

پردازش سیگنال و پیاده‌سازی حسگر موج‌نگار الکترونیکی بویه‌های هواشناسی - اقیانوسی شناسی

محمدعلی بدری^۱، سید مصطفی نوربخش^۲، احمدرضا زمانی^۳

malbdr@cc.iut.ac.ir

- ۱- استادیار مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۲- استادیار مخابرات، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۳- استادیار مکانیک، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این مقاله طراحی و پیاده‌سازی یک حسگر موج‌نگار الکترونیکی بر اساس زیرحسگرهای شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و قطب‌نما با فن‌آوری MEMS و با استفاده از روش تکرار موازی حسگرها برای ارتقاء عملکرد مورد بررسی واقع شده است. کالیبراسیون حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ برای رفع عوامل خطای زیرحسگرها ضروری می‌باشد. به همین منظور یک مجموعه آزمون و کالیبراسیون آزمایشگاهی طراحی و پیاده‌سازی شده است که با آن، علاوه بر کالیبراسیون زیرحسگرها، صحت حسگر موج‌نگار نیز ارزیابی گردیده است. نتایج عملکرد میدانی حسگر موج‌نگار طراحی شده در دریا با برخی تجزیه و تحلیل‌های حوزه فرکانس و هم‌چنین با مقایسه با یک حسگر موج‌نگار مرجع مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است. تخمین ارتفاع مؤثر موج، انطباق زیادی به میزان اختلاف کمتر از ۲٪ نسبت به مقادیر متناظر حسگر مرجع نشان داده است.

واژگان کلیدی: تکرار موازی حسگرها، حسگر موج‌نگار الکترونیکی، کالیبراسیون حسگرها.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۷/۲۲
 تاریخ پذیرش مقاله : ۹۳/۱/۲۰

۱- مقدمه

حسگرهای موج‌نگار کاربرد وسیعی در اندازه‌گیری مشخصه‌های امواج دریا دارند. این حسگرها عمدتاً در بویه‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی نصب گردیده و در ثبت اطلاعات سری زمانی امواج و طیف حاصل کاربرد دارند. از جمله اولین حسگرهای موج‌نگار موفق می‌توان به بویه رول-پیچ^۱ [۱] اشاره کرد. این حسگر در بویه دیسکی به قطر ۱/۷۱ متر قرار گرفته و از حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ تشکیل شده است و شیب‌های موج و شتاب در جهت عمودی (قابل تبدیل به جابجایی عمودی) را اندازه می‌گیرد. استفاده از حسگرهای موج‌نگار رول-پیچ تا امروزه تداوم یافته‌اند. نمونه‌های اولیه از حسگرهای مکانیکی با ابعاد بزرگ و وزن بالا مانند حسگر آنالوگ هیپی^۲ با وزن ۳۶ کیلوگرم [۲] تشکیل شده‌اند. نمونه‌های نوین حسگرهای موج‌نگار از حسگرهای مکانیکی- الکترونیکی استفاده می‌کنند که ابعاد و وزن به مراتب کوچک‌تری دارند؛ مانند حسگر بویه موج‌نگار شرکت اشنور^۳ [۳] و حسگر بویه موج‌نگار تری‌اکسیس^۴ [۴]. این حسگرها مجهز به بوردهای پردازش سیگنال برای محاسبات موج‌نگاری می‌باشند. ساخت حسگرهای فوق در حال حاضر توسط چند شرکت خارجی صورت می‌پذیرد و مسائل آزمون و کالیبراسیون آن‌ها نیز بایستی در همان شرکت‌ها و با صرف زمان نسبتاً طولانی انجام شود. با توجه به گسترش اندازه‌گیری‌های میدانی در داخل کشور، ضرورت دستیابی به دانش فنی طراحی، ساخت و کالیبراسیون حسگرهای فوق در داخل کشور ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون تجربه طراحی و ساخت حسگرهای فوق در داخل کشور وجود نداشته و کار حاضر در جهت ساخت و بکارگیری یک نمونه حسگر موج‌نگار بر مبنای فن‌آوری روز MEMS^۵ در آزمایشگاه هیدروآیرویدینامیک پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۱ انجام شده است. این فن‌آوری در ادامه سیر تحول حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ از

حالت پیاده‌سازی تمام مکانیکی بسوی پیاده‌سازی میکروالکترونیکی است که ابعاد، وزن و هزینه پایینی دارند و در واقع، فن‌آوری روز می‌باشد [۵-۱۳].

حسگر موج‌نگاری باید سه کمیت حرکت عمودی بویه بر حسب زمان $z(t)$ و شیب‌های موج نسبت به محورهای افقی x, y یعنی $\partial z/\partial x, \partial z/\partial y$ را به عنوان سری‌های زمانی اولیه برای پردازش‌های موج‌نگاری فراهم کند [۱۴]. به لحاظ موارد زیر، یک سیستم پردازش سیگنال و فیلتر برای خروجی حسگرهای موج‌نگاری مورد نیاز است تا سری‌های زمانی یاد شده برای پردازش‌های اصلی موج‌نگاری بصورت معتبر ارائه گردد:

- در عمل حسگرهایی که کمیت‌های یاد شده را مستقیماً اندازه‌گیری کنند، در دسترس نمی‌باشند. معمولاً از حسگرهایی مانند شتاب‌سنج و ژيروسکوپ برای اندازه‌گیری کمیت‌های مرتبط با کمیت‌های یاد شده که عبارتند از شتاب و سرعت چرخش زاویه‌ای، استفاده می‌شود.

- کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرها در دستگاه مختصات متحرک منطبق بر بدنه اندازه‌گیری می‌شوند. در حالی که سری‌های زمانی مورد نظر باید در یک دستگاه مختصات ثابت و مرجع فراهم گردند.

- حسگرها در اندازه‌گیری کمیت خود نیز پارامترهای خطایی مانند «افزایش مقدار ثابت»^۶ و نویز اندازه‌گیری دارند که باید در نظر گرفته شوند. جهت کاهش نویز کوانتیزاسیون و نویز خارج باند، خروجی حسگرها با نرخ فراتر از نرخ مورد نیاز (۱ هرتز) نمونه‌برداری می‌شود تا با متوسط‌گیری یا فیلتر کردن، نویزهای یاد شده تقلیل یابد. لذا پردازش «فیلتر و کاهش نرخ» مورد نیاز می‌باشد.

