

شناسایی خطا و کالیبراسیون تجربی سیستم میکروالکترومکانیکی

شیخی علی اکبر^{1*}، پورتاکدوست سید حسین²، کیانی مریم³

1- دانشجوی کارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

2- استاد دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

3- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت مقاله: 1393/11/10 تاریخ پذیرش: 1394/03/24)

چکیده

با گسترش روز افزون تکنولوژی و توسعه سنسورهای میکروالکترومکانیکی در کنار الگوریتم‌های تخمین پیشرفته، کاربری این گونه سنسورها رشد چشمگیری یافته است. با این وجود، به خاطر خطای زیاد سنسورهای میکروالکترومکانیکی، ناوبری مبتنی بر این سنسورها نیازمند شناسایی خطاها و کالیبراسیون آنها می‌باشد. از این رو، در این مقاله شناسایی خطا و کالیبراسیون تجربی سنسورهای اینرسی میکروالکترومکانیکی شتاب‌سنج و ژيروسکوپ مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، با طراحی و انجام تست‌هایی بر روی یک ماژول آردوینو، خطای تصادفی سنسورهای این ماژول به کمک روش آلن واریانس به عنوان مناسب‌ترین روش از دیدگاه سادگی پیاده‌سازی و قابل فهم بودن نتایج، شناسایی شده است. سپس پارامترهای خطا اعم از ضرایب مقیاس، بایاس و ضرایب عدم هم‌ترازی این سنسورها با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات وزنی محاسبه شده است. آنگاه از تولید کره خطا برای صحت کالیبراسیون سنسور استفاده شده است. **واژه‌های کلیدی:** سیستم میکروالکترومکانیکی، آلن واریانس، شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، حداقل مربعات وزنی

Experimental Calibration and Error Identification of Micro Electro-Mechanical Systems

Abstract

Rapid growth in development of Micro Electro-Mechanical Sensors (MEMS) as well as wide utilization of advanced estimation algorithms have increased application of MEMS in various fields. However, MEMS-based navigation is not efficient without an appropriate sensor calibration due to large amount of MEMS errors. Therefore, error identification and sensor calibration of micro electro-mechanical inertial sensors of gyroscopes and accelerometers have been investigated in the present paper. In this regard, Allan variance as a simple and understandable method has been adopted to identify stochastic errors of the inertial sensors. Then, all error parameters including scale factors, biases, and misalignments have been determined utilizing weighted least square method. Finally, the presentation of error sphere has shown the performance and viability of the inertial MEMS calibration process.

Key words: *Micro Electro-Mechanical systems, Allan variance, Accelerometer, Gyroscope, Weighted least squares.*

مقدمه

حسگرهای میکروالکترومکانیکی (MEMS) قادرند مقادیر شتاب، سرعت زاویه‌ای، زاویای اویلر، فشار، طول و عرض جغرافیایی را اندازه‌گیری کنند. با این وجود دقت این سیستم‌ها با زمان رو به کاهش خواهد بود. همچنین تحت تأثیر ترکیب داده‌ها، اندازه‌گیری‌ها آغشته به انواع مختلف منابع خطا، از قبیل اغتشاش سنسور، تغییرات بایاس و ناپایداری ضریب انحراف و لغزش می‌باشد. خطاها به مجموعه داده‌های اینرسی که از الگوریتم‌های ناوبری به دست می‌آیند اضافه شده سبب می‌شود داده‌های خروجی ناوبری از مقدار دقیق واقعی اختلاف داشته باشند [1]. بزرگترین مشکل MEMS خطاهای زیاد آن است که با روش‌های گوناگون میانگین‌گیری کاهش می‌یابند. ژائو [2] جهت شناسایی خطای سیستم ناوبری تلفیقی GPS/INS، از مدل‌سازی خطاها به عنوان فرآیند گاوس مارکو و روش رگرسیون جهت شناسایی آن‌ها استفاده کرده است. تمامی اطلاعات مورد نیاز سیستم‌های کنترلی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از سیستم اندازه‌گیری تأمین می‌شود، لذا دقت اندازه‌گیری فاکتوری مهم در عملکرد کلی سیستم‌های ناوبری و کنترل یک وسیله محسوب می‌گردد. از این رو دسترسی به اندازه‌گیری دقیق با استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری ارزان همواره چالشی فراروی مهندسی در تمامی عرصه‌ها بوده است. در مراجع کمتر از فیلترهای توانمند برای کالیبراسیون سیستم‌های اندازه‌گیری بهره گرفته شده است. از این رو، پروژه حاضر به کالیبراسیون سیستم اندازه‌گیری ارزان قیمت با استفاده از الگوریتم‌های فیلترینگ می‌پردازد تا خروجی‌های دقیق‌تری در اختیار سیستم کنترل قرار دهد. در این مقاله پس از مقدمه، ابتدا شناسایی خطای تصادفی سنسورها به کمک روش آلن واریانس شرح داده شده و سپس ماژول تست معرفی شده و خطاهای شناسایی شده این سنسورها ارائه شده است. در ادامه، کالیبراسیون پارامترهای خطای اندازه‌گیری اعم از ضرایب مقیاس، بایاس و ضرایب عدم همترازی به کمک روش الگوریتم حداقل مربعات خطی طی تست‌های متعدد طراحی شده توصیف شده و نتایج به دست آمده برای سنسورهای مورد بررسی ارائه می‌گردد. بخش پایانی نیز بیان مختصری از نتایج می‌باشد.

شناسایی خطای تصادفی

روش منحنی آلن واریانس یکی از عمومی‌ترین و پرکاربردترین ابزار است که برای تحلیل مشخصات اغتشاش شتاب‌سنج‌ها و ژایروسکوپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [3 و 4]. این واریانس به عنوان نیمی از متوسط زمانی مربعات اختلاف بین اندازه‌گیری‌های پی‌درپی انحراف فرکانس نمونه‌برداری شده در طول دوره نمونه‌برداری تعریف می‌شود.

