $N=100$
۵۶۰	۰/۰۴۱	۰/۰۱۲	۰/۰۷۲	۰/۰۸۰	۰/۰۲۳	۰/۲۵۵	فیلتر ذره‌ای $N=1000$
۲۲/۲	۰/۰۴۴	۰/۰۱۲	۰/۰۸۲	۰/۰۹۰	۰/۰۳۰	۰/۳۲۴	PSO-PF ($N=20, n_{PSO}=10$)
۱/۵	۱/۵۱۶	۰/۱۶۶	۳/۷۲۱	۳/۲۳۹	۰/۲۹۶	۷/۴۲۵	اندازه‌گیری از ژيروسکوپ
۴/۹ [۶]	۰/۲۸ [۶]	۰/۷۶ [۶]	۱/۵۲ [۶]	-	-	-	EKF از مرجع [۶]
۱۸/۹ [۶]	۰/۲۳ [۶]	۰/۶۹ [۶]	۱/۱ [۶]	-	-	-	UKF از مرجع [۶]

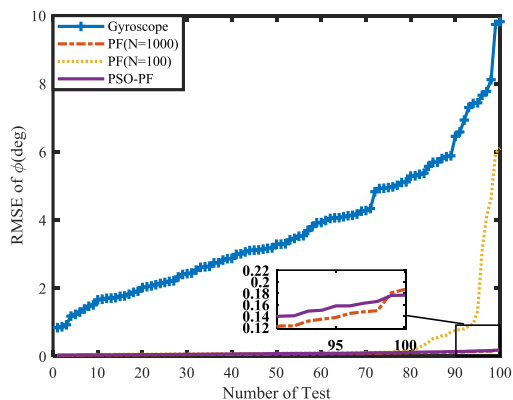
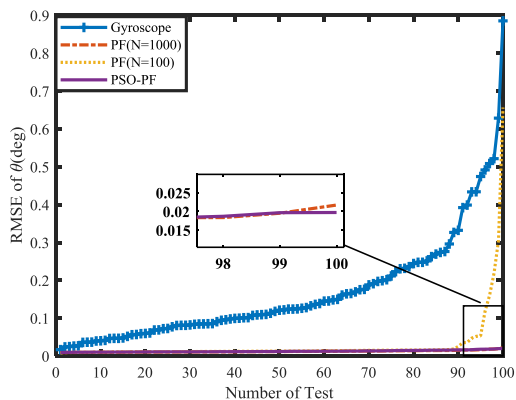
روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره در محدوده (deg) ۰/۶ و برای روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۷ باقی می‌ماند.

همچنین RMSE خطای زاویه‌ی غلت این دو روش در محدوده کمتر از (deg) ۰/۲ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده دارای پاسخ مناسبی نیستند به طوری که برای این نمونه داده‌ها حتی خطای زاویه‌ای غلت تا (deg) ۱۰ هم می‌رسد که دلیل این امر تعداد پایین ذرات و مسئله فقر ذره است. در نمودار مربوط به خروجی ژيروسکوپ برای اکثر نمونه آزمایش‌ها، خطای زاویه‌ای مناسبی حاصل نمی‌شود و خطای زاویه‌ای در محدوده (deg) ۲۰ قرار دارد.

در شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودار RMSE خطای زاویه غلت و نمودار بیشینه خطای زاویه غلت ۱۰۰ نمونه آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای چهار روش اندازه‌گیری و تخمین شامل فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره، فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره، روش PSO-PF و انتگرال‌گیری از خروجی ژيروسکوپ آورده شده است.

