

ارزیابی عملکرد یک حسگر موج نگار از طریق نتایج آزمایشگاهی و میدانی

سیدمصطفی نوربخش

احمدرضا زمانی

* محمدعلی بدرا

استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا

استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا

استادیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا

چکیده

بررسی چند جنبه صحت عملکرد حسگر موج نگار الکترونیکی طراحی شده و کالیبراسیون حسگرهای شتاب سنج و ژیروسکوپ آن مورد نظر قرار گرفته است. پیاده سازی این حسگر موج نگار الکترونیکی بر اساس زیرحسگرهای شتاب سنج، ژیروسکوپ و قطبینما با فن آوری^۱ و با استفاده از روش تکرار موازی حسگرها^۲ برای ارتقاء عملکرد آن می باشد. از جنبه آزمایشگاهی دو ابزار آزمون آونگ و چرخ گردون مورد استفاده قرار گرفته است. از جنبه میدانی، عملکرد حسگر موج نگار در دریا با برخی تجزیه و تحلیل های کنترل کیفی حوزه زمان و حوزه فرکانس و نیز از طریق مقایسه با یک حسگر موج نگار مرجع مورد تأیید قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: حسگر موج نگار الکترونیکی، تکرار موازی حسگرها، کالیبراسیون حسگرها، شتاب سنج، ژیروسکوپ.

Operational Assessment of an Electronic Wave Sensor Using Experimental and Field Results

M. Noorbakhsh

Assistant professor, Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre

A. R. Zamani

Assistant professor, Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre

M. A. Badri

Assistant professor, Assistant Professor, Isfahan University of Technology, Subsea Research & Development Centre

Abstract

Operational assessment of Electronic Wave Measurement sensors and calibration of accelerometer, gyro sensors were considered. The designation and implementation of accelerometer, gyro and compass was done due to Micro Electro Mechanical systems (MEMS) technology and with regards to diversity method to promote the performance. The investigations were done by ... and ... due to experimental aspects. Besides, operational assessment of Electronic Wave Measurement sensors was invoked by analytic results in time and frequency domain and by field results generated from a referenced Wave Measurement Sensor.

Keywords: Electronic Wave Measurement Sensor, Diversity, Calibration of Sensors, Accelerometer, Gyroscope.

¹ Micro Electro Mechanical Systems

² Diversity

۱- مقدمه

با توجه به گسترش اندازه‌گیری‌های میدانی موج نگاری در داخل کشور، ضرورت دستیابی به دانش فنی طراحی، ساخت و کالیبراسیون حسگرهای اندازه‌گیری مشخصه‌های دریایی نظیر حسگر موج نگار 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 بکار گیری یک نمونه حسگر موج نگار بر مبنای به کار گیری فن آوری MEMS انجام شده است.

حسگرهای موج نگار کاربرد وسیعی در اندازه‌گیری مشخصه‌های امواج دریا دارند. این حسگرها عمدتاً در بويه‌های هواشناسی و اقیانوس شناسی نصب گردیده و از آنها در ثبت اطلاعات سری زمانی امواج و طیف حاصل از آنها استفاده می‌شود. از جمله اولین حسگرهای موج نگار 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 شتاب سنج و ژیروسکوپ تشکیل شده است و شبیهای موج و شتاب در جهت عمودی (قابل تبدیل به جابجایی عمودی) را اندازه می‌گیرد. استفاده از حسگرهای موج نگار رول-پیچ تا امروزه تداوم یافته‌اند. نمونه‌های معتبر و شناخته شده از حسگرهای مکانیکی با ابعاد بزرگ و وزن بالا مانند حسگر آنانلوگ هیبی^۲ با وزن ۳۶ کیلوگرم [۲] تشکیل شده‌اند. نمونه‌های نوین حسگرهای موج نگار از حسگرهای الکترونیکی استفاده می‌کنند که ابعاد و وزن به مراتب کوچکتری دارند؛ که از جمله آنها می‌توان به حسگر بویه موج نگار شرکت اشنور^۳ [۳] و حسگر بویه موج نگار تری اکسیس^۴ [۴] اشاره نمود. این حسگرها مجهز به بوردهای پردازش سیگنال برای محاسبات موج نگاری می‌باشد. ساخت حسگرهای فوق در حال حاضر توسط چند شرکت خارجی صورت می‌پذیرد و مسائل آزمون و کالیبراسیون آنها نیز باستی در همان شرکتها و با صرف زمان نسبتاً طولانی انجام شود. به کار گیری فن آوری MEMS در ادامه سیر تحول حسگرهای شتاب سنج و ژیروسکوپ از حالت پیاده سازی تمام مکانیکی بسوی پیاده سازی میکرو الکترونیکی است که ابعاد، وزن و هزینه پایینی دارند و در واقع، فن آوری روز می‌باشد [۱۳-۵].

حسگر موج نگاری باید سه کمیت حرکت عمودی^۵ بویه بر حسب زمان (t)^۶ Z و شبیهای موج نسبت به محورهای افقی X، Y یعنی $\partial z / \partial x$ ، $\partial z / \partial y$ را به عنوان سری‌های زمانی اولیه برای پردازش‌های موج نگاری فراهم کند [۱۴].