بنا به تحقیقات انجام شده، آلن واریانس یک روش تحلیل در حوزه زمان است که براساس استاندارد جهانی IEEE برای ژایروسکوپ‌ها به شماره استاندارد IEEE STD 647.2006 ارائه شده است [5، 6 و 7].

تابع طیف توان (PSD) یکی دیگر از روش‌های موجود برای شناسایی خطای یک سیگنال می‌باشد. PSD را می‌توان در فرآیندی به صورت زیر محاسبه کرد: رابطه (1)، P ، توان سیگنال $x(t)$ و رابطه (2) تبدیل فوریه سیگنال $x(t)$ و در آخر نیز فرمول (3)، PSD سیگنال را در اختیار قرار می‌دهد.

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)^2 dt \quad (1)$$

$$\hat{x}_T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_0^T x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} E[|\hat{x}_T(\omega)|^2]. \quad (3)$$

آلن واریانس در مقایسه با تابع چگالی طیف توان از پیچیدگی کمتری برای تحلیل یک سیگنال برخوردار است. حال به روابط موجود که جهت محاسبات آلن واریانس استفاده شده است می‌پردازیم [8 و 9].

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi\tau f)}{(\pi\tau f)} df \quad (4)$$

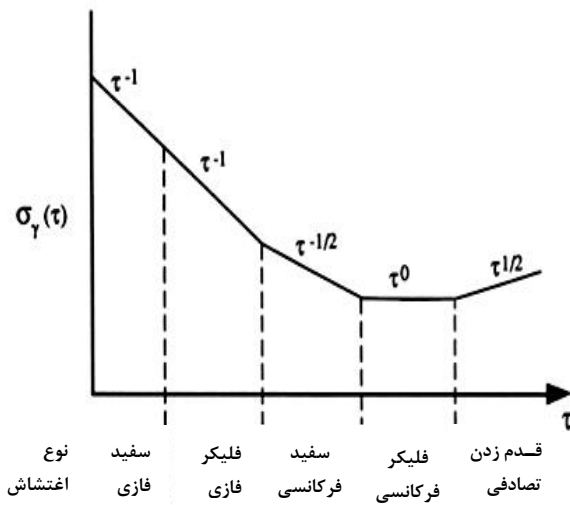
البته باید توجه نمود که رابطه (4) را می‌توان بسط داد و به فرم رابطه (5) تبدیل نمود.

$$\sigma_y^2(\tau, N) = \frac{1}{2\tau^2(N-2)} \sum_{i=0}^{N-3} (X_{i+2} - 2X_{i+1} + X_i)^2 \quad (5)$$

که در آن:

- N تعداد نمونه‌ها از دنباله زمانی،

مثبت شدن شیب با مقدار $\tau^{1/2}$ اغتشاش سنسور دارای مدل قدم‌زدن تصادفی است.



شکل 1- نمونه منحنی تحلیلی نتیجه داده‌ها با واریانس آلن

معرفی ماژول تست مورد آزمون

در مدارات مجتمع قرار گرفته بر روی برد MEMS آردوینو مورد بررسی (شکل 2)، شتاب‌سنج ADXL335 به اندازه‌گیری شتاب در راستای هر سه محور می‌پردازد. از دیگر قابلیت‌های ADXL335 می‌توان به توانایی اندازه‌گیری در محدوده $\pm 3g$ اشاره نمود.

مجموعه حسگر سرعت زاویه‌ای برد آردینو متشکل از یک سنسور IDG500، یک سنسور ژایروسکوپ دو محور X-Y که در آن یک فیلتر پایین‌گذر سخت افزاری استفاده شده است، و یک سنسور ISZ500 که برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای در امتداد محور Z مورد استفاده قرار می‌گیرد. حساسیت دمایی سنسور IDG500 در بازه -20 تا +85 درجه سانتی‌گراد، 4 میلی‌ولت بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

مراحل مختلف تست‌های انجام شده

نتایج به دست آمده در این بخش حاصل یک داده‌برداری استاتیک پنج ساعته از شتاب‌سنج و ژایروسکوپ است که به صورت سریال و از طریق ماژول‌های Xbee pro به صورت بی‌سیم با فرکانس داده‌برداری صد هرتز در اختیار قرار گرفته است.

• τ میانگین زمانی در واحد ثانیه و

• X دنباله زمانی خروجی اندازه‌گیری شده سنسور است.

به‌عنوان مثال، خروجی ژایروسکوپ متأثر از چندین مدل اغتشاش است. مدل‌های غالب اغتشاش عبارتند از: اختلال تدریجی، نرخ قدم‌زدن تصادفی، زاویه قدم‌زدن تصادفی، پایداری بایاس و نرخ شیب. اگر منابع اغتشاش مستقل آماری باشند، در این صورت واریانس آلن همان‌طور که رابطه (6) نشان می‌دهد، مجموعی از مربعات واریانس‌های هر یک از خطاها می‌باشد:

$$\sigma^2(\tau) = \sigma_{acc}^2(\tau) + \sigma_b^2(\tau) + \sigma_{mv}^2(\tau) + \sigma_r^2(\tau) \quad (6)$$

جدول 1 انواع خطاهای تصادفی ژایروها و شتاب‌سنج‌ها را به کمک واریانس آلن توصیف می‌کند (استاندارد 1997- IEEE STD 952TM برای شتاب‌سنج و استاندارد IEEE STD 647,2006 برای ژایرو).