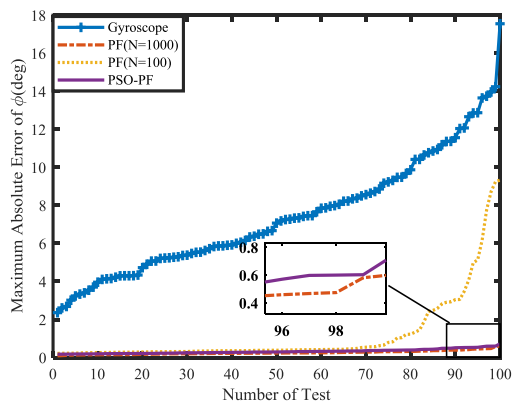
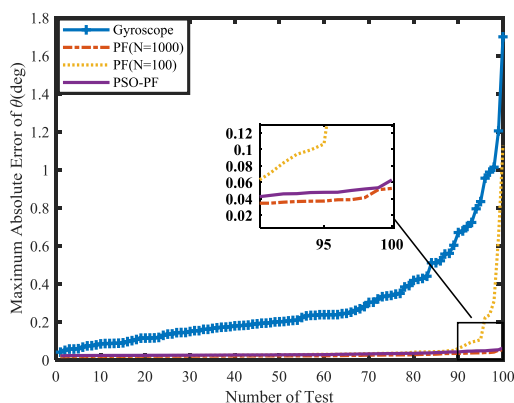
در هر دو شکل مقادیر از کوچک به بزرگ برای ۱۰۰ نمونه آزمایش مرتب شده است. همان‌طور که در این دو نمودار مشخص است نتایج فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره و روش PSO-PF بسیار بهتر از دو روش دیگر است. برای ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای بیشینه خطای زاویه‌ای برای

آزمایش‌ها، خطای زاویه‌ای مناسبی حاصل نمی‌شود و خطای زاویه‌ای در محدوده (deg) ۱/۸ قرار دارد.



شکل (۱۰): نمودار RMSE خطای زاویه غلت ۱۰۰ نمونه آزمایش برای ۴ روش اندازه‌گیری.

شکل (۱۲): نمودار RMSE خطای زاویه فراز ۱۰۰ نمونه آزمایش برای ۴ روش اندازه‌گیری.



شکل (۱۱): نمودار بیشینه خطای زاویه غلت ۱۰۰ نمونه آزمایش برای ۴ روش اندازه‌گیری.

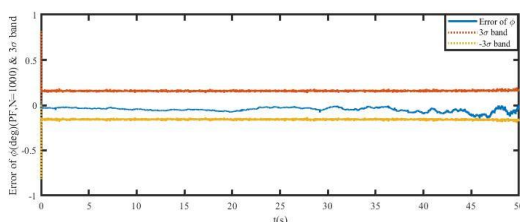
شکل (۱۳): نمودار بیشینه خطای زاویه فراز ۱۰۰ نمونه آزمایش برای ۴ روش اندازه‌گیری.

همانند زاویه غلت و فراز برای کانال سمت دو شکل ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این دو نمودار مشخص است نتایج فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره و روش PSO-PF بسیار بهتر از دو روش دیگر است. برای ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای بیشینه خطای زاویه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره در محدوده (deg) ۰/۵ و برای روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۶ باقی می‌ماند. همچنین خطای زاویه فراز این دو روش در محدوده (deg) ۰/۲۵ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۲ باقی می‌ماند. همچنین خطای زاویه‌ای سمت این دو روش در محدوده (deg) ۰/۱ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۱ باقی می‌ماند. همچنین خطای زاویه‌ای سمت این دو روش در محدوده (deg) ۰/۱ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۲ باقی می‌ماند. همچنین خطای زاویه‌ای سمت این دو روش در محدوده (deg) ۰/۱ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۲ باقی می‌ماند.

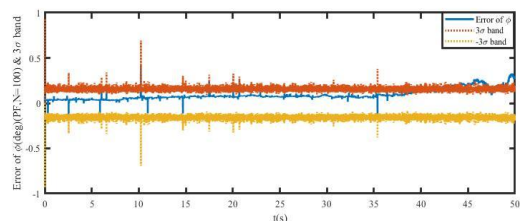
همانند زاویه غلت برای زاویه فراز دو شکل ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این دو نمودار مشخص است نتایج فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره و روش PSO-PF بسیار بهتر از دو روش دیگر است. برای ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای بیشینه خطای زاویه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره در محدوده (deg) ۰/۵ و برای روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۶ باقی می‌ماند. همچنین خطای زاویه فراز این دو روش در محدوده (deg) ۰/۲۵ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۲ باقی می‌ماند. همچنین خطای زاویه‌ای سمت این دو روش در محدوده (deg) ۰/۱ است که بسیار بهتر از دو روش دیگر است. در فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره چند نمونه از ۱۰۰ نمونه داده آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای برای روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره روش PSO-PF در محدوده (deg) ۰/۲ باقی می‌ماند.