در این مقاله پس از مقدمه، ساختار کلی حسگرموج نگار در بخش ۲ معرفی شده است. سیستم ساخت افزار و پردازش کالیبراسیون زیر حسگرهای موج نگار در بخش ۳ تشریح شده است. یک مجموعه آزمون و کالیبراسیون آزمایشگاهی به صورت آونگ به این منظور طراحی و پیاده‌سازی شده است که با آن، علاوه بر کالیبراسیون زیر حسگرهای صحت کلی حسگر موج نگار نیز قابل کنترل است. در بخش ۴ صحت سنجی حسگر موج نگار طراحی شده با امکانات آزمایشگاهی بیان شده است. این امکانات عبارتند از همان مجموعه آزمون آونگ که برای کالیبراسیون بکار می‌رود به علاوه مجموعه چرخ گردون. این تجهیزات در آزمایشگاه هیدرو آبی‌رودینامیک پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا نصب گردیده است. در بخش ۵ صحت سنجی عملکرد سیستم موج نگار در دریا بر اساس آزمونهای کنترل کیفی و در بخش ۶ صحت سنجی آن بر اساس مقایسه با حسگر مرجع دیگر بیان شده است.

۲- معرفی کلی ساختار حسگرموج نگار

حسگر موج نگار شامل یک بورد حسگرهای MEMS شتاب سنج، ژیروسکوپ، و قطب‌نما، و یک بورد پردازشگر ARM است که سیگنال‌های حسگرهای یاد شده را دریافت و پردازش می‌کند تا در نتیجه آن، سری‌های زمانی هیو و شبیهای موج (یا به صورت معادل، زاویه‌های رول و پیچ) حاصل شده و از روی آنها پارامترهای دیگر موج نگاری تخمين زده شود. برای حصول دقت بیشتر سیستم از تکرار حسگرهای شتاب سنج و ژیروسکوپ MEMS و برایند گیری خروجی آنها استفاده می‌شود.

پردازش‌های انجام شده برای حصول سری‌های زمانی شامل دو محور «جريان داده ژیروسکوپ» و «جريان داده شتاب سنج» است. در جريان داده ژیروسکوپ، از سیگنال‌های ژیروسکوپ پس از إعمال تصحیح کالیبراسیون و تبدیل محورهای مختصات بدنه به محورهای مختصات جغرافیایی به کمک سیگنال «یاو» حسگر مغناطیسی (قطب‌نمایی)، MEMS، انتگرال گیری می‌شود تا سری‌های زمانی رول و پیچ به دست بیاید.

در جريان داده شتاب سنج، ابتدا تصحیح کالیبراسیون لازم صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از زاویه‌های رول و پیچ و یاو به دست آمده، تبدیل محورهای مختصات از بدنه به ثابت جغرافیایی انجام می‌شود. سپس از مؤلفه قائم سیگنال شتاب سنج، دو بار انتگرال گرفته شده و فیلترهای لازم برای حذف نویز روی آن انجام می‌شود تا سری زمانی هیو حاصل شود.

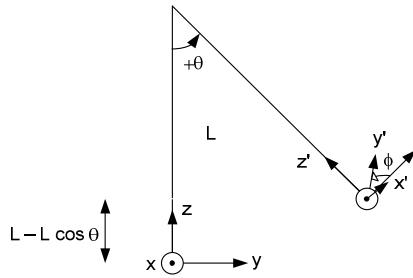
¹ Roll-pitch

² Hippy

³ OCEANOR

⁴ TRIAXYS

⁵ Heave



شکل ۱- دستگاههای مختصات و مدل دینامیک آونگ

در کالیبراسیون، در نظر گرفتن عوامل غیر ایده آل آونگ برای حصول دقیق مورد نیاز، ضروری است. از این رو برای زاویه های پیچ و رول مقادیر بایاس به ترتیب β_x , β_y , γ_x لحاظ می شود. حاصل از ترکیب انحراف زاویه ای شافت آونگ از حالت قائم و عدم تراز بودن جعبه نصب حسگر موج نگار است. بدین صورت زاویه های "یاو" ، "پیچ" و "رول" به صورت $roll: \gamma = \theta + \gamma_x$, $pitch: \beta = \beta_x$, $yaw: \alpha = \phi$ تصحیح شده است.

بدین صورت ماتریس تبدیل T در شبیه سازی بر حسب ϕ, θ . رابطه موقعیت مورد انتظار آونگ x, y, z بر حسب پارامترهای آونگ (θ, ϕ, L) و رابطه مؤلفه های شتاب مورد انتظار در دستگاه مختصات ثابت معین است. در اینجا بردار شتاب در دستگاه بدن به عنوان خروجی مورد انتظار حسگر شتاب سنج (بدون نویز و بایاس) بر حسب ϕ, θ به صورت $a'_{sh} = T^{-1}(a + g)$ شبهیه سازی می شود. همچنین مقادیر مورد انتظار خروجی های ژیروسکوپ عبارت است از:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \cos \phi \cos \beta_x \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_y &= -\sin \phi \cos \beta_x \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ \omega_z &= \sin \beta_x \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\phi}{dt}\end{aligned}\quad (1)$$