در این مقاله پس از مقدمه، سیستم پردازش سیگنال و فیلتر در بخش‌های ۲ و ۳ تشریح شده است. کالیبراسیون حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ به منظور رفع عوامل خطای زیرحسگرها در بخش ۴ آورده شده است. یک مجموعه آزمون و کالیبراسیون آزمایشگاهی بصورت آونگ به این منظور طراحی و پیاده‌سازی شده است که با آن، علاوه بر کالیبراسیون زیرحسگرها، صحت کلی حسگر موج‌نگار نیز

¹ Roll-Pitch

² Hippy

³ OCEANOR

⁴ TRIAXYS

⁵ Micro Electro Mechanical Systems

⁶ Heave

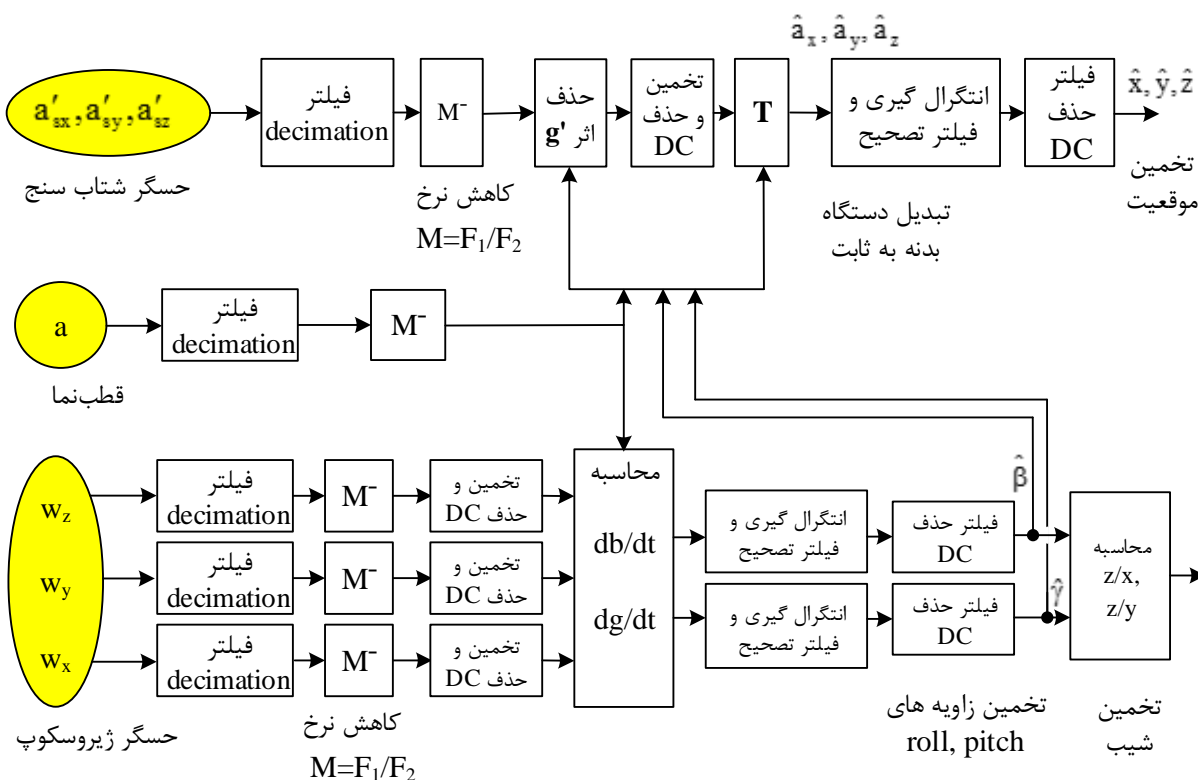
⁷ Offset

توجه به شکل (۱)، پارامترهای اونگ و خروجی حسگرها در نرخ F_1 شبیه‌سازی می‌شوند. خروجی‌های نهایی سیستم که سری‌های زمانی $\partial z/\partial x$ ، $\partial z/\partial y$ و Z می‌باشند، در نرخ کاهش یافته $F_2=1\text{ Hz}$ تولید می‌شوند. خروجی حسگرها (شتاب‌سنج و ژيروسکوپ) در دستگاه مختصات دوران‌یافته منطبق بر بدنه تولید می‌گردند. رابطه بردار شتاب در دستگاه ثابت $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ و بردار شتاب در دستگاه بدنه $\mathbf{a}' = [a'_x \ a'_y \ a'_z]^T$ عبارت است از $\mathbf{a} = T\mathbf{a}'$ یا $\mathbf{a}' = T^{-1}\mathbf{a}$. ماتریس تبدیل از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه ثابت است. اگر دستگاه ثابت xyz ابتدا تحت دوران "رول" حول محور x ($y \rightarrow z$) به میزان زاویه γ سپس تحت دوران "پیچ" حول محور y ($z \rightarrow x$) به میزان زاویه β ، و سپس تحت دوران "یاو" حول محور z ($x \rightarrow y$) به میزان زاویه α به دستگاه مختصات بدنه $x'y'z'$ تبدیل شود، ماتریس T مطابق با رابطه (۱) خواهد بود [۱۵].

ارزیابی گردیده است. همچنین در این بخش الگوریتم‌های کالیبراسیون و نحوه اجرای کالیبراسیون با مجموعه آزمون اونگ بیان گردیده است. در بخش ۵ پیاده‌سازی سخت‌افزاری و در بخش ۶ نتایج آزمون میدانی حسگر موج‌نگار پیاده‌سازی بیان شده است.

۲- پردازش سیگنال در حسگر موج‌نگاری

شکل (۱) ساختار پردازش سیگنال را برای دو حسگر شتاب‌سنج و ژيروسکوپ نشان می‌دهد. در مورد شتاب‌سنج، هدف این است که پردازش سیگنال بصورت مطلوبی روی خروجی‌های شتاب‌سنج انجام شود تا مختصات x, y, z مورد انتظار (با توجه به موقعیت لحظه‌ای اونگ) ارائه شود. در مورد ژيروسکوپ نیز هدف این است که پردازش سیگنال بصورت مطلوبی روی خروجی‌های آن انجام شود تا زاویه‌های رول-پیچ و $\partial z/\partial x$ ، $\partial z/\partial y$ مورد انتظار ارائه گردد. با



شکل (۱) ساختار پردازش سیگنال و شبیه‌سازی برای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

۳- طراحی فیلترها

۳-۱- فیلتر کاهش نرخ^۱

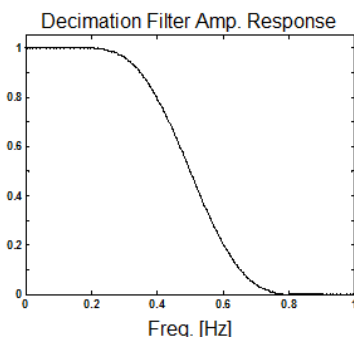
طبقه اول مجموعه فیلترها، فیلتر پایین‌گذر کاهش نرخ است که روی داده‌های حسگرهای شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، و قطب‌نما که در نرخ F_1 نمونه‌برداری شده‌اند، انجام می‌شود. نوع فیلتر، بصورت FIR^2 متقارن فاز خطی انتخاب می‌شود تا هم در سیگنال‌های فیلترشده، اعوجاج فاز رخ ندهد و هم بتوان در عمل این پردازش را با پردازش کاهش نرخ $F_1 \rightarrow F_2$ توأم نموده و بار محاسباتی فیلترکردن را به میزان $M = F_1/F_2$ کاهش داد. پاسخ فرکانسی فیلتر کاهش نرخ در شکل (۲) برای شرایط $F_1 = 100 \text{ Hz}$ و $F_2 = 1 \text{ Hz}$, $K = 6$ رسم شده است.

