

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

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

سیدمصطفی نوربخش
احمدرضا زمانی
محمدعلی بدری*

چکیده

بررسی چند جانبه صحت عملکرد حسگر موج نگار الکترونیکی طراحی شده و کالیبراسیون حسگرهای شتاب سنج و ژيروسکوپ آن مورد نظر قرار گرفته است. پیاده سازی این حسگر موج نگار الکترونیکی بر اساس زیرحسگرهای شتاب سنج، ژيروسکوپ و قطب نما 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 حسگر ها، کالیبراسیون حسگر ها، شتاب سنج، ژيروسکوپ.

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: ElectronicWave 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 بکارگیری یک نمونه حسگر موج نگار بر مبنای به کارگیری فن آوری MEMS انجام شده است.

حسگرهای موج نگار کاربرد وسیعی در اندازه‌گیری مشخصه‌های امواج دریا دارند. این حسگرها عمدتاً در بویه‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی 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 ژيروسکوپ تشکیل شده است و شبیه‌های 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 آنالوگ هیپی^۲ با وزن ۳۶ کیلوگرم [۲] تشکیل شده‌اند. نمونه‌های نوین حسگرهای موج نگار از حسگرهای الکترونیک‌یاستفاده 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 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. به کارگیری فن آوری MEMS در ادامه سیر تحول حسگرهای شتاب سنج و ژيروسکوپ از حالت پیاده سازی تمام مکانیکی بسوی پیاده سازی میکرو الکترونیک است که ابعاد، وزن و هزینه پایینی دارند و در واقع، فن آوری روز می باشد [۵-۱۳].

حسگر موج نگاری باید سه کمیت حرکت عمودی^۵ بویه بر حسب زمان $z(t)$ و شبیه‌های 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 حسگر موج نگار در بخش ۲ معرفی شده است. سیستم سخت 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 زیرحسگرها، 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 آیرودینامیک 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 حسگر موج نگار

حسگر موج نگار شامل یک بورد حسگرهای MEMS شتاب سنج، ژيروسکوپ، 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 شبیه‌های موج (یا به صورت معادل، زاویه‌های رول و پیچ) حاصل شده و از روی آنها پارامترهای دیگر موج نگاری تخمین زده شود. برای حصول دقت بیشتر سیستم از تکرار حسگرهای شتاب سنج و ژيروسکوپ MEMS و برابند گیری خروجی آنها استفاده می‌شود.

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

در جریان 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.

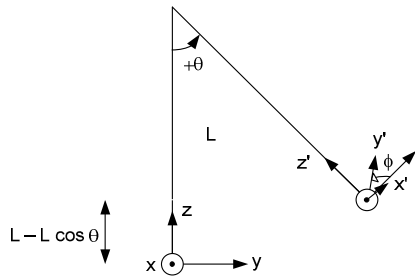
¹ Roll-pitch

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 دقت مورد نیاز، ضروری است. از این رو برای زاویه های پیچ و رول مقادیر بایاسه ترتیب β_x , 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. γ_x نیز حاصل از عدم تراز بودن جعبه نصب حسگر موج نگار است. بدین صورت زاویه های "یاو"، "پیچ" و "رول" به صورت $roll: \gamma = \theta + \gamma_x$ و $pitch: \beta = \beta_x$, $yaw: \alpha = \phi$ تصحیح شده است.

بدین صورت ماتریس تبدیل T در شبیه سازی بر حسب θ, ϕ ، رابطه موقعیت مورد انتظار آونگ X, Y, Z بر حسب پارامترهای آونگ (L, ϕ , θ) و رابطه مؤلفه های شتاب مورد انتظار در دستگاه مختصات ثابت معین است. در اینجا بردار شتاب در دستگاه بدنه به عنوان خروجی مورد انتظار حسگر شتابسنج (بدون نویز و بایاس) بر حسب θ, ϕ به صورت $a'_s = T^{-1}(a + g)$ شبیه سازی می شود. همچنین مقادیر مورد انتظار خروجی های ژيروسکوپ عبارت است از:

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

در روابط (۱) $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ به ترتیب سرعت های زاویه ای رول، یاو و پیچ را نسبت به دستگاه بدنه نشان می دهد. در فرآیند کالیبراسیون، برای حسگرهای شتابسنج و ژيروسکوپ مدلی در نظر گرفته شده که مقدار 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 شتابسنج و ژيروسکوپ، 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 شتابسنج و ژيروسکوپ تخمین زده شده اند. در مدل حاضر، برای حسگرهای شتابسنج و ژيروسکوپ، مقدار بایاس، ضریب مقیاس و حساسیت متقابل در نظر گرفته شده اند.

