

## شبیه‌سازی جامع امواج دریا به منظور ارزیابی پردازش‌های حسگر موج‌نگار جهت‌دار بویه هواشناسی و اقیانوس‌شناسی

سید مصطفی نوربخش<sup>۱</sup>، احمد رضا زمانی<sup>۲</sup>، محمد علی بدری<sup>۳</sup>

malbdr@cc.iut.ac.ir

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

### چکیده

جهت تعیین طیف جهت‌دار امواج دریا از حسگرهای موج‌نگار استفاده می‌شود. یک نمونه از حسگرهای متداول موج‌نگاری حسگرهای سنجش هیو، رول و پیچ می‌باشد که در بویه‌های دیسکی بکار می‌رود. پیچیدگی محاسبات لازم در تبدیل حرکات بویه موج‌نگار به طیف انرژی موج‌نگار لازم می‌دارد که به صورت آزمایشی بتوان تمامی پردازش‌های انجام شده در یک حسگر موج‌نگار را شبیه‌سازی و ارزیابی کرد. در این مقاله ارزیابی حسگر موج‌نگار طراحی شده ایرانی، به کمک یک نرم افزار جامع شبیه‌سازی امواج دریا و حسگر موج‌نگاری پیاده‌سازی شده است. این نرم‌افزار کلیه مراحل ایجاد امواج دریا، حسگرهای ناوبری اینرسی، تخمین پارامترهای کالیبراسیون واحد ناوبری اینرسی، پردازش‌های تخمین جابجایی عمودی و شیب‌های موج در حسگر موج‌نگار و تخمین مقادیر طیفی را پوشش می‌دهد. تخمین ارتفاع مؤثر موج و جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف با بویه یک شرکت خارجی مقایسه و انطباق خوبی ملاحظه شده است. به کمک این نرم افزار، نتیجه عملکرد سیستم به ازاء مقادیر مختلف پارامترهای طراحی، مشخص شده و اجرای طراحی بهینه میسر گردیده است.

واژگان کلیدی: بویه موج‌نگار، شبیه‌سازی امواج دریا، حسگر موج‌نگار، طیف جهت‌دار امواج دریا.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۲/۵/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۳/۳/۲۴

## ۱- مقدمه

واحد ناوبری اینرسی در یک مجموعه آزمون» «پردازش‌های تخمین جابجایی عمودی<sup>۶</sup> و شیب‌های موج در حسگر موج‌نگار (پیچ و رول)» و «تخمین مقادیر طیفی» را پوشش می‌دهد. در این نرم‌افزار، خطای تخمین جابجایی عمودی و شیب‌های موج (پیچ و رول) و مقادیر طیفی ارزیابی شده است. بدین صورت نتیجه عملکرد سیستم به اِزاء مقادیر مختلف پارامترهای طراحی، مشخص شده و طراحی بهینه میسر گردیده است. پیاده‌سازی نرم‌افزار شبیه‌سازی برای طراحی سیستم موج‌نگار و بهینه‌سازی آن، روالی مرسوم و پیاده شده در جهان دارد [۵ و ۶].

به کارگیری فناوری‌های نوین در ادامه سیر تحول و پیشرفت حسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ که ابعاد، وزن و هزینه پایینی دارند و در واقع، فن‌آوری روز می‌باشد مورد توجه قرار گرفته است [۷-۱۴]. لذا نگارندگان با الهام کاربردی از فناوری‌های گفته شده و با تهیه یک برنامه کامپیوتری به زبان متلب<sup>۷</sup>، مقدمات ایجاد روندی منطقی برای استفاده همزمان از نتایج شبیه‌سازی در طراحی عملیاتی و راست‌آزمایی نتایج را فراهم نموده‌اند. در این مقاله پس از مقدمه، ساختار نرم‌افزار شبیه‌سازی، شبیه‌سازی‌های مختلف انجام شده و مؤلفه‌های آن به ترتیب در بخش‌های ۲ تا ۴ ارائه شده‌اند. هم‌چنین محاسبات موج‌نگاری و ارزیابی آن در بخش ۵ و نتایج حاصله در بخش ۶ آورده شده‌اند.