در روابط (1) $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ به ترتیب سرعت های زاویه ای رول، یاو و پیچ را نسبت به دستگاه بدن نشان می دهد. در فرآیند کالیبراسیون، برای حسگرهای شتاب سنج و ژیروسکوپ مدلی در نظر گرفته شده که مقادیر واقعی شتاب و چرخش زاویه ای حس شده را به خروجی حسگر ربط دهد. مقادیر واقعی شتاب و چرخش زاویه ای با مقادیر مورد انتظار خروجی های شتاب سنج و ژیروسکوپ، که از حسگرهای آونگ حاصل می شوند، برابر قرار داده شده است. بدین ترتیب معادلاتی به دست آمده که با حل آنها مجهول های مدل کالیبراسیون شتاب سنج و ژیروسکوپ تخمین زده شده اند. در مدل حاضر، برای حسگرهای شتاب سنج و ژیروسکوپ، مقادار بایاس، ضریب مقیاس و حساسیت متقابل در نظر گرفته شده اند.

-۳- کالیبراسیون آزمایشگاهی حسگرهای موج نگاری

در مورد حسگرهای شتاب سنج و ژیروسکوپ موارد زیر را به عنوان عوامل خطای می توان بر شمرد که موجب فاصله گرفتن مقادیر خروجی نهایی حسگر موج نگار از مقادیر واقعی می شوند:

- بردار مقدار ثابت خروجی (آفست)

- حساسیت متقابل^۱

- ضریب مقیاس^۲

- اثرات غیر خطی

در فرکانس های پایین در حد امواج دریا (۰,۰۴ تا ۰,۳ هرتز) مقادیر عوامل خطای فوق (به غیر از اثرات غیر خطی) با مقادیر مطلوب قابل مقایسه است. عوامل خطای یاد شده مواردی غیر از نویز اندازه گیری حسگر است که یک فرآیند تصادفی غیر قابل تخمین بوده و تنها با فیلتر کردن در فرکانس های خارج باند مقادیر مطلوب، قابل کاهش است. پردازش «مدل کردن عوامل مختلف خطای»، «تخمین پارامترهای این مدل» و «اصلاح مقادیر حسگرها با توجه به مدل و پارامترهای تخمین زده شده آن» کالیبراسیون حسگر نام دارد که در این کار پژوهشی به آن پرداخته شده است. به همین منظور یک مجموعه آزمایشگاه به صورت آونگ طراحی و پیاده سازی شده است. شکل ۱ دستگاههای مختصات و مدل دینامیک آونگ به طول L را نشان می دهد. در این شکل محورهای x, y, z دستگاه مختصات ثابت و مرجع و محورهای x', y', z' دستگاه مختصات بدن را تشکیل می دهند. محورهای z در صفحه افقی و محور z عمود بر صفحه افقی است. با توجه به شکل ۱ دستگاه مختصات ثابت ابتدا حول محور y به اندازه زاویه θ ، و سپس حول محور z (جدید) به اندازه زاویه ϕ دوران می کند. با تطبیق این دوران با تعریف زاویه های "یاو" ، "پیچ" و "رول" ، $yaw: \alpha = \phi$, $roll: \gamma = \theta$, $pitch: \beta = 0$ مورد نظر قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به دلیل حضور مقادیر زیاد فلز آهن در محیط اطراف در هنگام آزمون آونگ، امکان تأمین زاویه yaw از طریق حسگر قطب نما وجود نداشته و نیاز به حسگر دیگری است که همان حسگر زاویه ϕ می باشد.

¹Cross axis sensitvity

²Scale factor

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 فرآگیر در دو مرحله انجام گردیده است. در مرحله اول، جستجو در محدوده $\pm R_1 = \pm 7^\circ$ با تعداد نقاط $\Delta_1 = 2R_1/(N_{\text{point}} - 1) = 0.7368^\circ$ و $N_{\text{point}} = 20$ برای هر یک از سه زاویه مجهول انجام شده است. β_x که در این جستجو خطای E را حداقل کند، 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 $\Delta_2 = 2R_2/(N_{\text{point}} - 1) = 0.3684^\circ$ و $R_2 = 0.0388^\circ$ برای هر یک از دو زاویه مجهول انجام گردیده است. در هر مرحله جستجو به ازاء β_x برای داده شده، تخمین پارامترهای $\{k_{\xi_i}, \xi=x,y,z, i=0,1,2,3\}$ از حل حداقل مربعات معادله $A k_\xi = b_\xi$ به دست آمده که در آن:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a'_{sx,1} & a'_{sy,1} & a'_{sz,1} \\ 1 & a'_{sx,2} & a'_{sy,2} & a'_{sz,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & a'_{sx,N} & a'_{sy,N} & a'_{sz,N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_\xi = \begin{bmatrix} k_{\xi_0} \\ k_{\xi_1} \\ k_{\xi_2} \\ k_{\xi_3} \end{bmatrix}, \quad b_\xi = \begin{bmatrix} v_{\xi,1} \\ v_{\xi,2} \\ \vdots \\ v_{\xi,N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

با تخمین زاویه‌های β_x , γ_x , α ، الگوریتم کالیبراسیون ژیروسکوپ، 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 به صورت زیر:

$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N (h_{\xi,0} + h_{\xi,1}\omega_{sx,n} + h_{\xi,2}\omega_{sy,n} + h_{\xi,3}\omega_{sz,n} - \omega_{\xi,n})^2 \quad (7)$$