جدول 1- پارامترهای انواع خطاهای ژایروسکوپ

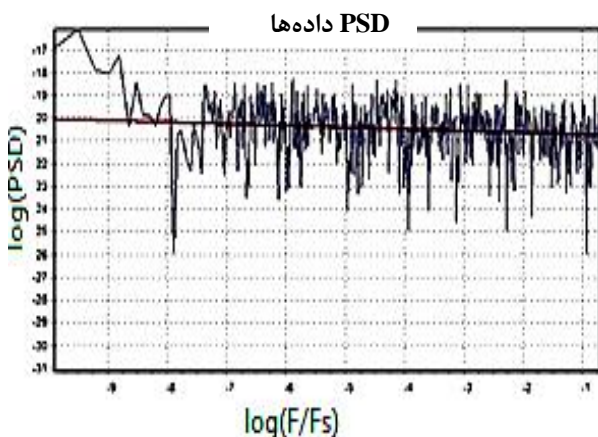
نوع خطا	واریانس آلن $\sigma^2(\tau)$	ضریب خطا	PSD (S(f))
خطای کوانتیزاسیون	$\frac{3Q^2}{\tau^2}$	Q	$(2\pi f)Q^2\tau$
نرخ قدم‌زدن تصادفی	$\frac{N^2}{\tau}$	N	N^2
خطای لرزش (فلیکر)	$\frac{2B^2 \ln 2}{\pi}$	B	$\left(\frac{B^2}{2\pi}\right) \frac{1}{f}$
زاویه قدم‌زدن تصادفی	$\frac{k^2\tau}{3}$	K	$\left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{f^2}$
خطای شیب	$\frac{R^2\tau^2}{2}$	R	$\frac{R^2}{(2\pi f)^3}$

در جدول 1، $S_y(f)$ تابع چگالی طیف و f_h برش فرکانس بالا از یک فیلتر پایین‌گذر است. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، هنگامی که شیب منحنی نمونه برداری برابر τ^{-1} باشد اغتشاش داده‌های سنسور دارای اغتشاش سفید فازی و بعد آن با همین شیب اغتشاش فلیکر فاز و هرگاه شیب برابر $\tau^{-1/2}$ باشد اغتشاش آن بصورت اغتشاش سفید فرکانسی و وقتی τ^0 یعنی عدم وجود شیب اغتشاش فلیکر فرکانسی و با

منحنی PSD و آلن واریانس شتابسنج Y نیز به ترتیب در شکل 5 و شکل 6 آورده شده است. بررسی منحنی آلن واریانس این شتابسنج، خطای تصادفی این محور را $2/2643 \times 10^{-4}$ متر بر مجذور ثانیه برآورد می کند. منحنی PSD و آلن واریانس شتابسنج Z نیز به ترتیب در شکل 7 و شکل 8 آورده شده است. بررسی منحنی آلن واریانس این شتابسنج، مقدار خطای تصادفی این محور را $2/3659 \times 10^{-4}$ متر بر مجذور ثانیه اعلام می کند. نتایج به دست آورده شده از تحلیل آلن واریانس ژيروسکوپ نیز در اشکال 9 الی 14 و به طور خلاصه در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3- نحوه محاسبه آلن واریانس از روی منحنی برای ژایروسکوپ

مجدور واریانس واحد رادیان	نقطه ایی از محور X منحنی که محور Y آلن واریانس	شیب منحنی	ژایرو
0/0025	$\tau=1$	-0/5	محور X
$6/241 \times 10^{-5}$	--	0	
$1/3248 \times 10^{-6}$	$\tau=3$	+0/5	
0/0048	$\tau=1$	-0/5	محور Y
1×10^{-4}	--	0	
$3/4299 \times 10^{-6}$	$\tau=3$	+0/5	
0/0045	$\tau=1$	-0/5	محور Z
$1/44 \times 10^{-4}$	--	0	

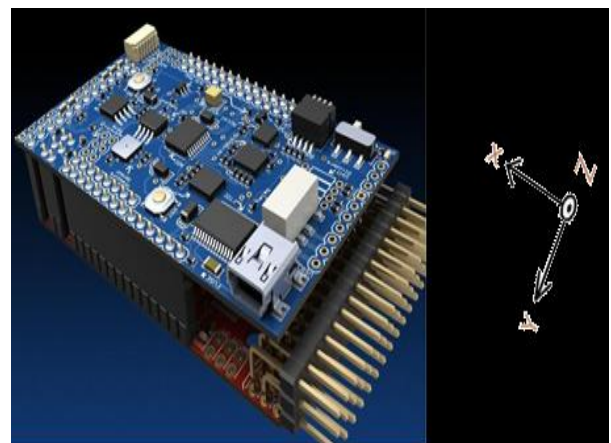


شکل 3- نمودار چگالی طیفی ورودی شتابسنج X

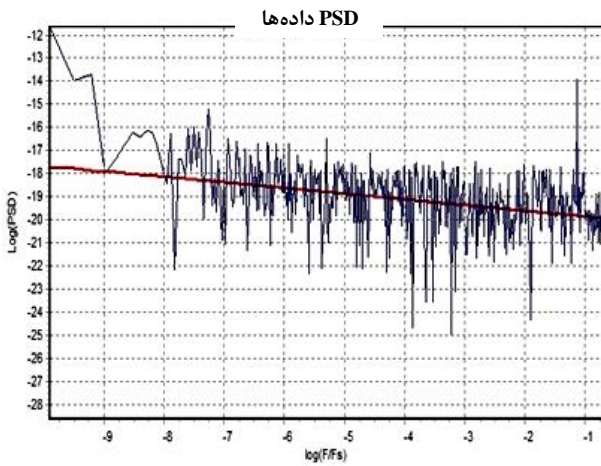
منحنی PSD و واریانس آلن شتابسنج راستای X به ترتیب در شکل 3 و شکل 4 نشان داده شده است. در شکل 4 مشاهده می شود که این منحنی دارای چهار شیب متفاوت به ترتیب (-0/5) که اغتشاش زاویه قدم زدن تصادفی است، بایاس با شیب صفر، شیب (+0/5) که اغتشاش نرخ قدم زدن تصادفی است و شیب (-1) که اغتشاش کوانتیزاسیون است می باشد، انحراف معیار نظیر واریانس این خطاها در جدول 2 آورده شده است. با توجه به این نتایج به دست آورده شده و رابطه (6)، واریانس کلی شتابسنج در راستای محور X برابر است با $8/3414 \times 10^{-5}$ متر بر مجذور ثانیه.