## ۲- ساختار نرم‌افزار شبیه‌سازی

در مورد زیرحسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ بکار رفته در حسگر موج‌نگار، 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).

- حساسیت متقابل<sup>۸</sup>: 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

حسگرهای موج‌نگار کاربرد وسیعی در اندازه‌گیری مشخصه‌های دریایی امواج دریا دارند. این حسگرها عمدتاً در بویه‌های هواشناسی و اقیانوس‌شناسی نصب گردیده و در ثبت اطلاعات سری زمانی امواج و طیف حاصل از آن‌ها استفاده می‌شود. از جمله اولین حسگرهای موج‌نگار موفق می‌توان به بویه رول-پیچ<sup>۱</sup> [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 امروز تداوم یافته است. نمونه‌های اولیه حسگرهای مکانیکی با ابعاد بزرگ و وزن بالا مانند حسگر آنالوگ هیپی<sup>۲</sup> با وزن ۳۶ کیلوگرم ساخته شده‌اند [۲].

نمونه‌های نوین حسگرهای موج‌نگار مانند حسگر بویه موج‌نگار شرکت اشنور<sup>۳</sup> [۳] و حسگر بویه موج‌نگاری تری اکسیس<sup>۴</sup> [۴]، از حسگرهای مکانیکی-الکترونیکی مانند استفاده می‌کنند که ابعاد و وزن به مراتب کوچک‌تری دارند. این حسگرها مجهز به بوردهای پردازش سیگنال برای محاسبات موج‌نگاری می‌باشند. ساخت حسگرهای فوق در حال حاضر توسط چند شرکت خارجی صورت می‌پذیرد و مراحل آزمون و کالیبراسیون آن‌ها نیز در همان شرکت‌ها و با صرف زمان نسبتاً طولانی انجام می‌شود. 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. یک امکان مناسب برای طراحی بهینه حسگر موج‌نگار، استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی جامع امواج دریا، زیرحسگرهای ناوبری اینرسی<sup>۵</sup> و پردازش‌های موج‌نگاری است.

این نرم‌افزار کلیه مراحل «شبیه‌سازی امواج دریا»، «شبیه‌سازی بویه»، «شبیه‌سازی عوامل خطای زیر حسگرهای واحد ناوبری اینرسی شامل شتاب‌سنج، ژيروسکوپ و قطب‌نما»، «تخمین پارامترهای کالیبراسیون

<sup>1</sup> Roll-Pitch

<sup>2</sup> Hippy

<sup>3</sup> Oceanor

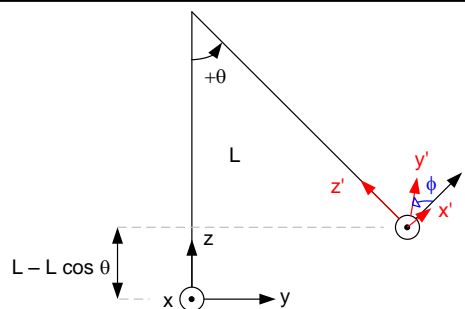
<sup>4</sup> Triaxys

<sup>5</sup> IMU

<sup>5</sup> Heave

<sup>8</sup> MATLAB

<sup>9</sup> Cross Axis Sensitivity



شکل (۱) دستگاههای مختصات و مدل دینامیک مجموعه آزمون آونگ.

در این بخش از شبیه‌سازی، مقادیر پارامترهای کالیبراسیون زیرحسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ که در بخش کالیبراسیون با مجموعه آزمون آونگ بدست آمده‌اند، استفاده شده است. هر یک از بخش‌های شبیه‌سازی در ادامه معرفی گردیده‌اند.