نتایج تقریباً مشابهی با این روش دارد. در ادامه مقایسه‌های بین سه روش PSO-PF، ۱۰۰ ذره‌ای و ۱۰۰۰ ذره‌ای با توجه به معیار باند فرکانسی سه سیگما و خطای تخمین برای هر سه زاویه غلت، فراز و سمت با ارائه سه نمودار انجام می‌گیرد که این معیار نیز نشان‌دهنده عملکرد بهتر PSO-PF است.

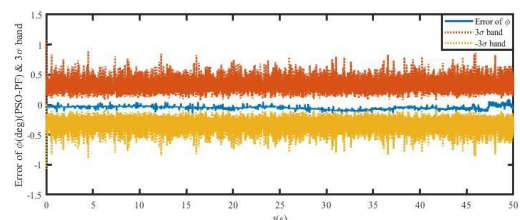
در شکل ۱۶ نمودار خطای تخمین زاویه غلت و باند سه سیگما برای سه حالت PSO-PF، ۱۰۰ ذره‌ای و ۱۰۰۰ ذره‌ای نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، خطای تخمین ۱۰۰۰ ذره‌ای و PSO-PF به‌خوبی در باند سه سیگما قرار می‌گیرد که تأییدی بر عملکرد مناسب این تخمینگر است درحالی‌که خطای تخمین ۱۰۰ ذره‌ای در زمان‌هایی خارج از این باند قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده عملکرد غیر مطلوب این تخمینگر است.



(الف)



(ب)

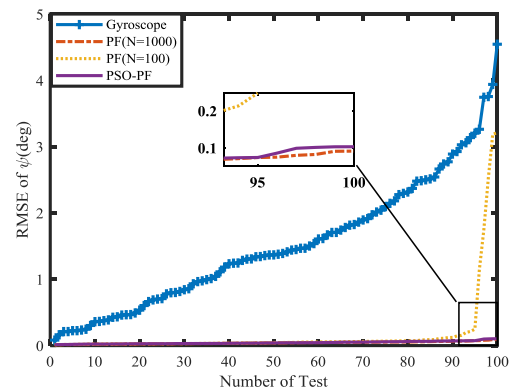


(ج)

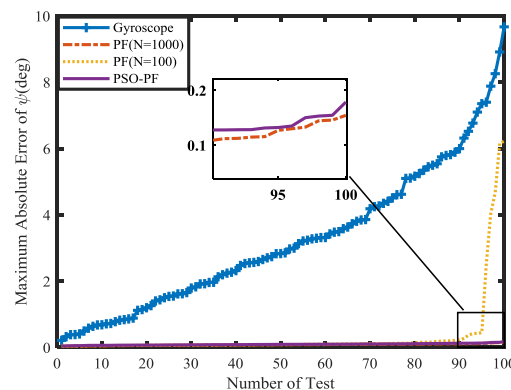
شکل (۱۶): نمودار خطای تخمین زاویه غلت و باند سه سیگما.

در شکل ۱۷ نمودار خطای تخمین زاویه فراز و باند سه سیگما و در شکل ۱۸ نمودار خطای تخمین زاویه فراز و سمت و باند سه سیگما برای سه حالت PSO-PF، ۱۰۰ ذره‌ای و ۱۰۰۰ ذره‌ای نمایش داده شده است.

می‌رسد که دلیل این امر تعداد پایین ذرات و مسئله فقر ذره است. در نمودار مربوط به خروجی ژيروسکوپ برای اکثر نمونه آزمایش‌ها، خطای زاویه‌ای مناسبی حاصل نمی‌شود.



شکل (۱۴): نمودار RMSE خطای زاویه سمت ۱۰۰ نمونه آزمایش برای ۴ روش اندازه‌گیری.