جدول 2- نحوه محاسبه آلن واریانس از روی منحنی برای شتابسنج

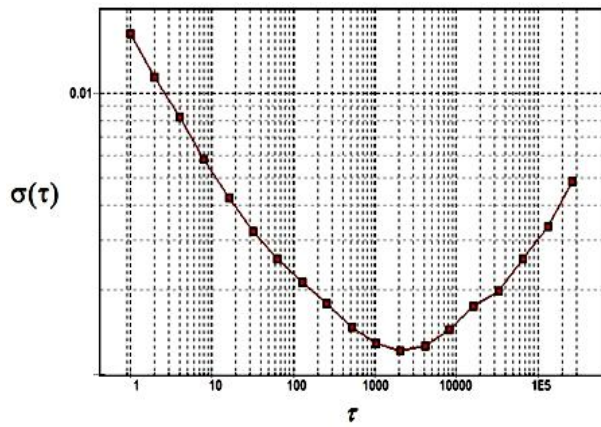
انحراف معیار (m/s ²)	نقطه ایی از محور X منحنی که محور Y آلن واریانس	شیب منحنی	شتاب سنج
$6/241 \times 10^{-5}$	$\tau=1$	-0/5	محور X
$1/764 \times 10^{-7}$	--	0	
$4/549 \times 10^{-10}$	$\tau=3$	+0/5	
0/4225	$\tau=1/73$	-1	محور Y
$6/889 \times 10^{-5}$	$\tau=1$	-0/5	
$1/318 \times 10^{-6}$	--	+0/5	
$2/52 \times 10^{-6}$	$\tau=3$	0	محور Z
$2/56 \times 10^{-4}$	$\tau=1$	-0/5	
$1/44 \times 10^{-6}$	--	0	
$2/9656 \times 10^{-7}$	$\tau=3$	+0/5	



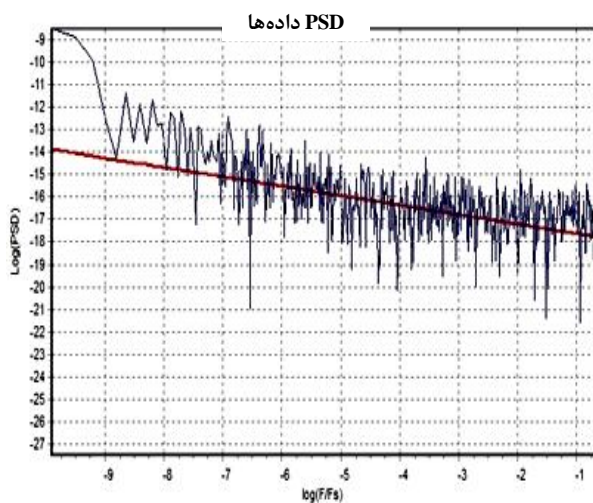
شکل 2- برد الکترونیکی MEMS آردوینو به همراه نمایش راستای محورها



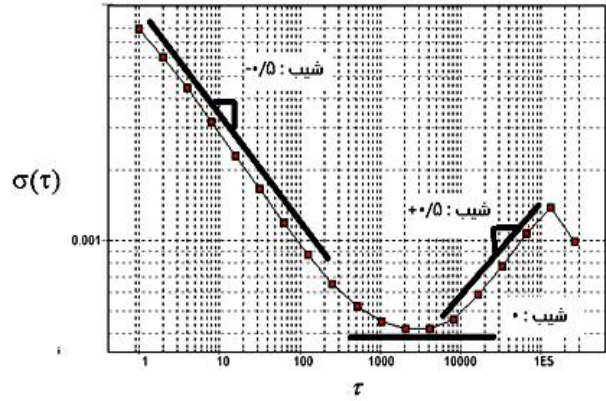
شکل 7- منحنی چگالی طیفی ورودی شتابسنج Z



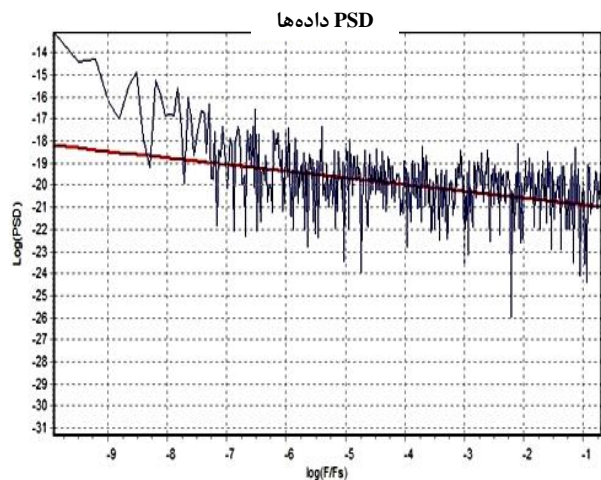
شکل 8- منحنی آلن واریانس حاصل از داده‌های پنج ساعته شتابسنج Z



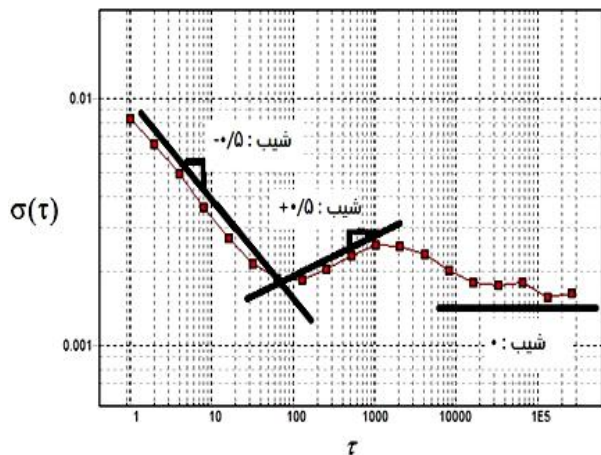
شکل 9- منحنی PSD حاصل از داده‌برداری پنج ساعته ژایروسکوپ X