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

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{sx,1} & \omega_{sy,1} & \omega_{sz,1} \\ 1 & \omega_{sx,2} & \omega_{sy,2} & \omega_{sz,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \omega_{sx,N} & \omega_{sy,N} & \omega_{sz,N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$h_\xi = \begin{bmatrix} h_{\xi,0} \\ h_{\xi,1} \\ h_{\xi,2} \\ h_{\xi,3} \end{bmatrix}, \quad b_\xi = \begin{bmatrix} \omega_{\xi,1} \\ \omega_{\xi,2} \\ \vdots \\ \omega_{\xi,N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$a'_{\xi,n} + g'_{\xi,n} = v_{\xi,n} = k_{\xi,0} + k_{\xi,1}a'_{sx,n} + k_{\xi,2}a'_{sy,n} + k_{\xi,3}a'_{sz,n} \quad (2)$$

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

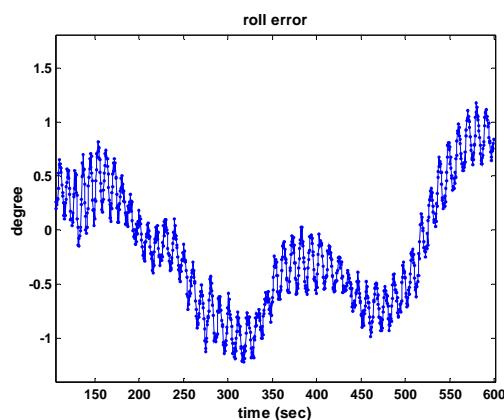
$$\omega_{\xi,n} = h_{\xi,0} + h_{\xi,1}\omega_{sx,n} + h_{\xi,2}\omega_{sy,n} + h_{\xi,3}\omega_{sz,n} \quad (3)$$

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

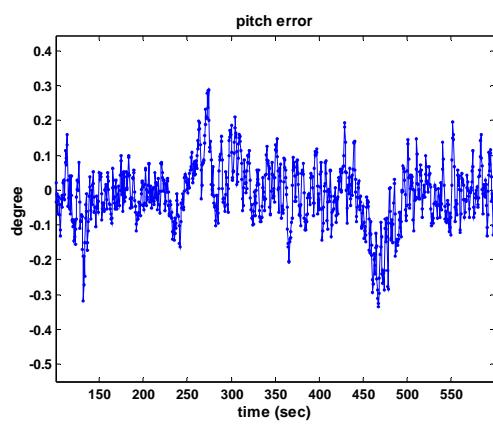
در روابط فوق، n اندیس زمان گستته، N تعداد نمونه داده‌های جمع آوری شده، $a'_s = [a'_{sx} \quad a'_{sy} \quad a'_{sz}]^T$ خروجی شتاب‌سنج، $a' = [a'_x \quad a'_y \quad a'_z]^T$ شتاب دستگاه مختصات بدن، $g' = [g'_x \quad g'_y \quad g'_z]^T$ شتاب جاذبه زمین در دستگاه مختصات بدن، $\{k_{x0}, k_{y0}, k_{z0}\}$ مقدادیر بایاس برای هر بعد خروجی شتاب سنج، $\{k_{x1}, k_{y2}, k_{z3}\}$ مقدادیر ضریب مقیاس برای هر بعد خروجی شتاب سنج، $\{k_{x2}, k_{x3}, k_{y1}, k_{y3}, k_{z1}, k_{z2}\}$ ضرایب حساسیت متقابل شتاب سنج، $\omega_{\xi,n}$ خروجی حسگر ژیروسکوپ، $h_{\xi,0}$ مقدار مورد انتظار خروجی حسگر ژیروسکوپ، $\{h_{x1}, h_{y2}, h_{z3}\}$ مقدادیر ضریب برای هر محور ژیروسکوپ، $\{h_{x2}, h_{x3}, h_{y1}, h_{y3}, h_{z1}, h_{z2}\}$ مقدادیر ضرایب ژیروسکوپ می‌باشند. مقدادیر $v_{\xi,n}$ از رابطه (2) و مقدادیر $\omega_{\xi,n}$ از رابطه (3) به دست آمده اند. الگوریتم کالیبراسیون شتاب سنج، مجهولهای $\{\beta_x, \gamma_x, \alpha, k_{\xi_i}, \xi=x,y,z, i=0,1,2,3\}$ را تخمین می‌زند. معیار تخمین مجهول‌ها، روش حداقل مربعات بوده و عبارت است از حداقل کردن خطای E که به صورت زیر تعریف شده است:

$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N (h_{\xi,0} + h_{\xi,1}\omega_{sx,n} + h_{\xi,2}\omega_{sy,n} + h_{\xi,3}\omega_{sz,n} - v_{\xi,n})^2 \quad (4)$$