۳-۲- انتگرال‌گیری

پردازش بعدی، دو بار انتگرال‌گیری برای بردار شتاب تخمین زده شده در دستگاه ثابت $[\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z]^T$ و یک بار انتگرال‌گیری برای سرعت زاویه‌ای پیچ، رول ($d\gamma/dt$)، است تا تخمین موقعیت $\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$ و تخمین پیچ، رول در دستگاه بدنه $\hat{\gamma}, \hat{\beta}$ حاصل شود.

الف) پردازش دو بار انتگرال‌گیری

پردازش ایده‌آل، دو بار انتگرال‌گیری زمان پیوسته است که تابع انتقال آن به ازاء فرکانس زاویه‌ای Ω (rad/s) عبارت است از $H_{12}(j\Omega) = -1/\Omega^2$.



شکل (۲) پاسخ فرکانسی فیلتر کاهش نرخ برای $F_1 = 100 \text{ Hz}$, $F_2 = 1 \text{ Hz}$, $K = 6$.

شتاب‌سنج، شتاب در دستگاه بدنه را با تأثیرگرفتن از نیروی گرانش زمین، ارائه می‌کند. یعنی بردار شتاب اعلام شده توسط حسگر شتاب‌سنج عبارت است از $a'_s = a' + g'$ که در آن $g' = T^{-1}g$ ($g = [0 \ 0 \ g]^T$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$) بردار جاذبه زمین در دستگاه بدنه به صورت زیر است: [۱۵]:

$$g' = g \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

هنگام استفاده از داده‌های شتاب‌سنج، مؤلفه g' که وابسته به زاویه‌های یاو، پیچ و رول است، باید از بردار خروجی حسگر حذف شود. زاویه "یاو" α توسط قطب‌نما در حالت عملی در میدان اندازه‌گیری می‌شود. ژيروسکوپ سرعت زاویه‌ای رول، یاو و پیچ را نسبت به دستگاه بدنه اندازه‌گیری می‌کند که آن را به ترتیب $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ می‌نامیم. رابطه ω_x, ω_y با رول و پیچ در دستگاه ثابت (γ, β) عبارت است از [۱۵]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \cos \alpha \cos \beta \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_y &= -\sin \alpha \cos \beta \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_z &= \sin \beta \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\alpha}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

در نتیجه:

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dt} &= \cos \alpha \cdot \omega_y + \sin \alpha \cdot \omega_x \\ \frac{d\gamma}{dt} &= (\cos \alpha \cdot \omega_x - \sin \alpha \cdot \omega_y) / \cos \beta \end{aligned} \quad (4)$$

با انتگرال‌گیری از مشتق‌های زمانی، زاویه‌های پیچ، رول بدست آمده طبق رابطه (۴)، تخمین این زاویه‌ها حاصل می‌شود. در نهایت، شیب‌های موج نسبت به محورهای افقی از روابط $\frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{\text{tg } \beta}{\cos \gamma}$, $\frac{\partial z}{\partial y} = \text{tg } \gamma$ قابل محاسبه است [۱۵].

¹ Decimation

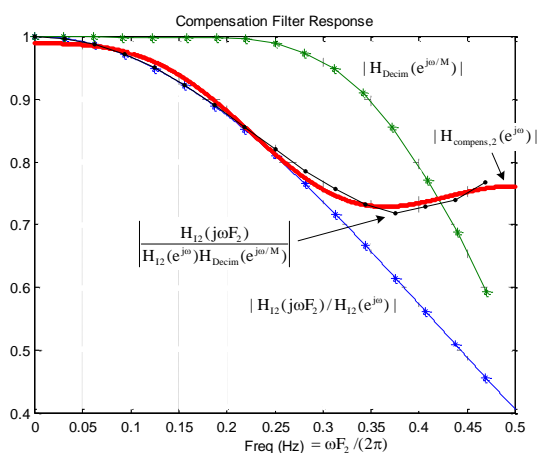
² Finite Impulse Response

خطا به نسبت $|H_1(j\omega F_2)/H_1(e^{j\omega})| = 2\omega^{-1} \sin(\omega/2)$ در مقایسه با حالت ایده‌آل انتگرال‌گیری دارد.

در اینجا نیز مشابه جبران‌سازی برای پردازش دو بار انتگرال‌گیری، با استفاده از دستور Matlab `remez`، فیلتری طراحی شده که اعوجاج دامنه انتگرال‌گیری زمان گسسته و فیلتر کاهش نرخ را بصورت توأم جبران نماید.

۳-۳- حذف بایاس

در هر یک از خروجی‌های حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، مقدار تقریباً ثابتی که وابسته به دما بوده و با زمان به کندی تغییر می‌کند (متفاوت برای هر مؤلفه) تحت عنوان بایاس اضافه می‌شود. بایاس معلول ساختار درونی این حسگرها می‌باشد. برآورد دقیق این مقدار بر حسب دمای حسگر یا دیگر مشخصات فیزیکی و شرایط محیطی، بسیار مشکل است. علاوه بر ضرورت حذف بایاس نیاز است که مؤلفه‌های نویز نزدیک DC نیز حذف گردند. به علت مشخصه $\propto \omega^{-1}$ انتگرال‌گیری، نویز فرکانس پایین نزدیک DC حسگرها به شدت توسط انتگرال‌گیر تقویت می‌شود. برای حذف این مؤلفه‌های ناخواسته از فیلتر حذف بایاس بصورت یک فیلتر بالا گذر FIR فاز خطی استفاده می‌شود. پاسخ فرکانسی این فیلتر برای $F_2=1$ Hz در شکل (۴) رسم شده است. در مورد شتاب‌سنج نیز لازم به ذکر است که با وجود فیلتر حذف بایاس یاد شده، «تخمین و حذف اولیه بایاس» در اولین طبقه پردازش هم‌چنان ضروری است.



شکل (۳) پاسخ فرکانسی فیلتر مرتبه ۶ جبران‌ساز دو بار انتگرال‌گیری و کاهش نرخ برای $F_1=100$ Hz, $F_2=1$ Hz

به نحو مشخص، تقریب دو بار انتگرال‌گیری دوزنقه‌ای که در حوزه زمان گسسته بصورت فیلتر IIR^۱ جمع کننده با تابع انتقال $H_{I2}(e^{j\omega}) = F_2^{-2}(1 - e^{-j\omega})^{-2}$ صورت می‌گیرد^۲ میزانی از خطا در مقایسه با حالت ایده‌آل انتگرال‌گیری دارد. به ویژه این که برای صرفه‌جویی در نرخ نمونه‌برداری داده‌ها چه از نظر مصرف انرژی الکتریکی برای ارسال و چه از نظر حجم ذخیره‌سازی، برای نمونه‌برداری برای امواج دریا که تا حدود ۰/۳ هرتز پهنای باند دارند، به نرخ $F_2=1$ Hz اکتفا می‌شود. در این حالت خطای انتگرال‌گیری زمان گسسته در مقایسه با انتگرال‌گیری ایده‌آل بیشتر است.