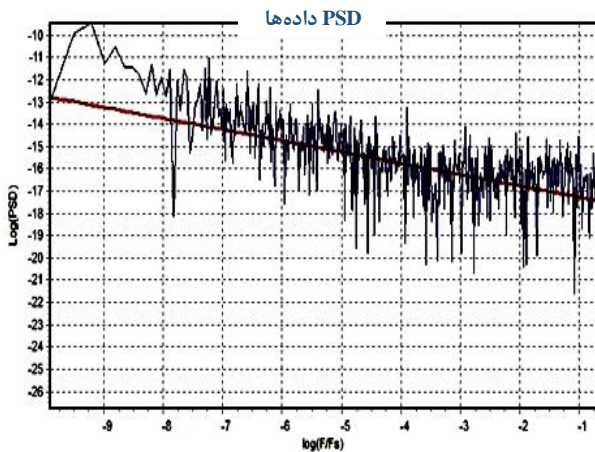
شکل 4- منحنی واریانس آلن و نمایش شیب منحنی شتابسنج X



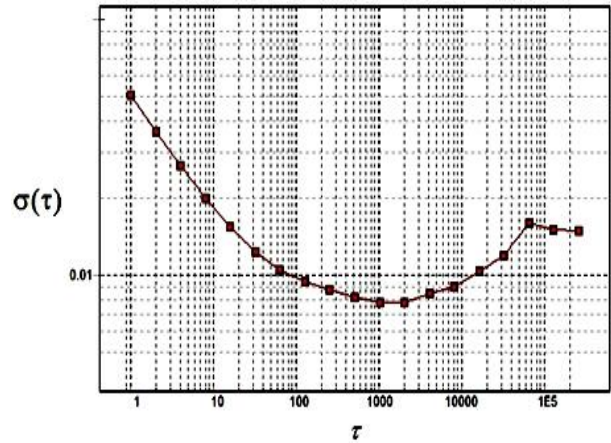
شکل 5- نمودار چگالی طیفی ورودی شتابسنج Y



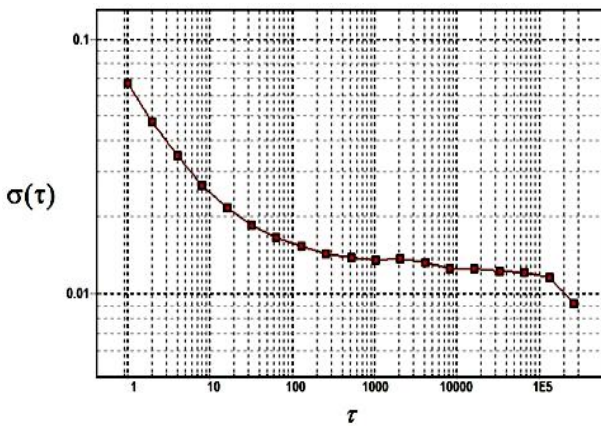
شکل 6- منحنی واریانس آلن و نمایش شیب منحنی شتابسنج Y



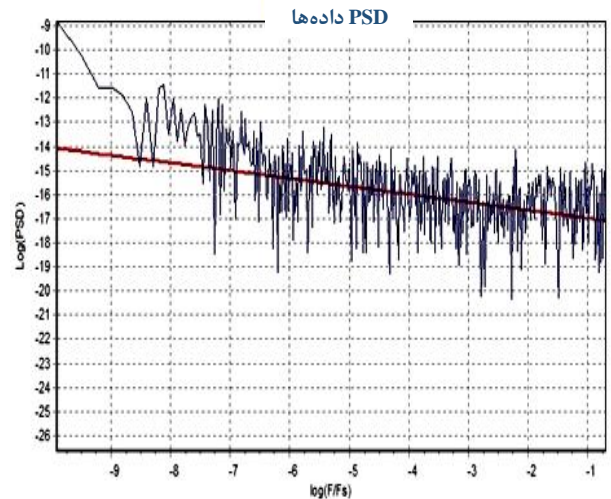
شکل 13- منحنی لگاریتمی PSD حاصل از داده برداری پنج ساعته
 ژایروسکوپ Z



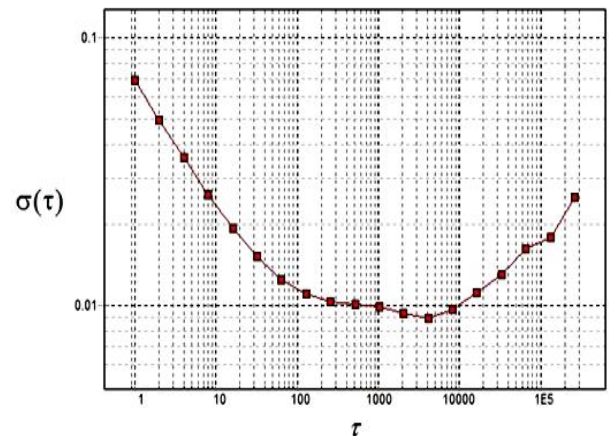
شکل 10- منحنی آلن واریانس مربوط به ژایروسکوپ X