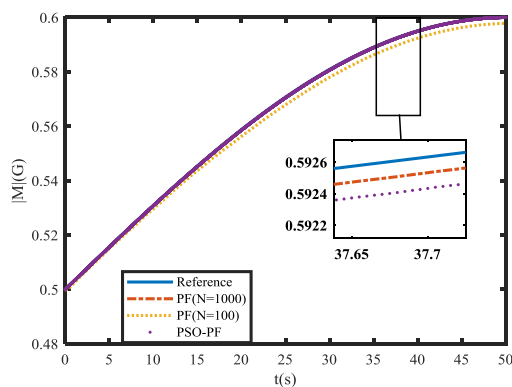


شکل (۱۵): نمودار بیشینه خطای زاویه سمت ۱۰۰ نمونه آزمایش برای ۴ روش اندازه‌گیری.

پس به‌طور کلی می‌توان گفت برای هر سه زاویه غلت، فراز و سمت نتایج مربوط به انتگرال‌گیری از ژيروسکوپ غیردقیق و نامناسب است و همچنین خطای زاویه‌ای به مرور زمان در حال افزایش است. در مورد نتایج تخمین حاصل از فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره می‌توان گفت که این روش تخمین برای اکثر آزمایش‌ها دارای پاسخ مناسبی است ولی نه برای تمامی آزمایش‌ها که دلیل آن مسئله فقر ذره است و نشان‌دهنده این است که فیلتر ذره‌ای با تعداد ۱۰۰ ذره قابل اعتماد نیست. اما بهترین روش برای هر سه زاویه با در نظر گرفتن مدت‌زمان انجام محاسبات روش تخمین PSO-PF است که برای تمامی ۱۰۰ آزمایش نتایج مناسب و با دقت بالا دارد و مدت‌زمان انجام محاسبات آن بسیار کمتر از روش فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره است، ولی

همان‌طور که در این دو شکل نشان داده شده است و همانند زاویه غلت خطای تخمین زاویه فراز و سمت PSO-PF و ۱۰۰۰ ذره‌ای به‌خوبی در باند سه سیگما قرار می‌گیرد که تأییدی بر عملکرد مناسب این تخمین‌گر است در حالی که خطای تخمین زاویه فراز و سمت ۱۰۰ ذره‌ای در زمان‌هایی خارج از این باند قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده عملکرد غیر مطلوب این تخمین‌گر است.

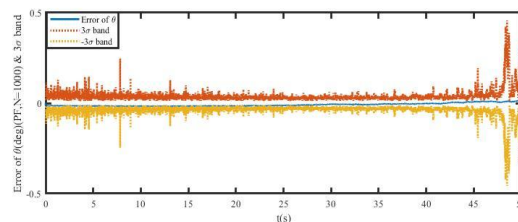
در شکل ۱۹ نمودار واقعی و تخمین تغییرات میدان مغناطیسی زمین در طول حرکت پرتابه توسط سه روش PSO-PF، ۱۰۰ ذره‌ای و ۱۰۰۰ ذره‌ای نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل نیز مشخص است میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده توسط روش ۱۰۰۰ ذره‌ای و PSO-PF بسیار دقیق‌تر از حالت ۱۰۰ ذره‌ای است.



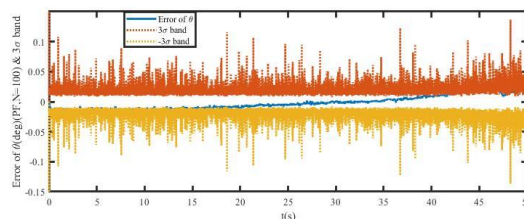
شکل (۱۹): میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده و واقعی زمین