این خطا در شکل (۳) با رسم منحنی نسبت $|H_{I2}(j\omega F_2)/H_{I2}(e^{j\omega})| = 4\omega^{-2} \sin^2(\omega/2)$ فرکانس نشان داده شده است. برای جبران اعوجاج دامنه، یک فیلتر FIR متقارن فاز خطی در محیط Matlab طراحی شده که نسبت $|H_{I2}(j\omega F_2)/H_{I2}(e^{j\omega})|$ را جبران کند. در طراحی این فیلتر، جبران اعوجاج فیلتر کاهش نرخ با جبران‌سازی اعوجاج انتگرال‌گیری زمان گسسته ادغام گردیده است. یعنی سعی شده فیلتر جبران‌ساز، پاسخ دامنه‌ای به صورت $\left| \frac{H_{I2}(j\omega F_2)}{H_{I2}(e^{j\omega})H_{Decim}(e^{j\omega/M})} \right|$ داشته باشد و بنابراین پاسخ دامنه فیلتر کاهش نرخ در نرخ F_2 $|H_{Decim}(e^{j\omega/M})|$ است. در شکل (۳) منحنی‌های $\left| \frac{H_{I2}(j\omega F_2)}{H_{I2}(e^{j\omega})H_{Decim}(e^{j\omega/M})} \right|$ و $|H_{Decim}(e^{j\omega/M})|$ و پاسخ دامنه فیلتر جبران‌ساز عملی یعنی $|H_{compens,2}(e^{j\omega})|$ رسم شده‌اند. برای طراحی این فیلتر، از دستور Matlab `remez` که بر اساس الگوریتم طراحی بهینه Parks-McClellan عمل می‌کند، استفاده شده است.

ب) پردازش یک بار انتگرال‌گیری
پردازش ایده‌آل، انتگرال‌گیری زمان پیوسته است که تابع انتقال آن به ازاء فرکانس زاویه‌ای Ω (rad/s) عبارت است از $H_I(j\Omega) = (j\Omega)^{-1}$. مانند بحث دو بار انتگرال‌گیری، تقریب انتگرال‌گیری دوزنقه‌ای که در حوزه زمان گسسته بصورت فیلتر IIR جمع کننده با تابع انتقال $H_I(e^{j\omega}) = F_2^{-1}(1 - e^{-j\omega})^{-1}$

^۱ Infinite Impulse Response

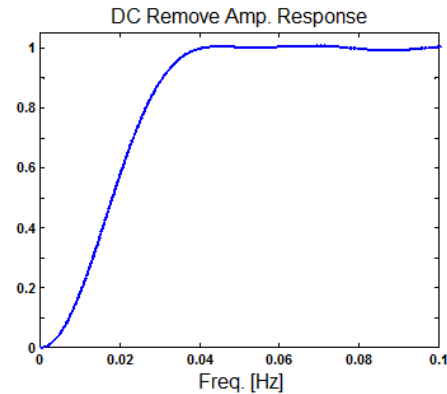
^۲ j عدد موهومی و ω (rad) فرکانس نرمالیزه زاویه‌ای است.

- ضریب مقیاس^۳: نسبت ضریب تبدیل مقیاس (نسبت کمیت مورد اندازه‌گیری به ولتاژ یا عدد دیجیتال خروجی) واقعی به ضریب تبدیل مقیاس نامی مطرح شده برای حسگر.
- اثرات غیرخطی: وابستگی غیرخطی خروجی حسگر به کمیت مورد اندازه‌گیری در بُعد مورد نظر.

در فرکانس‌های پایین در حد امواج دریا (۰/۴ تا ۰/۳ هرتز) مقادیر عوامل خطای فوق (به غیر از اثرات غیرخطی) با مقادیر مطلوب قابل مقایسه است. عوامل خطای یاد شده مواردی غیر از نویز اندازه‌گیری حسگر است که یک فرآیند تصادفی غیرقابل تخمین بوده و تن‌ها با فیلتر کردن در فرکانس‌های خارج باند مقادیر مطلوب، قابل کاهش است. پردازش «مدل کردن عوامل مختلف خطا»، «تخمین پارامترهای این مدل» و «اصلاح مقادیر حسگرها با توجه به مدل و پارامترهای تخمین‌زده‌شده آن» کالیبراسیون حسگر نام دارد که در این بخش به آن پرداخته شده است.

تخمین پارامترها در کالیبراسیون حسگر نیاز به حسگرهای مرجع اضافه‌ای دارد تا با استفاده از معادلاتی، مجهول‌های مورد نظر قابل محاسبه باشند. برای این منظور یک مجموعه آزمون و کالیبراسیون بصورت آونگ طراحی و پیاده‌سازی شده است (مطابق شکل (۵)). این مجموعه مجهز به دو حسگر اندازه‌گیری زاویه نوسان آونگ θ و زاویه دوران حول شافت آونگ ϕ می‌باشد. شکل (۶) دستگاه‌های مختصات و مدل دینامیک آونگ به طول L را نشان می‌دهد.

در این شکل محورهای x, y, z دستگاه مختصات ثابت و مرجع و محورهای x', y', z' دستگاه مختصات بدنه را تشکیل می‌دهند. محورهای x, y در صفحه افقی و محور z عمود بر صفحه افقی است. با توجه به شکل (۶) دستگاه مختصات ثابت ابتدا حول محور y به اندازه زاویه θ و سپس حول محور z (جدید) به اندازه زاویه ϕ دوران می‌کند. با تطابق این دوران با تعریف زاویه‌های "یاو"، "پیچ" و "رول" مطرح در بخش ۲ نتیجه می‌شود:



شکل (۴) پاسخ دامنه فیلتر حذف بایاس.