### ۳- شبیه‌سازهای انجام شده

#### ۳-۱- شبیه‌ساز دینامیک آونگ

برای آونگ، مدل نشان داده شده در شکل (۱) در نظر گرفته شده است. برای آونگ، شبیه‌سازی زاویه‌های رول، پیچ و یاء  $\alpha$  مطرح است. زاویه رول  $\gamma$ ، زاویه نوسان آونگ می‌باشد که بصورت جمع تعدادی هارمونیک سینیوسی با فرکانس  $f_{p,i}$ ، دامنه  $A_{p,i}$  و فاز  $\Phi_{p,i}$ ، به علاوه جمله ثابت  $\gamma_{p,x}$  شبیه‌سازی شده است:

$$\gamma(t) = \sum_i A_{p,i} \sin(2\pi f_{p,i} t + \Phi_{p,i}) + \gamma_{p,x} \quad (1)$$

$\gamma_{p,x}$  ناشی از «تراز نبودن محفظه نصب حسگر» و  $t$  متغیر زمان می‌باشد. سیگنالها در زمان‌های گسسته  $t_n = n/F_1$  برای  $n=0,1,2, \dots$  تولید می‌گردند. فرکانس و دامنه، و فازهای  $f_{p,i}$ ،  $A_{p,i}$  و  $\Phi_{p,i}$  در نرم‌افزار تنظیم می‌گردند. شکل موج‌های مختلف مانند سینیوسی، مثلثی، و ... برای زاویه  $\gamma$  با انتخاب فرکانس، دامنه و فازهای مرتبط قابل شبیه‌سازی است. زاویه پیچ  $\beta$ ، انحراف از قائم بودن میله نوسان آونگ است و مقدار ثابت  $\beta(t) = \beta_{p,x}$  در نظر گرفته شده است. زاویه دوران افقی  $\alpha$  بصورت یک موج پله‌ای هموار شده از زاویه  $\pi/4$  به زاویه  $3\pi/4$  مدل شده است. مقدار ثابت  $\alpha_{p,x}$  به این موج که ناشی از «عدم تطبیق افقی محور  $y$  محفظه نصب حسگر با صفحه نوسان آونگ» می‌باشد،

حسگر» و «عدم تطابق<sup>۱</sup> محورهای مختصات حسگر با محورهای مختصات بدنه» می‌باشد.

- مقیاس<sup>۲</sup>: نسبت ضریب تبدیل مقیاس (نسبت کمیت مورد اندازه‌گیری به ولتاژ یا عدد دیجیتال خروجی) واقعی به ضریب تبدیل مقیاس نامی مطرح شده برای حسگر.

در فرکانس‌های پایین در حد امواج دریا (۰/۴ تا ۰/۳ هرتز) مقادیر عوامل خطای فوق با مقادیر مطلوب قابل مقایسه است. عوامل خطای یاد شده مواردی غیر از نویز اندازه‌گیری 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 از جمله مراحل کالیبراسیون حسگر می‌باشد.

تخمین پارامترها در کالیبراسیون حسگر نیاز به حسگرهای مرجع اضافی دارد تا در طی معادلاتی، مجهول‌های مورد نظر قابل محاسبه باشند. برای این منظور یک مجموعه آزمون و کالیبراسیون بصورت آونگ در نظر گرفته شده است (مطابق شکل (۱)). این مجموعه مجهز به دو حسگر اندازه‌گیری زاویه نوسان آونگ  $\theta$  و زاویه دوران حول شافت آونگ  $\phi$  می‌باشد. زیرحسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ در این مجموعه قرار گرفته و با اجرای نوسان، داده‌های آن‌ها به همراه اطلاعات  $\theta$  و  $\phi$  ذخیره می‌گردد. شکل (۲) ساختار نرم‌افزار شبیه‌سازی جامع امواج دریا، کالیبراسیون و فعالیت میدانی حسگر موج‌نگاری را نشان می‌دهد. مجموعه شبیه‌سازی شامل دو بخش عمده کالیبراسیون با مجموعه آزمون آونگ و عملکرد میدانی است.