۵- نتیجه‌گیری

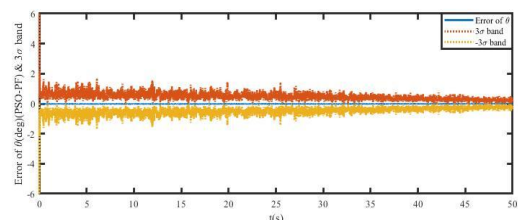
در این پژوهش، با استفاده از تلفیق خروجی مغناطیس‌سنج‌ها و ژيروسکوپ‌های ارزان‌قیمت سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی، وضعیت پرتابه‌های با سرعت بالا تخمین زده شد. به دلیل غیرخطی بودن معادلات دینامیکی و مشاهده برای تلفیق داده حسگرها از فیلتر ذره‌ای استفاده شد. همچنین، برای کاهش بار محاسباتی و بهبود عملکرد زمان حقیقی فیلتر ذره‌ای در حل مسئله تلفیق اطلاعات از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات در مرحله نمونه‌برداری فیلتر ذره‌ای استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی برای ۱۰۰ نمونه آزمایش ۵۰ ثانیه‌ای و برای سه سناریو تخمین شامل: فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰ ذره، فیلتر ذره‌ای با ۱۰۰۰ ذره و فیلتر ذره‌ای ترکیب‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با ۲۰ ذره



(الف)

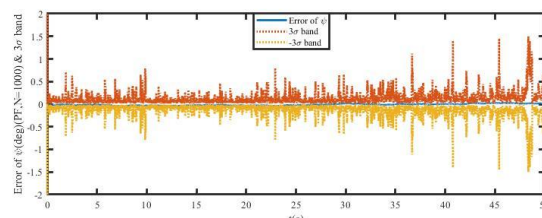


(ب)

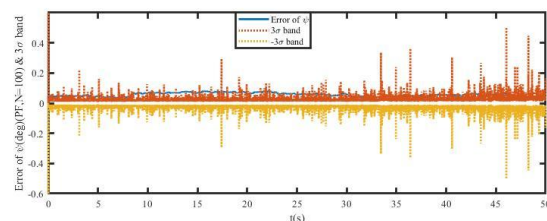


(ج)

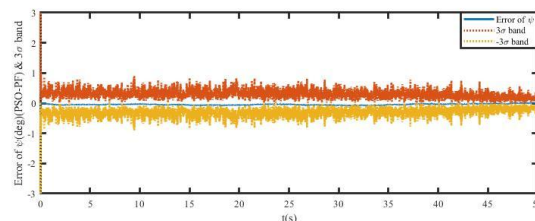
شکل (۱۷): نمودار خطای تخمین زاویه فراز و باند سه سیگما.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۸): خطای تخمین زاویه سمت و باند سه سیگما.

- Sensors,” in Acquisition, tracking, and pointing XIV, 2000, vol. 4025, pp. 68–78.
12. Harkins TE, Hepner DJ, “MAGSONDE: A Device for Making Angular Measurements on Spinning Projectiles with Magnetic Sensors,” 2000.
 13. Harkins TE, Davis BS, Hepner DJ, “Novel Onboard Sensor Systems for Making Angular Measurements on Spinning Projectiles,” in Acquisition, Tracking, and Pointing XV, 2001, vol. 4365, pp. 176–187.
 14. Li D, Bu X-Z, “Attitude Measurement on High-Spinning Projectile Using Magnetic Sensors and Accelerometers,” Trans. Nanjing Univ. Aeronaut. Astronaut., vol. 25, no. 2, pp. 106–112, 2008.
 15. Liu X, “An Improved Interpolation Method for Wind Power Curves,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 3, pp. 528–534, 2012.
 16. Li X, Li Z, “A New Calibration Method for Tri-axial Field Sensors in Strap-down Navigation Systems,” Meas. Sci. Technol., vol. 23, no. 10, p. 105105, 2012.
 17. Yu H, Honglun W, “Application of Tracking-Differentiator in Angular Measurements on Spinning Projectiles Using Magnetic Sensors,” in 2015 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2015, vol. 1, pp. 433–436.
 18. Zhu J, Wu P, Bo Y, “A Novel Attitude Estimation Algorithm Based on the Non-orthogonal Magnetic Sensors,” Sensors, vol. 16, no. 5, p. 730, 2016.
 19. Qi KY, Xiang C, Bu XZ, Yu J, “Analysis of Theory and Model of Background Magnetic Field of High-spinning Projectile,” in Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 556, pp. 1954–1958.
 20. Yu J, Bu X, Xiang C, Wang X, “Spinning Projectile’s Attitude Measurement Using Background Magnetic Field Compensation,” J. Appl. Remote Sens., vol. 10, no. 1, p. 14001, 2016.
 21. Zhu R, Sun D, Zhou Z, Wang D, “A Linear Fusion Algorithm for Attitude Determination Using Low Cost MEMS-based Sensors,” Measurement, vol. 40, no. 3, pp. 322–328, 2007.
 22. Zeng Z, Zhang S, Xing Y, Cao X, “Robust Adaptive Filter for Small Satellite Attitude Estimation Based on Magnetometer and Gyro,” in Abstract and Applied Analysis, 2014, vol. 2014.
 23. Miao C, Zhang Q, Fang J, Lei X, “Design of Orientation Estimation System by Inertial and Magnetic Sensors,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng., vol. 228, no. 7, pp. 1105–1113, 2014.
 24. Mohammad-Hoseni S, Seifi, M, “Error Rate Reduction of a Low-Cost Integrated Navigation System Using Neural Networks,” J. Mech. Aerosp., vol. 15, no. 3, pp. 305–320 (In Persian).
 25. Li C, Wang L, Li X, “Method of Attitude-Aided magnetometers/SINS/GNSS integration,” in 2013 6th international conference on information management, innovation management and industrial engineering, 2013, vol. 1, pp. 304–308.
 26. Zhao H, Wang Z, “Motion Measurement Using Inertial Sensors, Ultrasonic Sensors, and Magnetometers with Extended Kalman Filter for Data