۳- کالیبراسیون آزمایشگاهی حسگرهای موج

نگاری

در مورد حسگرهای شتابسنج و ژيروسکوپ موارد زیر را به عنوان عوامل خطا می توان برشمرد 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 فرکانسهای پایین در حد امواج دریا (۰/۴ 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 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 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 بدنه را تشکیل می دهند. محورهای X, Y 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 تطابق 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.

¹ Cross axis sensitivity

² Scale 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 فراگیر در دو مرحله انجام گردیده است. در مرحله اول، جستجو در محدوده $\pm R_1 = \pm 7^0$ با تعداد نقاط $N_{point} = 20$ و رزولوشن $\Delta_1 = 2R_1 / (N_{point} - 1) = 0.7368^0$ برای هر یک از سه زاویه مجهول انجام شده است. γ_x, 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 $N_{point} = 20$ در محدوده $\pm R_2 = \pm \Delta_1 / 2$ برابر $\Delta_2 = 2R_2 / (N_{point} - 1) = \pm 0.3684^0$ و رزولوشن $\pm 0.3684^0$ برای هر یک از دو زاویه مجهول انجام گردیده است. در هر مرحله جستجو به ازاء γ_x, β_x قرار 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 γ_x, β_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 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 $h_{\xi i}$ با حل حداقل مربعات معادله $A h_{\xi} = b_{\xi}$ انجام شده که در آن:

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

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

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

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

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

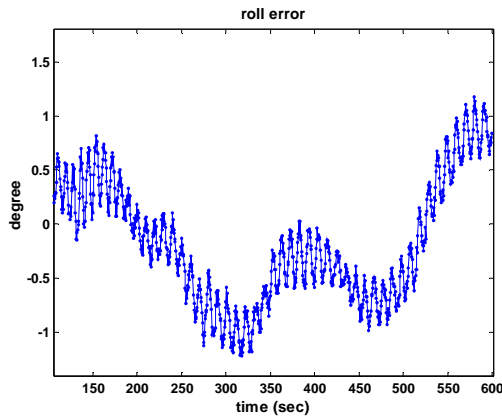
$\xi = x, y, z, n = 1, \dots, N$

در روابط فوق، n اندیس زمان گسسته، N تعداد نمونه داده‌های جمع آوری شده، $a'_s = [a'_{sx} \ a'_{sy} \ a'_{sz}]^T$ شتاب 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، $\{k_{x1}, k_{y1}, k_{z1}\}$ 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، 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 $\{h_{x2}, h_{x3}, h_{y1}, h_{y3}\}$ مقادیر ضریب حساسیت متقابل ژيروسکوپ می‌باشند. مقادیر $v_{\xi,n}$ از رابطه (2) و مقادیر $\omega_{\xi,n}$ از رابطه (3) به دست آمده اند. الگوریتم کالیبراسیون شتاب‌سنج، مجهولهای $\{k_{\xi i}, \xi = x, y, z, i = 0, 1, 2, 3\}$ 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:

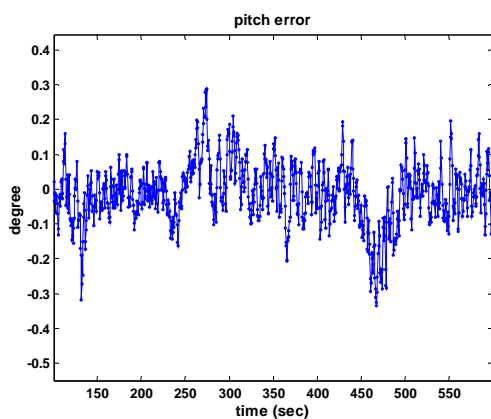
$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N (k_{\xi 0} + k_{\xi 1} a'_{sx,n} + k_{\xi 2} a'_{sy,n} + k_{\xi 3} a'_{sz,n} - v_{\xi,n})^2 \quad (4)$$

در عبارت خطای فوق، مجهولهای $k_{\xi i}$ رابطه درجه 2 با E دارند. در حالی که مجهولهای γ_x, β_x 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. روشی که برای حل خطای E انتخاب شد به این صورت است که مقادیر مختلف برای مجهولهای γ_x, β_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 $k_{\xi i}$ به صورت حل بسته تخمین زده شده و در نهایت مجموعه $\gamma_x, \beta_x, k_{\xi i}$ که مقدار E را حداقل می‌کند، به عنوان تخمین پارامترهای کالیبراسیون مورد نظر قرار گرفته است.