در بخش «کالیبراسیون با مجموعه آزمون آونگ» الگوریتم‌هایی روی داده‌های ضبط‌شده اجرا گردیده تا پارامترهای کالیبراسیون زیرحسگرهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ تخمین زده شود. در بخش «عملکرد میدانی» حالت استفاده عملی از واحد ناوبری اینرسی نصب شده بر یک بویه و پردازش‌های تخمین سری‌های زمانی جابجایی عمودی و شیب‌های موج و به دنبال آن، تخمین مقادیر طیفی و پارامترهای موج‌نگاری در نظر گرفته شده‌اند.

<sup>۱</sup> Misalignment

<sup>۲</sup> Scale Factor

تنظیمات دینامیک آونگ مقادیر فرکانس  $f_{p,i}$ ، دامنه  $A_{p,i}$ ، فاز  $\Phi_{p,i}$  و ثابت‌های  $\alpha_{p,x}$ ،  $\beta_{p,x}$ ،  $\gamma_{p,x}$  در نظر گرفته شده اند.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \sum_i 2\pi f_{p,i} A_{p,i} \cos(2\pi f_{p,i} t + \Phi_{p,i})$$

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} = -\sum_i (2\pi f_{p,i})^2 A_{p,i} \sin(2\pi f_{p,i} t + \Phi_{p,i}) \quad (۴)$$

### ۳-۲- شبیه‌ساز زاویه‌های یاو و رول آونگ

حسگرهای آونگ، زاویه نوسان  $\theta$  و زاویه دوران افقی  $\phi$  را اندازه‌گیری می‌کنند که متناظر با زاویه‌های  $\gamma$  و  $\alpha$  می‌باشند. برای اندازه‌گیری‌های یاد شده، عوامل خطای زیر در نظر گرفته شده و بر اساس آن، حسگرهای آونگ مطابق با شکل (۳) مدل شده‌اند.

مقدار بایاس  $\alpha_{s,x}$  برای حسگر یاو  $\phi$ ، مقدار بایاس  $\gamma_{s,x}$  برای حسگر رول  $\theta$  و تعداد بیت  $N_Q$  کوانتیزاسیون خروجی‌های حسگرهای  $\theta$  و  $\phi$  آونگ.

اضافه می‌گردد. جهش پله‌ای زاویه  $\alpha$  هنگام گذر نیمی از زمان اجرای شبیه‌سازی واقع می‌شود. با توجه به شکل موقعیت نوسانی آونگ (محل نصب حسگر) عبارت است از:

$$x=L.\sin\beta, y=L.\sin\gamma, z=L-L.\cos\gamma \quad (۲)$$

$L$  طول میله آونگ می‌باشد. شتاب متناظر در دستگاه ثابت عبارت است از:

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = 0$$

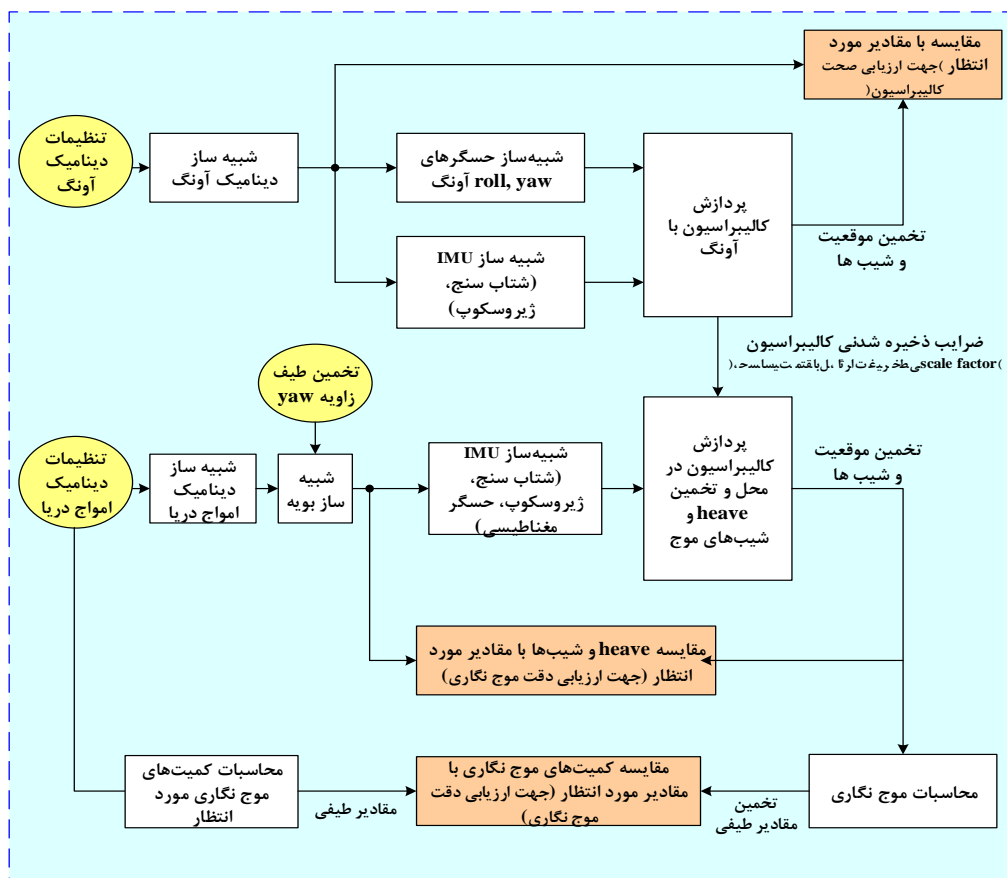
$$a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = L \frac{d^2\gamma}{dt^2} \cos\gamma - L \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^2 \sin\gamma \quad (۳)$$

$$a_z = \frac{d^2z}{dt^2} = L \frac{d^2\gamma}{dt^2} \sin\gamma + L \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^2 \cos\gamma$$

مشقات زمانی  $\gamma$  مورد استفاده در محاسبه مؤلفه‌های شتاب با معادله (۴) بیان می‌شود که در آن مقدار شیب‌ها نسبت به محورهای افقی عبارت است از  $\frac{\partial z}{\partial y} = tg \gamma$  و

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{-tg \beta}{\cos\gamma}$$

و بنابراین در شبیه‌سازی انجام شده



شکل (۲) ساختار نرم‌افزار شبیه‌سازی جامع امواج دریا، کالیبراسیون و فعالیت میدانی حسگر موج‌نگاری.

- بایاس متغیر با زمان (t) بصورت چندجمله‌ای از درجه ۲ به شکل‌های  $O_y=O_{y0}+O_{y1}t+O_{y2}t^2$ ،  $O_x=O_{x0}+O_{x1}t+O_{x2}t^2$  و  $O_z=O_{z0}+O_{z1}t+O_{z2}t^2$  به ترتیب برای هر یک از مؤلفه‌های x، y و z شتاب‌سنج

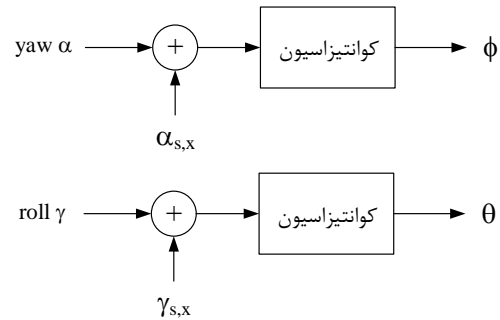
- نویز سفید اندازه‌گیری (نویز حرارتی) با سطح طیف توان (یک طرفه)  $S_{n,ax}$ ،  $S_{n,ay}$ ،  $S_{n,az}$  تفکیک شده برای هر یک از مؤلفه‌های x، y و z شتاب‌سنج. توان (واریانس) نویز حرارتی در هر نمونه از اندازه‌گیری برابر است با حاصل ضرب سطح طیف توان در جذر پهنای باند (نصف فرکانس نمونه‌برداری). نویز حرارتی بصورت فرآیند تصادفی سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس یاد شده برای هر نمونه از اندازه‌گیری در هر یک از خروجی‌های شتاب‌سنج، مدل و شبیه‌سازی گردیده‌اند.