در عبارت خطای فوق، مجهولهای $k_{\xi,i}$ رابطه درجه ۲ با دارند. در حالی که مجهولهای β_x , γ_x , α که در $v_{\xi,n}$ مستتر هستند، رابطه پیچیده تر 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. روشهای که برای حل خطای E انتخاب شد به این صورت است که مقدادیر مختلف برای مجهولهای β_x , γ_x در یک جستجوی فرآگیر قرار داده شده است. برای هر مقدار، مقدادیر $v_{\xi,n}$ محاسبه شده و سپس معادله حداقل مربعات برای E برای مجهولهای $k_{\xi,i}$ به صورت حل بسته تخمین زده شده و در نهایت مجموعه $\{\beta_x, \gamma_x, \alpha, k_{\xi,i}\}$ که مقدار E را حداقل می‌کند، به عنوان تخمین پارامترهای کالیبراسیون مورد نظر قرار گرفته است. در روش جستجوی فرآگیر برای β_x , γ_x , با توجه به کوچک بودن این زاویه‌ها، محدوده جستجوی $\pm 7^\circ$ برای آنها در نظر



شکل ۳ - خطای زاویه رول در آزمون آونگ



شکل ۴ - خطای زاویه پیچ در آزمون آونگ

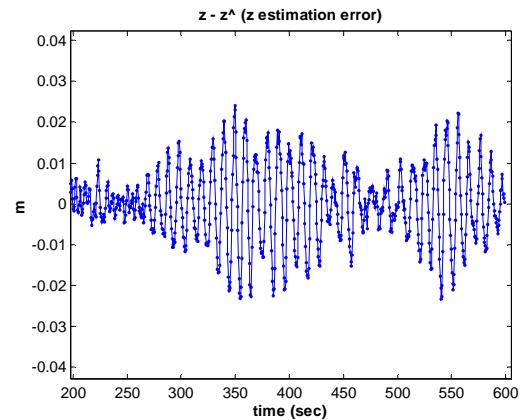
به لحاظ اینکه ارزیابی با همان وسیله کالیبراسیون انجاممی شود، بهترین شرایط دقت پارامترهای کالیبراسیون وجود دارد. لذا بهترین عملکرد دیده می‌شود ضمن اینکه بُرد حرکت عمودی آونگ زیاد نیست. لذا برای ارزیابی واقع بینانه تر باید با ابزارها و روش‌های دیگر نیز مورد آزمون واقع شود.

۲-۴- ارزیابی با مجموعه آزمایشگاهی چرخ گردون
یک گونه دیگر آزمون آزمایشگاهی حسگر موج نگار طراحی شده، بوسیله یک مکانیزم «چرخ گردون» می‌باشد که حسگر را به صورت حرکت دایره‌ای عمودی به شعاع 1 m حرکت می‌دهد، (شکل ۵). لذا منحنی ایده آل و بدون خطای سری زمانی heave بین مقادیر 1- و 1 نوسان می‌کند. تفاوت دامنه از این مقادیر، مبنی خطای حرکت heave است.

ضرایب $\{k_{\xi_i}, \xi = x, y, z, i=1,2,3\}$ که بیانگر ضریب مقیاس و حساسیت متقابل هستند، برای تصحیح خروجی حسگرها در حالت عملکرد میدانی در دریا ذخیره و استفاده شده اند. ضرایب k_{ξ_0} و h_{ξ_0} که بیانگر بایاس هستند، قابل بکارگیری در حالت میدانی نیستند. زیرا بایاس با تغییرات دما و با گذشت زمان به صورت تصادفی تغییر می‌کند. در حالت عملکرد میدانی مقدار بایاس به طریق ایجاد معادله صفر بودن متوسط شتاب دینامیکی در دستگاه بدنه (خروجی شتاب‌سنج پس از حذف اثر جاذبه زمین)، و صفر بودن متوسط چرخش زاویه‌ای (خروجی ژیروسکوپ) قابل تخمین است.

۴- ارزیابی عملکرد حسگر موج نگار طراحی شده از جنبه آزمایشگاهی

۴-۱- ارزیابی با مجموعه آزمون آونگ
در این ارزیابی آزمایشگاهی، حسگر موج نگار با همان مجموعه آزمون آونگ که برای کالیبره کردن زیرحسگرهای آن بکار می‌رود، مورد آزمون واقع می‌شود. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب خطای تخمین سری زمانی هیو و زاویه‌های roll و pitch را در هنگام اجرای آزمون آونگ نشان می‌دهد.



شکل ۲ - خطای هیو در آزمون آونگ

در این مرحله، آزمونهای کنترل کیفی [۱۷] روی داده های ارائه شده توسط حسگر موج نگار و سازگاری آنها با یکدیگر، مبنای صحت سنجی و ارزیابی دقت حسگر موج نگار طراحی شده است.

به عنوان نمونه هایی از آزمون کنترل کیفی در داده برداری های حسگر موج نگار طراحی شده در آبهای بندر انزلی در تابستان سال ۱۳۹۲، شکل ۹ سازگاری حداقل ارتفاع موج (H_{max}) با ارتفاع مؤثر موج ($Hm0$)، یعنی نامساوی « $0 \leq H_{m0} \leq H_{max} \leq 2.5 H_{m0}$ » را نشان می دهد.