در روش جستجوی فراگیر برای γ_x, β_x ، با توجه به کوچک بودن این زاویه‌ها، محدوده جستجوی $\pm 7^0$ 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 انجام می شود، بهترین شرایط دقت پارامترهای کالیبراسیون وجود دارد. لذا بهترین عملکرد دیده می شود 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» می باشد که حسگر را به صورت حرکت دایره ای عمودی به شعاع 1 m حرکت می دهد، (شکل ۵). لذا منحنی ایده آل و بدون خطای سری زمانی heave بین مقادیر 1 m و -1 m نوسان می کند. تفاوت دامنه از این مقادیر، مبین خطای حرکت heave است.

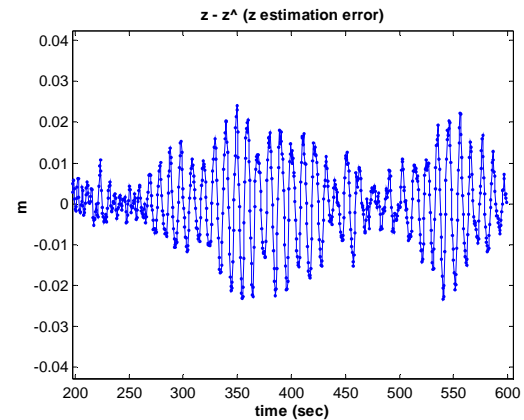
ضرایب $\{h_{\xi i}, \xi_{\xi} = x, y, z, i=1, 2, 3\}$ و $k_{\xi i}, \xi_{\xi} = x, y, z,$ که بیانگر ضریب مقیاس و حساسیت متقابل هستند، برای تصحیح خروجی حسگرها در حالت عملکرد میدانی در دریا ذخیره و استفاده شده اند. ضرایب $h_{\xi 0}$ و $k_{\xi 0}$ که بیانگر بایاس هستند، قابل بکارگیری در حالت میدانی نیستند. زیرا بایاس با تغییرات دما و با گذشت زمان به صورت تصادفی تغییر می کند. 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 زاویه ای (خروجی ژيروسکوپ) 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 می رود، مورد آزمون واقع می شود. شکل های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب خطای تخمین سری زمانی هیو و زاویه های roll و pitch را در هنگام اجرای آزمون آونگ نشان می دهد.



شکل ۵ - 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 حداکثر ارتفاع موج (H_{max}) با ارتفاع مؤثر موج (H_{m0})، یعنی نامساوی « $0 \leq H_{m0} \leq H_{max} \leq 2.5 H_{m0}$ » را نشان می دهد.

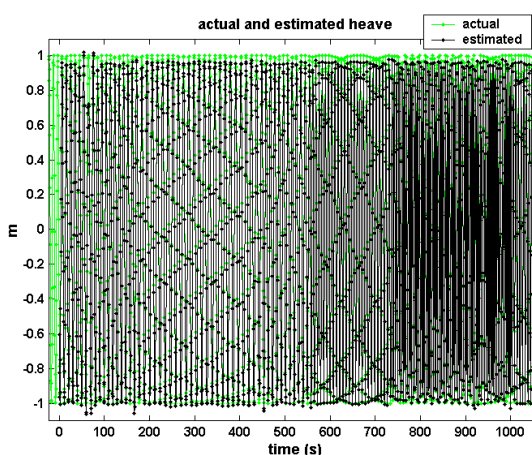


شکل ۵ - تصویر چرخ گردون طراحی و پیاده سازی شده

شکل ۶ نتیجه اجرای آزمون حرکت هیو حسگر 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 0.1 تا 0.27 هرتز متغیر است.