ارائه شد. نتایج خطای زاویه‌ای هر سه کانال غلت، فراز و سمت با خروجی حاصل از ژيروسکوپ که با انتگرال‌گیری به‌دست آمده است، مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف، با سه معیار مدت‌زمان انجام محاسبات، میانگین جذر مربعات خطا و میانگین بیشینه خطا ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد در مسئله تلفیق اطلاعات ژيروسکوپ و مغناطیس‌سنج، فیلتر ذره‌ای ترکیب‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد.

۶- مراجع

1. Guo C, Cai H, Hu Z, “Nonlinear Filtering Techniques for Geomagnetic Navigation,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng., vol. 228, no. 2, pp. 305–320, 2014.
2. Park SG, Jeong HC, Kim JW, Hwang D-H, Lee SJ, “Magnetic Compass Fault Detection Method for GPS/INS/Magnetic Compass Integrated Navigation Systems,” Int. J. Control. Autom. Syst., vol. 9, no. 2, p. 276, 2011.
3. Rogers J, Costello M, Harkins T, Hamaoui M, “Effective Use of Magnetometer Feedback for Smart Projectile Applications,” Navigation, vol. 58, no. 3, pp. 203–219, 2011.
4. Zhao W, Bu X, Yu G, Xiang C, “Feedback-Type Giant Magneto-Impedance Sensor Based on Longitudinal Excitation,” J. Magn. Magn. Mater., vol. 324, no. 19, pp. 3073–3077, 2012.
5. Včelák J, Kubík J, “Influence of Sensor Imperfections to Electronic Compass Attitude Accuracy,” Sensors Actuators A Phys., vol. 155, no. 2, pp. 233–240, 2009.
6. Long DF, Lin J, Zhang XM, Li J, “Orientation Estimation Algorithm Applied to High-Spin Projectiles,” Meas. Sci. Technol., vol. 25, no. 6, p. 65001, 2014.
7. Xiang C, Bu XZ, Zhu YP, “Design of New Attitude Measuring Method of Non-Spinning Projectile Based on Magnetic Sensors,” in Applied Mechanics and Materials, 2012, vol. 226, pp. 1825–1828.
8. Xiang C, Bu X, Yang B, “Three Different Attitude Measurements of Spinning Projectile Based on Magnetic Sensors,” Measurement, vol. 47, pp. 331–340, 2014.
9. Li D, Bu X-Z, “Roll Angle Measurement of Spinning Projectile Based on Non-orthogonal Magnetic Sensors,” Acta Armamentarii, vol. 31, no. 10, pp. 1316–1321, 2010.
10. Yu J, Bu X, Xiang C, Yang B, “Spinning Projectile’s Attitude Measurement Using Intersection Ratio of Magnetic Sensors,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng., vol. 231, no. 5, pp. 866–876, 2017.
11. Hepner DJ, Harkins TE, “Determining Inertial Orientation of a Spinning Body with Body-Fixed