زیرا در تبدیل دستگاه مختصات با ماتریس T که شامل عناصر متغیر با زمان بوده و نقش mixer را دارد، مقدار ثابت بایاس به مقادیر متغیر «داخل باند فرکانسی» تبدیل می‌شود که دیگر با فیلتر کردن قابل تفکیک و حذف از مقادیر مطلوب نیست. تخمین بایاس از یک سری زمانی a_i

$$\text{به طول } N \text{ نمونه عبارت است از } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$$

۴- کالیبراسیون حسگرها

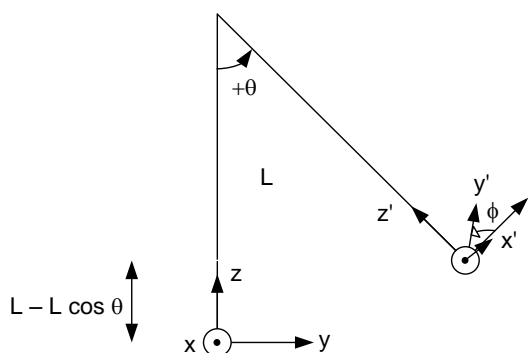
در مورد حسگرهایی مانند شتاب‌سنج و ژيروسکوپ که خروجی آن‌ها متناظر با ۳ بُعد متعامد x, y, z است، موارد زیر را به عنوان عوامل خطا می‌توان برشمرد که موجب فاصله گرفتن مقادیر خروجی نهایی حسگر موج‌نگار از مقادیر واقعی می‌شوند:

- بردار مقدار ثابت خروجی، بایاس این بردار هم با تغییرات دما و هم با گذشت زمان بصورت تصادفی تغییر می‌کند. تغییرات آن با گذشت زمان، آرام بوده و ثابت زمانی در حدود ۵ تا ۱۰ دقیقه می‌توان برای آن در نظر گرفت.
- حساسیت متقابل^۱: حس کردن کمیت مورد اندازه‌گیری که در ابعاد متعامد غیر از بُعد مورد نظر وجود دارد. به عنوان مثال شتاب‌سنج، مؤلفه x یا y شتاب را در بُعد z خود حس کند.
- حساسیت متقابل ناشی از دو عامل «ساختار درونی حسگر» و «عدم تطابق^۲ محورهای مختصات حسگر با محورهای مختصات بدنه می‌باشد.

¹ Cross Axis Sensitivity

² Misalignment

³ Scale Factor



شکل (۶) دستگاه‌های مختصات و مدل دینامیک آونگ.

رابطه مؤلفه‌های شتاب مورد انتظار در دستگاه مختصات ثابت عبارت است از:

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \\
 a_y &= \frac{d^2 y}{dt^2} \\
 &= L \frac{d^2 \theta}{dt^2} \cos(\theta + \gamma_x) - L \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \sin(\theta + \gamma_x) \quad (۸) \\
 a_z &= \frac{d^2 z}{dt^2} \\
 &= L \frac{d^2 \theta}{dt^2} \sin(\theta + \gamma_x) + L \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \cos(\theta + \gamma_x)
 \end{aligned}$$

t متغیر زمان پیوسته می‌باشد. روابط فوق در شبیه‌سازی موقعیت و شتاب سیستم در دستگاه ثابت بکار می‌رود. با ضرب T^{-1} در بردار شتاب در دستگاه ثابت و بردار جاذبه زمین $g = [0 \ 0 \ g]^T$ بردار شتاب در دستگاه بدنه به عنوان خروجی مورد انتظار حسگر شتاب‌سنج (بدون نویز و بایاس) بر حسب θ و ϕ شبیه‌سازی می‌شود:

$$a'_s = T^{-1}(a+g) \quad (۹)$$

با توجه به رابطه (۳)، مقادیر مورد انتظار خروجی‌های ژيروسکوپ عبارت است از:

$$\begin{aligned}
 \omega_x &= \cos \phi \cos \beta_x \cdot \frac{d\theta}{dt} \\
 \omega_y &= -\sin \phi \cos \beta_x \cdot \frac{d\theta}{dt} \\
 \omega_z &= \sin \beta_x \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\phi}{dt}
 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در فرآیند کالیبراسیون، برای حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ مدلی در نظر گرفته شده که مقدار واقعی

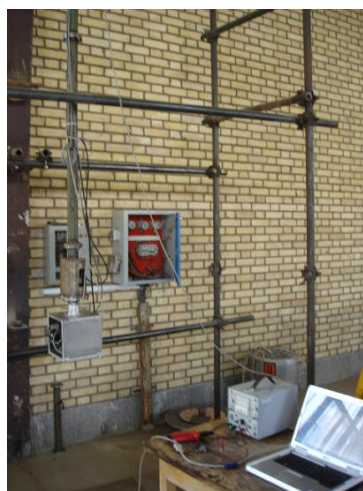
$$\begin{aligned}
 \text{yaw: } \alpha &= \phi \\
 \text{pitch: } \beta &= 0 \\
 \text{roll: } \gamma &= \theta
 \end{aligned} \quad (۵)$$

لازم به ذکر است که به دلیل حضور مقادیر زیاد فلز آهن در محیط اطراف در هنگام آزمون آونگ، امکان تأمین زاویه یاب از طریق حسگر قطب‌نما وجود نداشته و نیاز به حسگر دیگری است که همان حسگر زاویه ϕ می‌باشد. در بحث کالیبراسیون، در نظر گرفتن عوامل غیرایده‌آل آونگ برای حصول دقت مورد نیاز، ضروری است. از این رو برای زاویه‌های پیچ، رول مقادیر بایاس به ترتیب γ_x, β_x لحاظ می‌شود. β_x حاصل از ترکیب انحراف زاویه‌ای شافت آونگ از حالت قائم و عدم تراز بودن جعبه نصب حسگر موج‌نگار است. γ_x نیز حاصل از عدم تراز بودن جعبه نصب حسگر موج‌نگار است. بدین صورت رابطه (۵) بصورت رابطه (۶) تصحیح می‌شود.

$$\begin{aligned}
 \text{yaw: } \alpha &= \phi \\
 \text{pitch: } \beta &= \beta_x \\
 \text{roll: } \gamma &= \theta + \gamma_x
 \end{aligned} \quad (۶)$$

بدین صورت ماتریس تبدیل T در شبیه‌سازی بر حسب θ و ϕ معین است (مطابق رابطه (۱)). رابطه موقعیت مورد انتظار آونگ x, y, z بر حسب پارامترهای آونگ (θ, ϕ, L) عبارت است از:

$$\begin{aligned}
 x &= -L \sin \beta_x \\
 y &= L \sin(\theta + \gamma_x) \\
 z &= L - L \cos(\theta + \gamma_x)
 \end{aligned} \quad (۷)$$



شکل (۵) تصویر نمای عمومی مجموعه آزمون و کالیبراسیون آونگ.