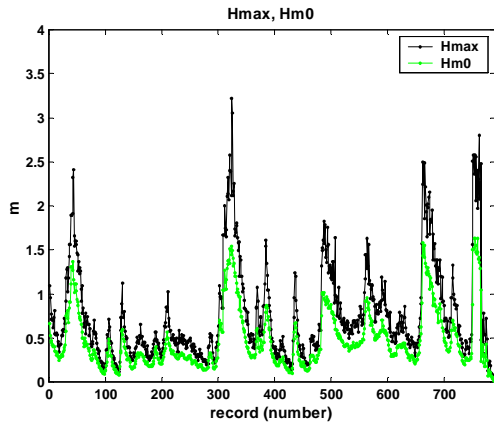
شکل ۷- نمونه بویه موج نگار ساخته شده که حسگر موج نگار در آن قرار می گیرد



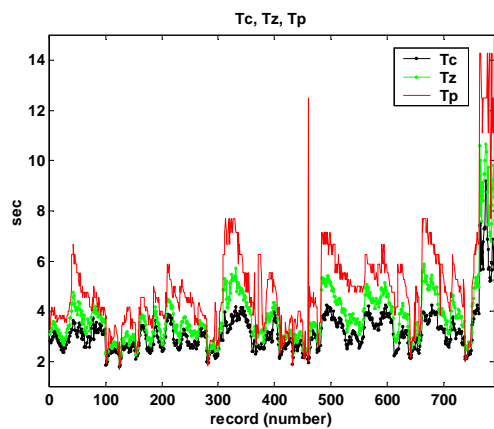
شکل ۶- تخمین هیو و مقدار واقعی آن در آزمون چرخ گردون

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

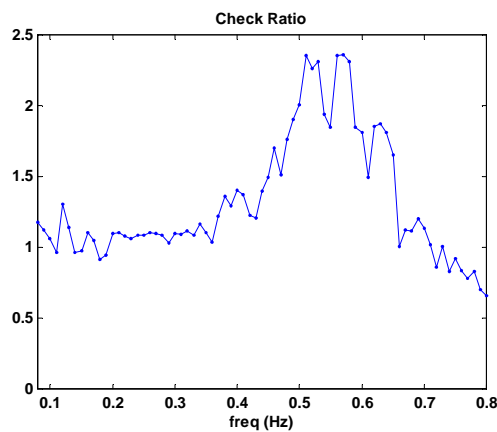
صحت سنجی مجموعه پردازشهای شبیه سازی امواج دریا و حسگر موج نگار با پیاده سازی عملی و آزمون فیزیکی موج نگار در دریا انجام شده است. آزمون میدانی حسگر موج نگار طراحی شده در تابستان سال ۱۳۹۲ در منطقه آبهای بندر انزلی انجام شد. در این آزمون حسگر موج نگار ساخته شده در درون یک بویه با بدنه دیسکی شکل نصب گردید 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 - منحنی‌های حداکثر ارتفاع موج Hmax و ارتفاع مؤثر موج Hm0



شکل ۱۰ - منحنی‌های پریرود قله Tc، پریرود عبور از صفر Tz، و پریرود پیک Tp که شرط $Tc \leq Tz \leq Tp$ را غالباً برآورده می‌کنند



شکل ۱۱ - یک نمونه از منحنی Check Ratio



شکل ۸- حسگر موج نگار

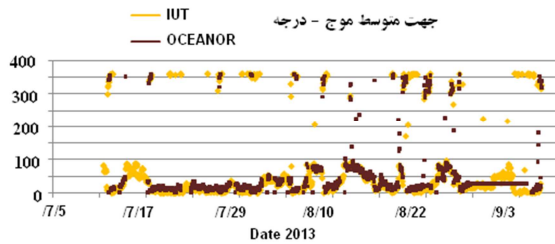
ارتفاع مؤثر موج یک پارامتر استاندارد مشتق از سری زمانی هیو بوده و عبارت از متوسط یک سوم بزرگترین ارتفاع موج ضبط شده می‌باشد. شکل ۱۰ سازگاری پریرودهای مختلف تخمین زده شده، یعنی نامساوی « $T_c \leq T_z \leq T_p$ » را نشان می‌دهد. T_p پریرود قله بوده و عبارت است از عکس فرکانس پیک طیف هیو. T_z پریرود عبور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

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

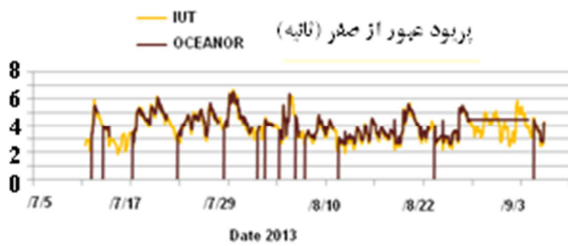
$$R(f) = \frac{1}{K(2\pi f)} \sqrt{\frac{C_{22}(f) + C_{33}(f)}{C_{11}(f)}} \quad (10)$$

در رابطه فوق، $C_{33}(f)$ ، $C_{22}(f)$ ، $C_{11}(f)$ به ترتیب طیف سری زمانی "هیو" و شیبهای موج $\partial z/\partial x$ و $\partial z/\partial y$ می‌باشد. $K(\omega)$ تابع عدد موج بر حسب فرکانس زاویه ای $\omega = 2\pi f$ (rad/s) می‌باشد که از حل عددی معادله

$\omega^2 = Kg \tanh(Kh)$ به دست می‌آید. در این رابطه $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ شتاب جاذبه زمین و h (m) عمق دریا می‌باشد [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 می‌دهد.