شکل 14- منحنی لگاریتمی آلن واریانس مربوط به ژایروسکوپ Z



شکل 11- منحنی PSD حاصل از داده برداری
 پنج ساعته ژایروسکوپ Y

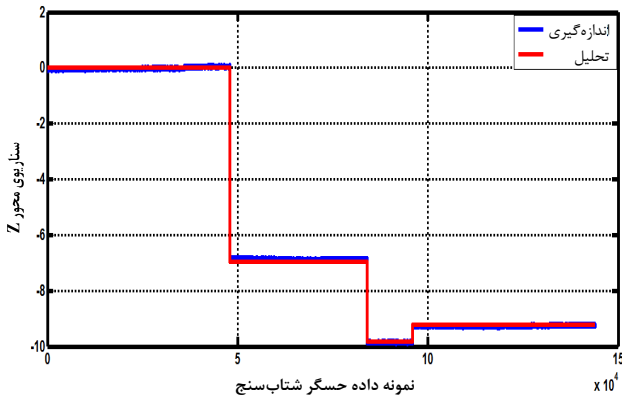


شکل 12- منحنی آلن واریانس مربوط به ژایروسکوپ Y

کالیبراسیون تجربی سنسورهای اینرسی میکروالکترومکانیکی به همراه تست‌های آزمایشگاهی کالیبراسیون شتاب‌سنج مبتنی بر اندازه‌گیری شتاب جاذبه در راستاهای متعدد معین است. شتاب‌سنج‌ها به صورت زیر مدل‌سازی شده‌اند:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_x &= B_x + S_x \times a_x + M_{xy} \times a_y + M_{xz} \times a_z \\ \tilde{a}_y &= B_y + M_{yx} \times a_x + S_y \times a_y + M_{yz} \times a_z \\ \tilde{a}_z &= B_z + M_{zx} \times a_x + M_{zy} \times a_y + S_z \times a_z \end{aligned} \quad (7)$$

در روابط بالا \tilde{a}_x مقدار تحلیلی شتاب در راستای x مقدار B_x بایاس، S_x ضریب مقیاس و M_{xy} عدم هم‌ترازی می‌باشد. قابل ذکر است که ضریب عدم هم‌ترازی برای سنسور ADXL335



شکل 17- سناریوهای اندازه‌گیری شده به همراه داده‌های تحلیلی جهت مقایسه خطا برای شتابسنج Z

جدول 4- ضرایب خطای معین شتابسنج ADXL335 از الگوریتم حداقل مربعات خطی

مقدار	پارامتر
[0/9802, 1/0408, 1/0457]	ضرایب مقیاس
[0/1935, 0/1331, 0/3291]	بایاس (m/s^2)
x-y: 0/0123 x-z: 0/0063	ضریب عدم هم‌ترازی
y-x: 0/0272 y-z: 0/0260	
z-x: -0/0121 z-y: 0/0039	

تعریف سناریو بر روی میز تیلت و ایندکس در زوایای مختلف جهت داده‌برداری

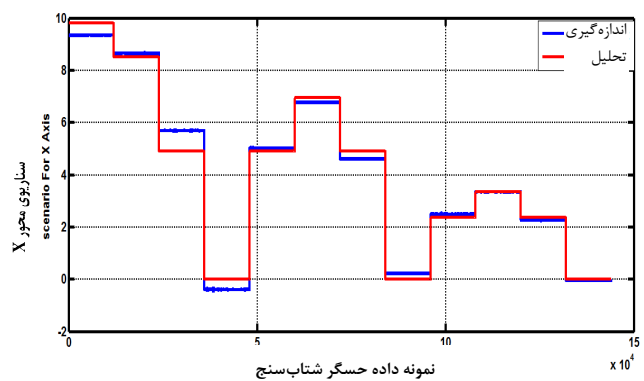
حال اگر ضرایب به دست آمده از این روش را در مقدار اندازه‌گیری شده ضرب نماییم مقدار کالیبره شده به دست خواهد آمد. تفاضل مقادیر کالیبره شده و تحلیلی خطای کالیبراسیون را به دست می‌دهد که یک‌گانه شده و در سه بعد، کره خطا را به دست خواهد داد. در این کره هرچه پراکندگی کمتر باشد، بدین معناست که کالیبراسیون بهتر صورت پذیرفته است. نقاط پراکندگی در شکل 18 نشان‌دهنده اغتشاش‌های ناخواسته معین می‌باشد.

اکنون مشابه با فرآیند کالیبراسیون شتابسنج، سنسور ژایرو IDG500، که ژایرو X-Y است و به همراه سنسور ISZ500 برای محور Z، یک ژایروی سه محوره را در اختیار قرار می‌دهد، با استفاده از میز نرخی تک‌محوره موجود در آزمایشگاه با سرعت‌های زاویه‌ای متفاوتی طبق شکل 19 الی 21 تحریک می‌شود.

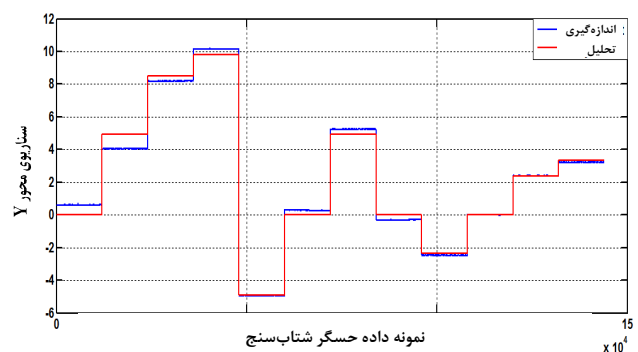
کاملاً نامتقارن در نظر گرفته شده است. با معلوم بودن میزان شتاب تحلیلی در محل آزمایش و در اختیار قرارگیری خروجی سنسور شتابسنج، پارامترهای کالیبراسیون را می‌توان به سادگی به کمک الگوریتم حداقل مربعات خطی تعیین نمود.