مربعات بوده و عبارت است از حداقل کردن خطای E
تعریف شده بصورت زیر:

$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N (k_{\xi 0} + k_{\xi 1} a'_{\xi x, n} + k_{\xi 2} a'_{\xi y, n} + k_{\xi 3} a'_{\xi z, n} - v_{\xi, n})^2 \quad (13)$$

در عبارت خطای فوق، مجهول‌های $k_{\xi i}$ رابطه درجه ۲ با E دارند. در حالی که مجهول‌های γ_x و β_x که در $v_{\xi, n}$ مستتر هستند، رابطه پیچیده‌تر و شامل توابع مثلثاتی با E هستند. لذا صفر قرار دادن مشتق پاره‌ای E نسبت به همه مجهول‌ها برای حل معادله، راه حل بسته‌ای نتیجه نمی‌دهد. روشی که برای حل خطای E انتخاب شد، به این صورت است که مقادیر مختلف برای مجهول‌های β_x ، γ_x در یک جستجوی فراگیر قرار داده شده است. برای هر مقدار، مقادیر $v_{\xi, n}$ محاسبه شده و سپس معادله حداقل مربعات برای E برای مجهول‌های $k_{\xi i}$ بصورت حل بسته تخمین زده شده و در نهایت مجموعه $k_{\xi i}$ ، β_x ، γ_x که مقدار E را حداقل می‌کند، به عنوان تخمین پارامترهای کالیبراسیون مورد نظر قرار گرفته است.

در روش جستجوی فراگیر برای β_x ، γ_x ، با توجه به کوچک بودن این زاویه‌ها، محدوده جستجوی $\pm 7^\circ$ برای آن‌ها در نظر گرفته شد. قرار دادن مقادیر مختلف برای این دو مجهول در سه حلقه تو در تو در نرم افزار انجام شده است. برای کاهش بار محاسباتی، جستجوی فراگیر در دو مرحله انجام گردیده است. در مرحله اول، جستجو برای هر یک از سه زاویه مجهول در محدوده $\pm 7^\circ = \pm R_1$ با تعداد نقاط $N_{\text{point}}=20$ و قدرت تفکیک $\Delta_1=2R_1/(N_{\text{point}}-1)=0.7368^\circ$ انجام شده است.

β_x و γ_x که در این جستجو خطای E را حداقل می‌کنند، به عنوان نقطه مرکزی جستجو در مرحله دوم انتخاب شده و جستجو حول نقطه مرکزی با تعداد نقاط $N_{\text{point}}=20$ در محدوده $\pm R_2 = \pm \Delta_1/2$ برابر $\pm 0.3684^\circ$ و قدرت تفکیک $\Delta_2=2R_2/(N_{\text{point}}-1)$ برابر 0.0388° برای هر یک از دو زاویه مجهول انجام گردیده است. در هر مرحله جستجو به ازاء γ_x و β_x قرار داده شده، تخمین پارامترهای $\{k_{\xi i}, \gamma_x, \beta_x, \{k_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=0,1,2,3\}$ از حل حداقل مربعات معادله $A k_{\xi} = b_{\xi}$ بدست آمده که در آن:

شتاب و چرخش زاویه‌ای حس شده را به خروجی حسگر ربط دهد. مقادیر واقعی شتاب و چرخش زاویه‌ای با مقادیر مورد انتظار خروجی‌های شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، یعنی روابط (۹) و (۱۰) که از حسگرهای آونگ حاصل می‌شوند، برابر قرار داده شده است. بدین ترتیب معادلاتی بدست آمده که با حل آن‌ها مجهول‌های مدل کالیبراسیون شتاب‌سنج و ژيروسکوپ تخمین زده شده‌اند. مطابق با روابط (۱۱) و (۱۲) در مدل حاضر برای حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ مقدار بایاس، ضریب مقیاس و حساسیت متقابل در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} a'_{\xi, n} + g'_{\xi, n} = v_{\xi, n} = \\ k_{\xi 0} + k_{\xi 1} a'_{\xi x, n} + k_{\xi 2} a'_{\xi y, n} + k_{\xi 3} a'_{\xi z, n} \end{aligned} \quad (11)$$

$\xi=x,y,z, n=1, \dots, N$

$$\begin{aligned} \omega_{\xi, n} = h_{\xi 0} + h_{\xi 1} \omega_{\xi x, n} + h_{\xi 2} \omega_{\xi y, n} \\ + h_{\xi 3} \omega_{\xi z, n}, \xi=x,y,z, n=1, \dots, N \end{aligned} \quad (12)$$

در روابط فوق، n اندیس زمان گسسته، N تعداد نمونه داده‌های جمع آوری شده، $a'_s = [a'_{sx} \ a'_{sy} \ a'_{sz}]^T$ خروجی شتاب‌سنج، $a' = [a'_x \ a'_y \ a'_z]^T$ شتاب دینامیکی در دستگاه مختصات بدنه، $g' = [g'_x \ g'_y \ g'_z]^T$ شتاب جاذبه زمین در دستگاه مختصات بدنه، $\{k_{x0}, k_{y0}, k_{z0}\}$ مقادیر بایاس برای هر بعد خروجی شتاب‌سنج، $\{k_{x1}, k_{y2}, k_{z3}\}$ مقادیر ضریب مقیاس برای هر بعد خروجی شتاب‌سنج، $\{k_{x2}, k_{x3}, k_{y1}, k_{y3}, k_{z1}, k_{z2}\}$ ضرایب حساسیت متقابل شتاب‌سنج، $\omega_{s\xi, n}$ خروجی حسگر ژيروسکوپ، $\omega_{\xi, n}$ مقدار مورد انتظار خروجی حسگر ژيروسکوپ، $h_{\xi 0}$ مقادیر بایاس ثابت برای هر محور ژيروسکوپ، $\{h_{x1}, h_{y2}, h_{z3}\}$ مقادیر ضریب مقیاس برای هر محور ژيروسکوپ و $\{h_{x2}, h_{x3}, h_{y1}, h_{y3}, h_{z1}, h_{z2}\}$ مقادیر ضرایب حساسیت متقابل ژيروسکوپ می‌باشند. مقادیر $v_{\xi, n}$ در رابطه (۱۱) مؤلفه‌های بردار a'_s در رابطه (۹) قرار داده می‌شوند. مقادیر $\omega_{\xi, n}$ در رابطه (۱۲) نیز از رابطه (۱۰) بدست می‌آیند. الگوریتم کالیبراسیون شتاب‌سنج، مجهول‌های $\{k_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=0,1,2,3\}$ ، γ_x ، β_x را تخمین می‌زند. معیار تخمین مجهول‌ها، روش حداقل

از حذف اثر جاذبه زمین)، و صفر بودن متوسط چرخش زاویه‌ای (خروجی ژيروسکوپ) قابل تخمین است.

۵- پیاده‌سازی سخت افزاری

برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری حسگر موج‌نگار، رویکرد استفاده از حسگرهای MEMS کوچک و کم هزینه شتاب‌سنج ADXL345 و ژيروسکوپ L3G4200D انتخاب شده است. برای کاهش نویز (خطای اندازه‌گیری) حسگرها، تعدادی شتاب‌سنج و ژيروسکوپ بصورت موازی عمل کرده و خروجی آن‌ها با هم برآیندگیری شده‌اند، بصورتی که بخش پردازش، یک حسگر برآیند شده شتاب‌سنج و یک حسگر برآیند شده ژيروسکوپ حس می‌نماید. این رویکرد در واقع همان روش معروف به دایورسیتی می‌باشد. حسگر قطب‌نما نیز از نوع MEMS HMC4385 انتخاب شده است. شکل (۷) بورد سخت افزاری حسگر موج‌نگار را نشان می‌دهد که در آن ۱۶ عدد شتاب‌سنج و ۸ عدد ژيروسکوپ بکار رفته است. نرم‌افزار پردازش سیگنال در نسخه اولیه روی یک مادر بورد صنعتی و در نسخه نهایی روی پردازش‌گر ARM7 اجرا گردیده است.