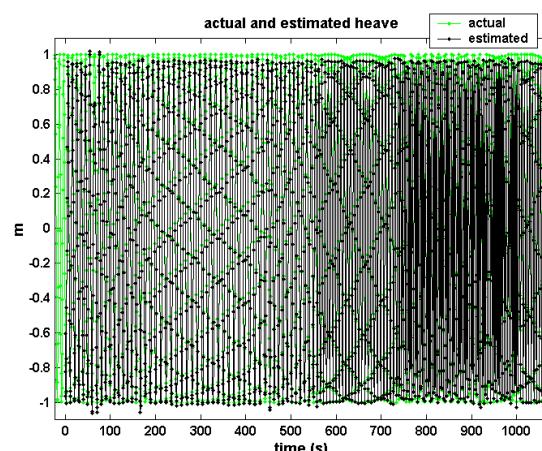


شکل ۷- نمونه بویه موج نگار ساخته شده که حسگر موج نگار در آن قرار می گیرد



شکل ۵- تصویر چرخ گردون طراحی و پیاده سازی شده

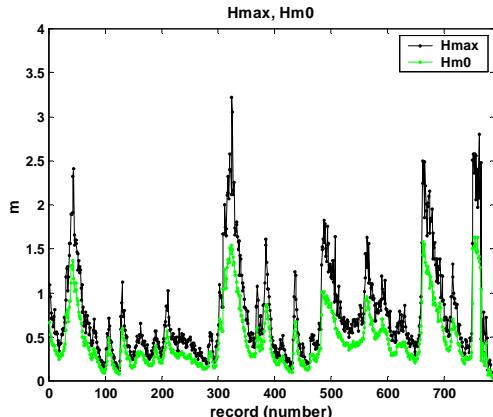
شکل ۶ نتیجه اجرای آزمون حرکت هیوحسگر موج نگار با چرخ گردون را نشان می دهد. در این شکل مقدار تخمین زده شده هیو توسط حسگر موج نگار همراه با مقدار واقعی رسم شده است. فرکانس چرخش بین ۰.۱ تا ۰.۲۷ هرتز متغیر است.



شکل ۶- تخمین هیو و مقدار واقعی آن در آزمون چرخ گردون

۵- ارزیابی میدانی حسگر موج نگار طراحی شده- آزمونهای کنترل کیفی

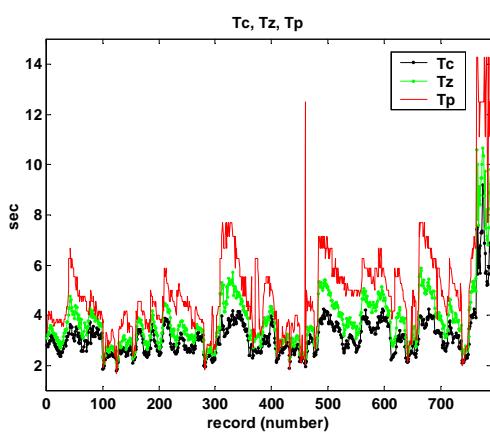
صحت سنجی مجموعه پردازش های شبیه سازی امواج دریا و حسگر موج نگار با پیاده سازی عملی و آزمون فیزیکی موج نگار در دریا انجام شده است. آزمون میدانی حسگر موج نگار طراحی شده در تابستان سال ۱۳۹۲ در منطقه آبهای بندر انزلی انجام شد. در این آزمون حسگر موج نگار ساخته شده در درون یک بویه با بدنه دیسکی شکل نصب گردید و به جمع آوری داده های موج منطقه پرداخت. شکل ۷ نمونه بویه موج نگار ساخته شده و شکل ۸ حسگر موج نگار طراحی و پیاده سازی شده را نشان می دهد. فاصله بین دو بویه نصب شده در دریا حدود ۵۰۰ متر بوده است.



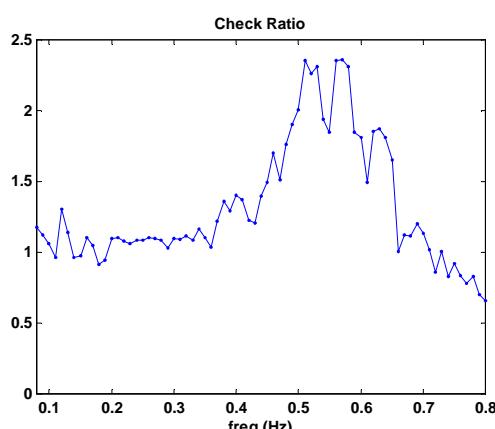
شکل ۹ - منحنی های حداکثر ارتفاع موج H_{max} و ارتفاع مؤثر موج H_{m0}



شکل ۸ - حسگر موج نگار



شکل ۱۰ - منحنی های پریود قله T_c , T_z و T_p که شرط $T_c \leq T_z \leq T_p$ را غالباً برآورده می کنند



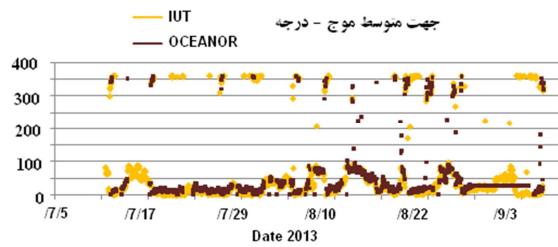
شکل ۱۱ - یک نمونه از منحنی Check Ratio

ارتفاع مؤثر موج یک پارامتر استاندارد مشتق از سری زمانی هیو بوده و عبارت از متوسط یک سوم بزرگترین ارتفاع موج ضبط شده می باشد. شکل ۱۰ سازگاری پریودهای مختلف تخمین زده شده، یعنی نامساوی « $T_c \leq T_z \leq T_p$ » را نشان می دهد. پریود قله بوده و عبارت است از عکس فرکانس پیک طیف هیو. T_z پریود عبور از صفر بوده و پریود متوسط سری زمانی هیو است که تخمین آن بر مبنای عبور منحنی هیو از سطح صفر انجام می شود. T_c پریود قله بوده و پریود متوسط سری زمانی هیو است که تخمین آن بر مبنای فواصل زمانی بین پیکهای سری زمانی هیو انجام می شود.