اجرای سناریوهای مختلف تست در آزمایشگاه ساخت‌افزار در حلقه

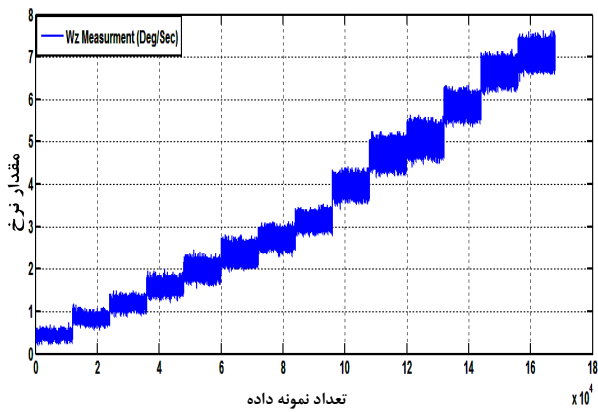
شتاب جاذبه در محل آزمایشگاه در زمان انجام تست برابر 9/8215 متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. اشکال 15 الی 17 سناریوهای تغییر زاویه را توصیف می‌کنند. هر سناریو با فرکانس صد هرتز و به مدت مدت زمان لازم دو دقیقه اندازه‌گیری شده است. ضرایب خطای به دست آمده در جدول 4 گزارش شده است.



شکل 15- سناریوهای اندازه‌گیری شده به همراه داده‌های تحلیلی جهت مقایسه خطا برای شتابسنج X

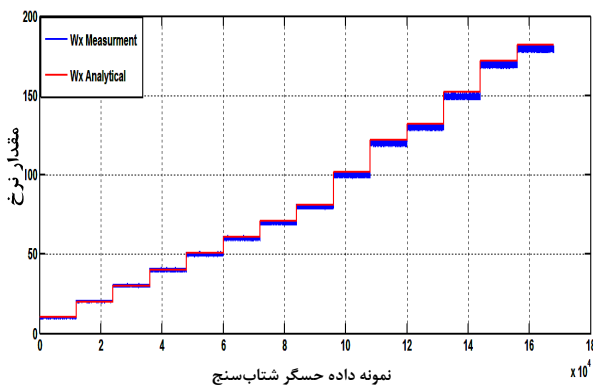


شکل 16- سناریوهای اندازه‌گیری شده به همراه داده‌های تحلیلی جهت مقایسه خطا برای شتابسنج Y



شکل 21- منحنی سناریوهای تعریف شده جهت اندازه‌گیری برای محور Z بر حسب درجه بر ثانیه

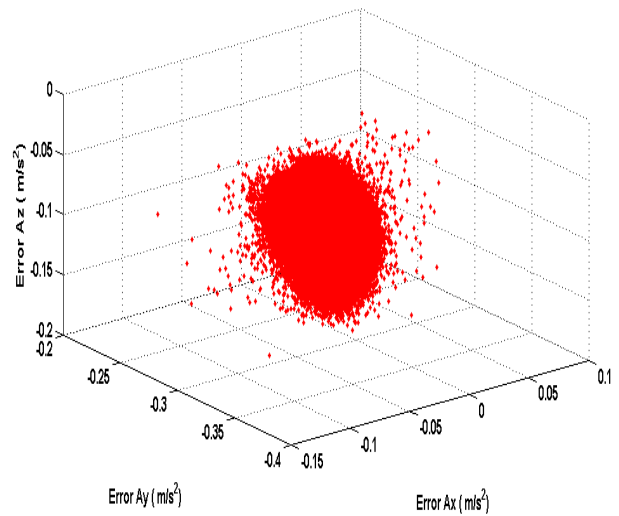
نمودار خطای مربوط به سناریوهای یاد شده یعنی اختلاف مقدار تحلیلی (منحنی قرمز) و اندازه‌گیری (منحنی آبی) نیز به طور نمونه برای محور X در شکل 22 آورده شده است. به وضوح مشاهده می‌گردد که در سرعت زاویه‌ای بالا مقدار اندازه‌گیری دارای نوسان بیشتری می‌باشد.



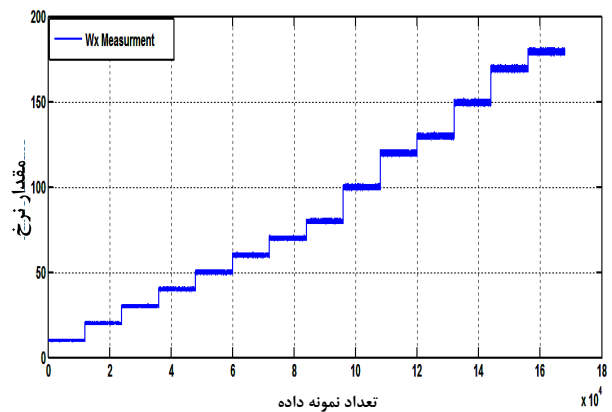
شکل 22- نمایش اختلاف مقدار تحلیلی و اندازه‌گیری در راستای محور X، واحد درجه بر ثانیه

اینک با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات و معادلات (8) که نحوه مدل‌سازی ژایرو را نشان می‌دهند، می‌توان به راحتی ضرایب کالیبراسیون را به دست آورد.