۶- آزمون‌های میدانی

آزمون میدانی حسگر موج‌نگار طراحی شده در زمستان سال ۱۳۹۱ در منطقه آب‌های بندر انزلی انجام شد. برای ارزیابی عملکرد حسگر موج‌نگار طراحی شده در حالت میدانی در دریا از آنالیز حوزه فرکانس تابع طیفی موسوم به Check Ratio استفاده شده است.

نسبت Check Ratio که یک معیار مهم صحت سری‌های زمانی "هیو" و شیب‌های موج است، بصورت تابع $R(f)$ بر حسب فرکانس f (Hz) طبق رابطه (۱۷) محاسبه شده است [۱۶]. مقدار این نسبت در حالت ایده‌آل باید در هر فرکانس برابر با مقدار ثابت ۱ باشد.

$$R(f) = \frac{1}{K(2\pi f)} \sqrt{\frac{C_{22}(f) + C_{33}(f)}{C_{11}(f)}} \quad (17)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a'_{sx,1} & a'_{sy,1} & a'_{sz,1} \\ 1 & a'_{sx,2} & a'_{sy,2} & a'_{sz,2} \\ M & M & M & M \\ 1 & a'_{sx,N} & a'_{sy,N} & a'_{sz,N} \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

$$k_{\xi} = \begin{bmatrix} k_{\xi 0} \\ k_{\xi 1} \\ k_{\xi 2} \\ k_{\xi 3} \end{bmatrix}, \quad b_{\xi} = \begin{bmatrix} v_{\xi,1} \\ v_{\xi,2} \\ M \\ v_{\xi,N} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

با تخمین زاویه‌های β_x و γ_x الگوریتم کالیبراسیون ژيروسکوپ، مجهول‌های $\{h_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=0,1,2,3\}$ را تخمین می‌زند. معیار تخمین مجهول‌ها، حداقل مربعات بوده و عبارت است از حداقل کردن خطای E تعریف شده بصورت زیر:

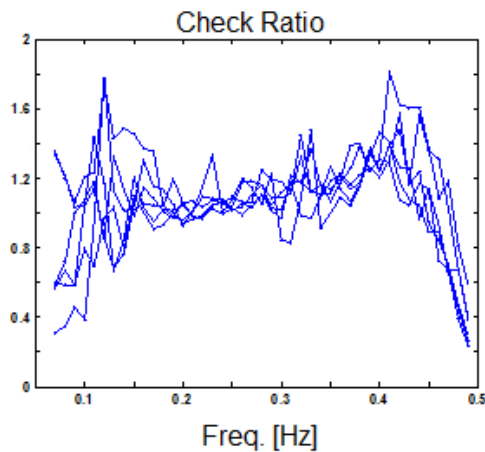
$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N \left(h_{\xi 0} + h_{\xi 1} \omega_{sx,n} + h_{\xi 2} \omega_{sy,n} + h_{\xi 3} \omega_{sz,n} - \omega_{\xi,n} \right)^2 \quad (15)$$

تخمین مجهول‌های $h_{\xi i}$ با حل حداقل مربعات معادله $A h_{\xi} = b_{\xi}$ انجام شده که در آن:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{sx,1} & \omega_{sy,1} & \omega_{sz,1} \\ 1 & \omega_{sx,2} & \omega_{sy,2} & \omega_{sz,2} \\ M & M & M & M \\ 1 & \omega_{sx,N} & \omega_{sy,N} & \omega_{sz,N} \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

$$h_{\xi} = \begin{bmatrix} h_{\xi 0} \\ h_{\xi 1} \\ h_{\xi 2} \\ h_{\xi 3} \end{bmatrix}, \quad b_{\xi} = \begin{bmatrix} \omega_{\xi,1} \\ \omega_{\xi,2} \\ M \\ \omega_{\xi,N} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

ضرایب $\{h_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=1,2,3\}$ و $\{k_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=1,2,3\}$ که بیان‌گر ضریب مقیاس و حساسیت متقابل هستند، برای تصحیح خروجی حسگرها در حالت عملکرد میدانی در دریا ذخیره و استفاده شده‌اند. ضرایب $h_{\xi 0}$ و $h_{\xi 1}$ که بیان‌گر بایاس هستند، قابل بکارگیری در حالت میدانی نیستند. زیرا بایاس با تغییرات دما و با گذشت زمان بصورت تصادفی تغییر می‌کند. در حالت عملکرد میدانی مقدار بایاس به طریق ایجاد معادله صفر بودن متوسط شتاب دینامیکی در دستگاه بدنه (خروجی شتاب‌سنج پس



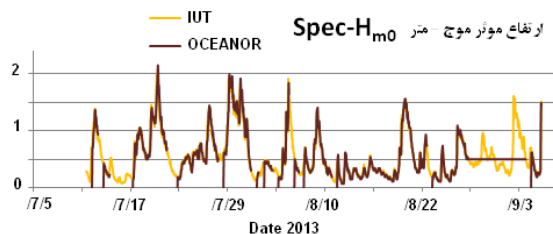
شکل (۸) شش نمونه منحنی Check Ratio مربوط به آزمون میدانی انجام شده در آب‌های بندر انزلی.



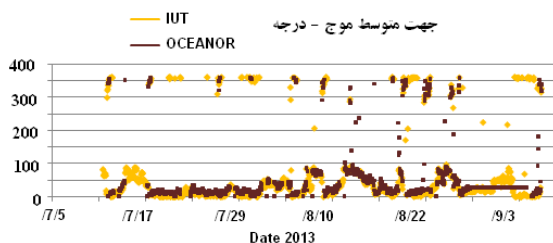
شکل (۷) نمونه ساخته شده برد حسگرهای شتابسنج و ژيروسکوپ.

در شکل‌های یاد شده، داده‌های بویه اشنور نیز رسم شده‌اند که انطباق خوبی با داده‌های حسگر طراحی شده دارد.

لازم به ذکر است که جهت متوسط موج با شرایط جغرافیایی منطقه که محدوده مورد انتظار زاویه ورود موج را مشخص می‌کند، هم‌خوانی دارد (مطابق شکل (۱۱)).



شکل (۹) حداکثر ارتفاع موج اندازه‌گیری شده از روی سری زمانی هیو توسط حسگر موج‌نگار طراحی شده (IUT) و بویه اشنور.



شکل (۱۰) جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف توسط حسگر موج‌نگار طراحی شده (IUT) و بویه اشنور.