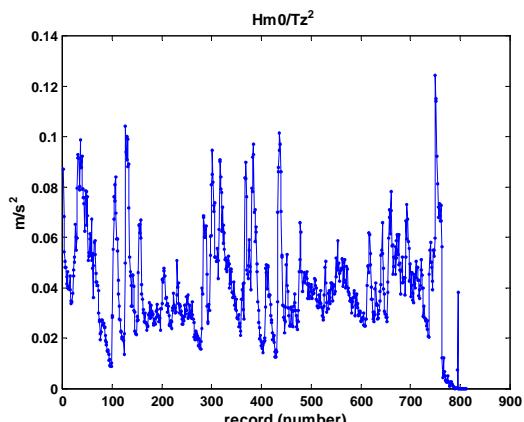
شکل ۱۱ یک نمونه از منحنی Check Ratio (رابطه ۱۰) را نشان می دهد. مقدار اینتابع فرکانسی در حالت ایده آل باید در هر فرکانس برابر با مقدار ثابت ۱ باشد.

$$R(f) = \frac{1}{K(2\pi f)} \sqrt{\frac{C_{22}(f) + C_{33}(f)}{C_{11}(f)}} \quad (10)$$

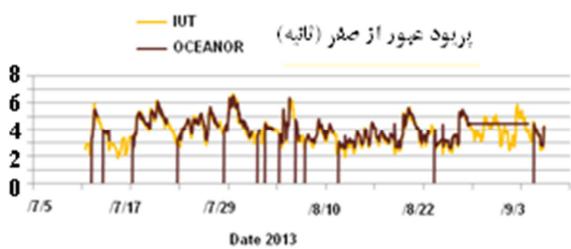
در رابطه فوق، $C_{22}(f)$, $C_{33}(f)$, $C_{11}(f)$ به ترتیب طیف سری زمانی "هیو" و شبیه های موج $\partial z / \partial x$ و $\partial z / \partial y$ می باشد. $\omega = 2\pi f$ تابع عدد موج بر حسب فرکانس زاویه ای ω (rad/s) می باشد که از حل عددی معادله $\omega^2 = Kg \tanh(Kh)$ به دست می آید. در این رابطه $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ شتاب جاذبه زمین و h (m) عمق دریا می باشد [۱۶-۱۷]. در نهایت شکل ۱۲ منحنی شرط شکست موج، یعنی نامساوی « $H_s / T_z^2 \leq 0.22 \text{ m/s}^2$ » را نشان می دهد.



شکل ۱۴- جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف توسط حسگر موج نگار طراحی شده(IUT) و بویه اشنور

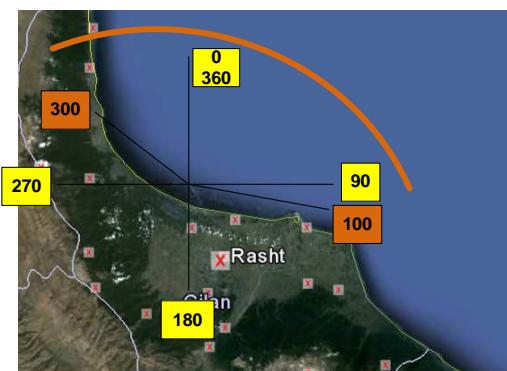


شکل ۱۲- منحنی H_s / T_z^2 در کنترل شرط شکست موج که باید زیر ۰.۲۲ باشد



شکل ۱۵- مقایسه بین پریود عبور از صفر (ناتیه) موج نگار طراحی شده(IUT) و بویه اشنور

لازم به ذکر است که جهت متوسط موج با شرایط جغرافیایی منطقه که محدوده مورد انتظار زاویه ورود موج را مشخص میکند، همخوانی دارد (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- محدوده مورد انتظار زاویه ورود موج با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه استقرار بویه موج نگاری

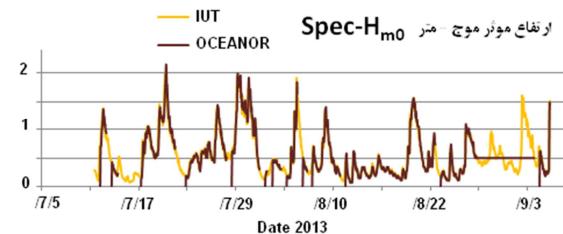
۷- نتیجه گیری و جمع بندی

حسگر موج نگار الکترونیکی بر اساس زیرحسگرهای شتاب سنج، ژیروسکوپ و قطب نما با فن آوری MEMS پیاده سازی شده است. با قطب نما زاویه "یاو" و با جریان داده ژیروسکوپ زاویه‌های پیج و رول، و با جریان داده شتاب سنج، جابجایی عمودی "هیو" تخمین زده است. برای کاهش نویز زیرحسگرهای تعدادی از آنها با یکدیگر موازی شده و برآیند آنها استفاده گردیده است.