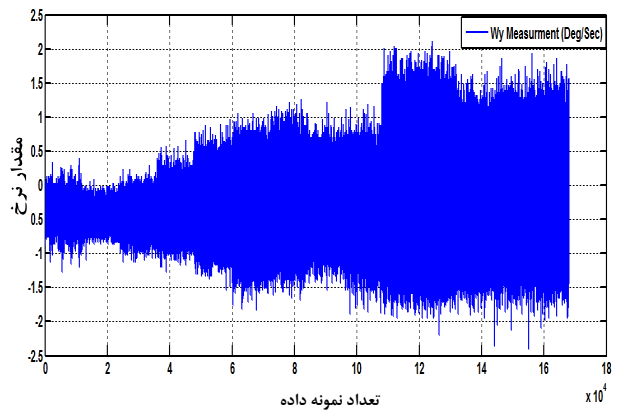
$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_x &= B_x + S_x \times \omega_x + M_{xy} \times \omega_y + M_{xz} \times \omega_z \\ \tilde{\omega}_y &= B_y + M_{yx} \times \omega_x + S_y \times \omega_y + M_{yz} \times \omega_z \\ \tilde{\omega}_z &= B_z + M_{zx} \times \omega_x + M_{zy} \times \omega_y + S_z \times \omega_z \end{aligned} \quad (8)$$



شکل 18- نمایش سه بعدی کره خطا حاصل از تست‌های مختلف که واحد خطا متر بر مجذور ثانیه



شکل 19- منحنی سناریوهای تعریف شده جهت اندازه‌گیری برای محور X بر حسب درجه بر ثانیه



شکل 20- منحنی سناریوهای تعریف شده جهت اندازه‌گیری برای محور Y بر حسب درجه بر ثانیه

شده، انواع متنوع خطاهای این سنسورها و واریانس آن‌ها در راستای هر سه محور شناسایی و ارائه گردیده است. در ادامه با قرار دادن شتابسنج در وضعیت‌های متعدد و تحریک ژایروسکوپ با سرعت‌های زاویه‌ای متفاوت در امتداد هر سه محور، ضرایب مقیاس، بایاس و عدم هم‌ترازی به کمک الگوریتم حداقل مربعات خطی به دست آمده است. پیشنهاد می‌گردد جهت انجام تست کالیبراسیون، شرایط آزمایشگاهی ثابت و عاری از هرگونه اغتشاش محیطی انتخاب گردد.

منابع و مراجع

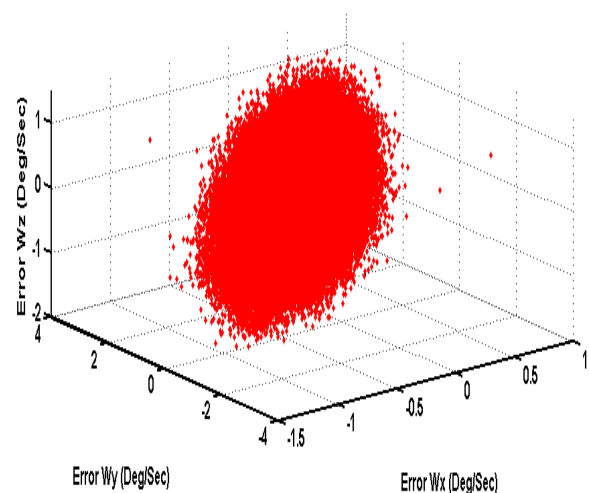
- [1] Cenk Acar and Andrei Shkel, *MEMS Vibratory Gyroscopes Structural Approaches to Improve Robustness*, University of California, Irvine, June 2008.
- [2] Yueming Zhao, *GPS/IMU Integrated System for Land Vehicle Navigation based on MEMS*, Royal Institute of Technology (KTH) Division of Geodesy and Geo-informatics 12244 Stockholm Sweden, September 2011.
- [3] P.Petkov, T.Slavov, *Stochastic Modeling of MEMS Inertial Sensors*, Cybernetics and information technologies, vol. 10, 2010.
- [4] VÁGNER, M, *MEMS GYROSCOPE PERFORMANCE COMPARISON USING ALLAN VARIANCE METHOD*, pp. 199-203, 28.04.2011.
- [5] IEEE Std 1139- 1988, *IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology*, pp. 1-20, 20 October 1988.
- [6] I. S. 9.-1. (R2008), *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros*, pp. 1-77, 16 September 1997.
- [7] IEEE Std 1293™-1998 (R2008), *IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers*, pp. 1-233, 25 September 1998.
- [8] Songlai Han, Jinling Wang, Nathan Knight, *USING ALLAN VARIANCE TO DETERMINE THE CALIBRATION MODEL OF INERTIAL SENSORS FOR GPS/INS INTEGRATION*, 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Presidente Prudente, São Paulo, Brazil, July 21-24, 2009.
- [9] Sanket R. Amin, *DETERMINING THE UNCERTAINTY OF A GPS-BASED COLLISION VEHICLE DETECTION SYSTEM*, A Thesis in Mechanical Engineering. The Pennsylvania State University The Graduate School College of Engineering, pp. 1-119, August 2011.

ضرایب کالیبراسیون به دست آمده برای سنسور ژایروسکوپ IDG500 در جدول 5 آورده شده است.

جدول 5- ضرایب خطای معین ژایروسکوپ IDG500 از الگوریتم حداقل

مقدار	پارامتر
[0/9957, 0/9819, 0/9828]	ضرایب مقیاس
[-0/0067, -0/0068, $3/3831 \times 10^{-5}$]	بایاس (ثانیه/درجه)
x-y: -0/1149 x-z: 0/764	ضریب عدم هم‌ترازی
y-x: 1/0049 y-z: -0/141	
z-x: -0/1176 z-y: -0/165	

شکل 23 کره خطای ژایروسکوپ را نشان می‌دهد. نقاط پراکنده اطراف این کره ناشی از خطاهای تصادفی می‌باشند.



شکل 23 - نمایش کره خطا حاصل از تست‌های مختلف با استفاده از ضرایب کالیبراسیون برای ژایروسکوپ IDG500

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله شناسایی و مدل‌سازی خطاهای تصادفی شتابسنج و ژایروسکوپ سنسور الکترومکانیک آردوینو مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا بستر تست جهت نصب سنسور روی میز نرخ دقیق و دریافت خروجی و اخذ داده‌ها از طریق تله متری اقدام شده است. متعاقباً آزمایشات تجربی بلند مدتی برای این سنسورها تدارک دیده شد. سپس با توجه به استانداردهای موجود در این زمینه و همچنین به کمک روش واریانس آلن برای تحلیل تصادفی سیگنال‌های به دست آورده