38. Kiani M, Pourtakdoust SH, Sheikhy AA, "Consistent Calibration of Magnetometers for Nonlinear Attitude Determination," *Measurement*, vol. 73, pp. 180–190, 2015.
39. Yu J, Ding F, Zhao X, Zhou F, "Error Compensation Method of Magnetometer for Attitude Measurement Using Modified Artificial Bee Colony Algorithm," in 2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 2017, vol. 2, pp. 348–351.
40. Söken HE, Sakai S, "Real-time Attitude-Independent Magnetometer Bias Estimation for Spinning Spacecraft," *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 41, no. 1, pp. 276–279, 2017.
41. Abiri, A, Mahzoun, MR, "Aerial Moving Target Tracking using Kernel Density Estimation Based on Particle Filter Algorithm," *Tabriz J. Electr. Eng Persian*, vol. 45, no. 3, p. (In Persian).
42. Eberhart R, Kennedy J, "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory," *Hum. Sci. 1995. MHS'95.*, ..., 1995.
43. Juárez-Castillo E, Acosta-Mesa H-G, Mezura-Montes E, "Empirical Study of Bound Constraint-handling Methods in Particle Swarm Optimization for Constrained Search Spaces," in 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2017, pp. 604–611.
44. Zhang G, Cheng Y, Yang F, Pan Q. Pan, "Particle Filter Based on PSO," in 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2008, vol. 1, pp. 121–124.
45. VCC DIO, "Programmable Digital Gyroscope Sensor Data Sheet ADIS16260ADIS16265," vol., no., p. .
46. Devices A, "DEVICES, Analog. ADIS16266 datasheet. USA: Analog Devices," vol., no., p. .
47. Jacobs JA, "Geomagnetism. Vol. 4.," in *Geomagnetism*, 1991, vol. 4.
48. Jacobs JA, "Sensor Product. HMC1001/1002 datasheet," Honeywell, vol., no., p. .
27. Kao CF, Chen TL, "Design and Analysis of an Orientation Estimation System Using Coplanar Gyro-free Inertial Measurement Unit and Magnetic Sensors," *Sensors actuators A Phys.*, vol. 144, no. 2, pp. 251–262, 2008.
28. Simon D, *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*. 2006.
29. Arulampalam B, *Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications*. 2004.
30. Havangi R, Teshnehlab M, Nekoui MA, Taghirad H, "A Study of Estimation Problem from Viewpoint of Conditional Optimization and Designing of Evolutionary Estimator," *Aerosp. Mech. J*, vol. 7, no. 1, pp. 27–40(In persian).
31. Higuchi T, "Monte Carlo Filter Using the Genetic Algorithm Operators," *J. Stat. Comput. Simul.*, vol. 59, no. 1, pp. 1–23, 1997.
32. Kwok NM, Fang G, Zhou W, "Evolutionary Particle Filter: Re-sampling from the Genetic Algorithm Perspective," in 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, pp. 2935–2940.
33. Park S, Hwang J, Rou K, Kim E, "A New Particle Filter Inspired by Biological Evolution: Genetic Filter," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 33, pp. 83–87, 2007.
34. Tong G, Fang Z, Xu X, "A Particle Swarm Optimized Particle Filter for Nonlinear System State Estimation," in 2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 2006, pp. 438–442.
35. Zheng Y, Meng Y, "Swarming Particles with Multi-feature Model for Free-selected Object Tracking," in 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, pp. 2553–2558.
36. Havangi R, Nekoui MA, Teshnehlab M, "A Multi Swarm Particle Filter for Mobile Robot Localization," *Int. J. Comput. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 15–22, 2010.
37. Pang H, Pan M, Chen J, Li J, Zhang Q, Luo S, "Integrated Calibration and Magnetic Disturbance Compensation of Three-axis Magnetometers," *Measurement*, vol. 93, pp. 409–413, 2016.
27. Kao CF, Chen TL, "Design and Analysis of an Orientation Estimation System Using Coplanar Gyro-free Inertial Measurement Unit and Magnetic Sensors," *Sensors actuators A Phys.*, vol. 144, no. 2, pp. 251–262, 2008.