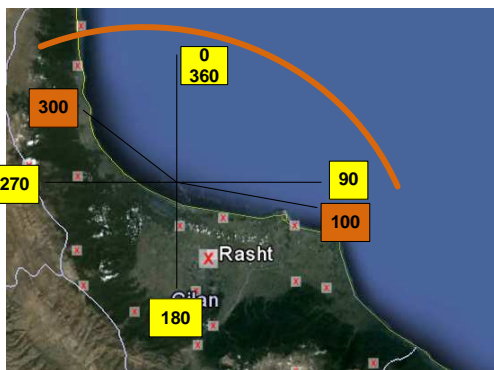


شکل ۱۴- جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف توسط حسگر موج نگار طراحی شده (IUT) و بویه اشنور



شکل ۱۵ - مقایسه بین پریود موج اندازه گیری شده توسط حسگر موج نگار طراحی شده (IUT) و بویه اشنور

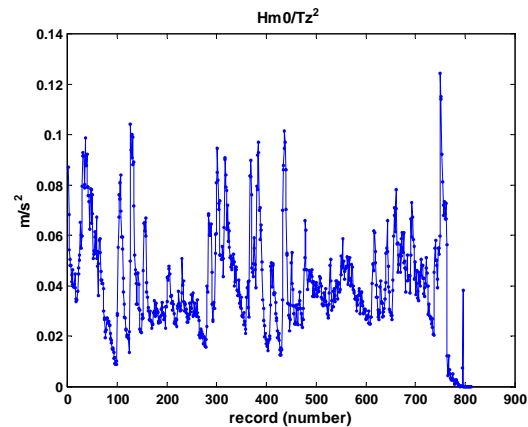
لازم به ذکر است که جهت متوسط موج با شرایط جغرافیایی منطقه که محدوده مورد انتظار زاویه ورود موج را مشخص میکند، همخوانی دارد (شکل ۱۶).



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، ژيروسکوپ و قطب نما با فن آوری MEMS پیاده سازی شده است. با قطب نما زاویه "یاو" و با جریان داده ژيروسکوپ زاویه‌های پیچ و رول، و با جریان داده شتاب سنج، جابجایی عمودی "هیو" تخمین زده شده است. برای کاهش نویز زیرحسگرها تعدادی از آنها با یکدیگر موازی شده و برآیند آنها استفاده گردیده است.

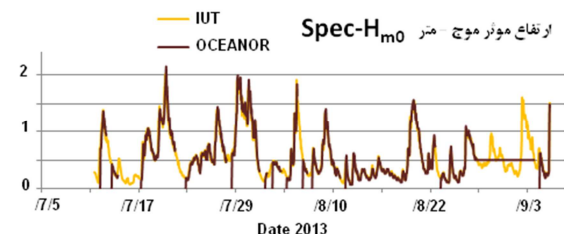


شکل ۱۲- منحنی H_m0/T_z^2 در کنترل شرط شکست موج که باید زیر 0.22 باشد

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 انطباق خوبی بین داده‌های حسگر طراحی شده با حسگر موج نگار شرکت اشنور 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.

[۱۶] نوربخش، "تبدیل زاویه های roll, pitch اندازه گیری شده از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات ثابت"، گزارش داخلی پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.

[۱۷] نوربخش مصطفی، زمانی احمدرضا، اکبری مهرداد، "کنترل کیفی داده‌های هواشناسی و اقیانوس شناسی بویه موج نگار آستارا در آب عمیق"، دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، ۲۹ آبان تا ۱ آذر، تهران، ۱۳۹۱.

صحت عملکرد حسگر موج نگار طراحی شده به صورت‌های چند جانبه 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 نیز با 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 سنجی حسگر موج نگار طراحی شده بکار رفته است. بر اساس کنترل های صحت سنجی 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] Triaxys™ 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.