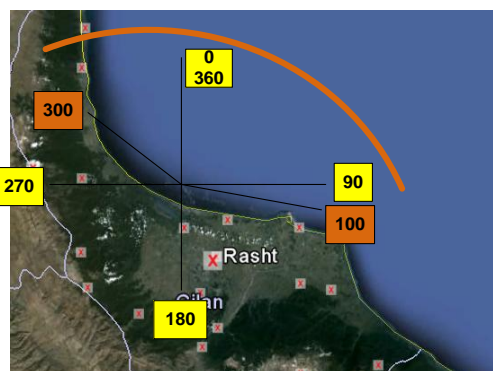
در رابطه فوق $C_{11}(f)$ ، $C_{22}(f)$ ، $C_{33}(f)$ به ترتیب طیف سری زمانی "هیو" و شیب‌های موج $\partial z/\partial x$ و $\partial z/\partial y$ می‌باشد. $K(\square)$ تابع عدد موج بر حسب فرکانس زاویه‌ای می‌باشد \square (rad/s) که از حل عددی معادله $\omega^2 = Kg \tanh(Kh)$ بدست می‌آید. در این رابطه $g=9.8$ m/s² شتاب جاذبه زمین و $h(m)$ عمق دریا می‌باشد [۱۴]. شکل (۸) منحنی Check Ratio را برای ۶ مورد داده برداری میدانی نشان می‌دهد. با توجه به عوامل مختلف خطا، منحنی‌های بدست آمده از مقدار ۱ انحراف دارد. این میزان انحراف قابل قبول بوده و صحت کلی حسگر موج‌نگاری طراحی شده را اثبات می‌نماید.

صحت سنجی مجموعه پردازش‌های شبیه‌سازی امواج دریا و حسگر موج‌نگار با پیاده‌سازی و آزمون فیزیکی موج‌نگار انجام شده است. براساس ساختار پردازشی مجموعه پردازش‌های شبیه‌سازی امواج دریا و حسگر موج‌نگار تشریح شده در این مقاله، یک حسگر موج‌نگار نصب بر بویه طراحی و ساخته و با مجموعه آزمون آونگ بصورت فیزیکی کالیبره گردید. سپس این حسگر در آب‌های بندر انزلی در نزدیکی (حدود ۵۰۰ متر) یک بویه موج‌نگار دیگر (بویه اشنور) به عنوان حسگر مرجع، آزمون شد. نتایج تخمین حداکثر ارتفاع موج، جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است. ارتفاع مؤثر موج یک پارامتر استاندارد مشتق از سری زمانی هیو بوده و عبارت از متوسط یک سوم بزرگترین ارتفاع موج ضبط شده است.

- [5] Marimon, M. C., Villegas, E. I., Borja, M. J. H., Tangonan, G. L. and Libatique, N. J. C., "Low Cost Sensor System for Wave Monitoring", Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, pp. 312-316, 2011.
- [6] Teng, C., Mettlach, T., Chaffin, J., Bass, R., Bond, C., Carpenter, C., Dinoso, R., Hellenschmidt, M., Bernard, L., "National Data Buoy Center 1.8-meter Discus Buoy, Directional Wave System", IEEE Oceans Conference, pp. 1-9, Oct. 2007.
- [7] Teng, C., Bouchard, R., Riley, R., Mettlach, T., Dinoso, R., Chaffin, J., "NDBC's Digital Directional Wave Module", Oceans MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, pp.1-8, 2009.
- [8] Riley, R., Teng, C., Bouchard, R., Dinoso, R. and Mettlach, T., "Enhancements to NDBC's Digital Directional Wave Module", IEEE Oceans Conference, pp. 1-10, Sept. 2011.
- [9] Kuperus, J., "Wave Monitoring Using Wireless Sensor Nodes," Master's Thesis, University of Melbourne, Melbourne, Australia, Sep. 2009.
- [10] Brown, H. C., Meadows, G. A., "Wave Sensing in the Upper-Great Lakes Observing System", Ocean Waves Workshop, Nov. 2011.
- [11] Williams, J. A., "Vector Averaging in a Wave Field", IEEE Oceans Conference, pp. 1-8, 2013.
- [12] Woodman, O. J., "An Introduction to Inertial Navigation", University of Cambridge, Technical Report, Aug. 2007.
- [13] Pascal, R. W., Yelland, M. J., Srokosz, M. A., Moat, B. I., Waugh, E. M., Comben, D. H., Cansdale, A. G. and Hartman, M. C., "A Spar Buoy for High-Frequency Wave Measurements and Detection of Wave Breaking in the Open Ocean", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 28, pp. 590-605, Dec. 2009.
- [14] Ochi, M. K., "Ocean Waves: The Stochastic Approach", Cambridge Ocean Technology Series, Cambridge University Press, July 2005.

[۱۵] نوربخش، "تبدیل زاویه‌های پیچ - رول اندازه‌گیری شده از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات ثابت"، گزارش داخلی پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.

- [16] Swaykos, J., "Real-Time Quality Control Tests for in Situ Ocean Surface Waves", U.S. Integrated Ocean Observing System Program Office Validation, Version 10, July 2007.



شکل (۱۱) محدوده مورد انتظار زاویه ورود موج با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه استقرار بویه موج‌نگاری.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

حسگر موج‌نگار الکترونیکی بر اساس زیر حسگرهای شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و قطب‌نما با فن‌آوری MEMS پیاده‌سازی شده است. با قطب‌نما زاویه "یاو" و با جریان داده ژيروسکوپ زاویه‌های پیچ و رول و با جریان داده شتاب‌سنج، جابجایی عمودی "هیو" تخمین زده شده است. برای کاهش نویز زیرحسگرها تعدادی از آنها با یکدیگر موازی شده و برآیند آنها استفاده گردیده است. برای کالیبراسیون زیرحسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، یک مجموعه آزمون ساده و کم هزینه بصورت آونگ طراحی و پیاده‌سازی شده است. آزمون‌های میدانی صحت کلی عملکرد حسگر موج‌نگار طراحی شده را نشان داده است. در بررسی صحت عملکرد میدانی حسگر ساخته شده از معیار check ratio استفاده شده و بیشینه اختلاف نتایج طراحی و داده‌های میدانی کمتر از ۲ درصد مشاهده گردیده است.

۸- مراجع

- [1] Longuet-Higgins, M. S., Cokelet, E. D. and Smith, N. D., "Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves Using the Motions of a Floating Buoy", IEEE Ocean Wave Spectra Conferemnce, pp. 111-132, 1961.
- [2] Data Sheet, "Ocean Waves HIPPY-40", Coastal Environmental Systems, Inc., 2013, Web Site of: www.CoastalEnvironmental.com.
- [3] Seawatch Wave scan Buoy, 2013, Web Site of: www.oceanor.com.
- [4] Triaxys™ Directional Wave Sensor, 2013, Web Site of: www.axystechnologies.com.