۶- ارزیابی میدانی اندازه گیریهای حسگر موج نگار - مقایسه با موج نگار مرجع

در نزدیکی حسگر موج نگار طراحی شده در دریا، حسگر موج نگار دیگری (اشنور) نیز به عنوان مرجع مشغول داده برداری بوده است. در این مرحله از ارزیابی، عملکرد حسگر موج نگار طراحی شده از لحاظ پارامترهای آماری مانند ارتفاع مؤثر موج، پریود عبور از صفر، جهت متوسط موج، و ... با حسگر مرجع مقایسه می شود.

نتایج تخمین ارتفاع مؤثر موج، جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف در شکلهای ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. ارتفاع مؤثر موج یک پارامتر استاندارد به دست آمده از سری زمانی هیو بوده و عبارت از متوسط یک سوم بزرگترین ارتفاع موج ضبط شده است. در شکلهای یاد شده داده های بویه اشنور نیز رسم شده است. همانگونه که مشخص است انباطات خوبی بین داده های حسگر طراحی شده با حسگر موج نگار شرکت اوشنور وجود دارد. شکل ۱۵ نیز مقایسه بین پریود عبور از صفر موج که توسط دو بویه اندازه گیری شده است را نشان می دهد.



شکل ۱۳- ارتفاع مؤثر موج اندازه گیری شده از روی سری زمانی هیو توسط حسگر موج نگار طراحی شده(IUT) و بویه اشنور

- [13] Pascal R. W., et al, "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, 2009.
- [14] Ochi M. K., "Ocean Waves: The Stochastic Approach", Cambridge Ocean Technology Series, 2005.
- [15] "Real-Time Quality Control Tests for In Situ Ocean Surface Waves", Recommended by the Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data (QARTOD) Workshops and The Waves Technical Workshop, 2007.
- [16] نوربخش، "تبدیل زاویه های roll, pitch و yaw برای اندازه گیری شده از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات ثابت"، گزارش داخلی پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- [17] نوربخش مصطفی، زمانی احمد رضا، اکبری مهرداد، "کنترل کیفی داده های هواشناسی و اقیانوس شناسی بویه موج نگار آستانه در آب عمیق"، دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی، ۲۹ آبان تا ۱ آذر، تهران ، ۱۳۹۱.

صحت عملکرد حسگر موج نگار طراحی شده به صورت های چند جانبی آزمایشگاهی و میدانی ارزیابی شده است. از جنبه آزمایشگاهی حسگر موج نگار با همان مجموعه آزمون آونگ که برای کالیبره کردن زیرحسگرهای آن بکار می رود، و نیزبا مجموعه چرخ گردون مورد آزمون واقع می شود. از جنبه میدانی نیز دو روش آزمون های کنترل کیفی از قبیل بررسی Check Ratio و نامساوی های مختلف بین پارامترهای موج نگاری، و روش مقایسه خروجی ها با حسگر موج نگار دیگر برای صحت سنجدی حسگر موج نگار طراحی شده بکار رفته است. بر اساس کنترل های صحت سنجدی بکار رفته می توان حسگر موج نگار را به صورت قابل اعتماد در شرایط میدانی بکار گرفت. بنابراین به صورت کاملاً شهودی، خروجی سنسور طراحی شده با سنسور مرجع همخوانی دارد.

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", *Proceedings of Ocean Wave Spectra*, Easton Maryland, pp. 111-132, 1961.
- [2] "Ocean Waves Hippy-40" data sheet, Coastal Environmental Systems, Inc., www.CoastalEnvironmental.com, 2013.
- [3] Seawatch Wave Scan Buoy, www.oceanor.com, 2013.
- [4] TriaxysTM Directional Wave Sensor, www.axystechnologies.com, 2013.
- [5] Marimon M.C., Villegas E.I.T., Borja M.J.H., Tangonan G.L., Libatique N.J.C., "Low cost sensor system for wave monitoring", *Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, pp. 312-316, 2011.
- [6] C. Teng, et. al., "National Data Buoy Center 1.8-meter Discus Buoy, Directional Wave System", *Oceans 2007*, pp. 1-9, 2007.
- [7] Teng C., et al, "NDBC's Digital Directional Wave Module", *Oceans 2009*, pp. 1-8, 2009.
- [8] Riley R., Teng C., Bouchard R., Dinoso R., Mettlach T., "Enhancements to NDBC's Digital Directional Wave Module", *Oceans 2011*, pp. 1-10, 2011.
- [9] Kuperus J., "Wave Monitoring using Wireless Sensor Nodes", M. Eng. Thesis, University of Melbourne, Melbourne, Australia, 2009.
- [10] Brown H. C., Meadows G. A., "Wave Sensing in the Upper-Great Lakes Observing System", *Proceedings of Ocean Waves Workshop*, New Orleans, Louisiana, 2011.
- [11] Williams J. A., "Vector averaging in a wave field", *IEEE Oceans 2013*, pp. 1-8, 2013.
- [12] Woodman O. J., "An introduction to inertial navigation", University of Cambridge, Technical Report, ISSN 1476-2986, 2007.