- خطای کوانتیزاسیون با پله  $\Delta$  که در واقع همان ضریب تبدیل مقیاس حسگر دیجیتال، یعنی نسبت تبدیل رقم ۱ به مقدار شتاب است. در صورت عدم تکرار موازی و در نظر گرفتن یک شتاب‌سنج، تابع کوانتیزاسیون با پارامتر  $\Delta$  روی خروجی شتاب‌سنج اعمال می‌شود. در صورت انجام تکرار موازی و در نظر گرفتن  $M_{accel} > 1$  حسگر شتاب‌سنج، خطای کوانتیزاسیون بصورت نویز جمع شونده، مدل می‌شود. این نویز بصورت متوسط  $M_{accel}$  متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت  $(-\Delta/2, \Delta/2)$  برای هر نمونه خروجی در هر یک از مؤلفه‌های شتاب‌سنج، شبیه‌سازی گردیده است. بدین ترتیب، شتاب‌سنج مطابق شکل (۴) مدل شده است. خروجی ژيروسکوپ  $\omega = [\omega_z \ \omega_y \ \omega_x]^T$  بدون در نظر گرفتن عوامل خطا عبارت است از [۱۵]:

$$\mathbf{a}'_s = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \mathbf{a} \quad (5)$$

- ماتریس H، مدل‌کننده حساسیت متقابل و ضریب مقیاس (نسبت ضریب تبدیل مقیاس واقعی به ضریب تبدیل مقیاس نامی مطرح شده برای حسگر)

- بایاس متغیر با زمان (t) بصورت چند جمله‌ای از درجه ۲ به شکل‌های  $O_y=O_{y0}+O_{y1}t+O_{y2}t^2$ ،  $O_x=O_{x0}+O_{x1}t+O_{x2}t^2$  و  $O_z=O_{z0}+O_{z1}t+O_{z2}t^2$  به ترتیب برای هر یک از مؤلفه‌های x، y و z ژيروسکوپ.



شکل (۳) مدل حسگرهای  $\phi$  و  $\theta$  آونگ.

### ۳-۳- شبیه‌ساز واحد ناوبری اینرسی

واحد اندازه‌گیری ناوبری اینرسی واحد ناوبری اینرسی، شامل یک شتاب‌سنج، یک ژيروسکوپ و یک حسگر مغناطیسی سه بعدی می‌باشد. در صورت انجام تکرار موازی، یعنی استفاده از حسگرهای موازی شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، مشخصات حسگر معادل (برآیند) آن‌ها در نظر گرفته شده و مدل می‌گردد. لذا در شبیه‌سازی باز هم یک شتاب‌سنج و یک ژيروسکوپ، مدل و شبیه‌سازی شده‌اند. خروجی شتاب‌سنج  $\mathbf{a}'_s = [a'_{sx} \ a'_{sy} \ a'_{sz}]^T$  بدون در نظر گرفتن عوامل خطا برآیند بردار شتاب دینامیکی و بردار شتاب جاذبه زمین در دستگاه مختصات بدنه است (مطابق رابطه (۵)) [۱۵].  $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  شتاب دینامیکی در دستگاه مختصات ثابت و g مقدار شتاب جاذبه زمین می‌باشد. برای شتاب‌سنج، عوامل خطای زیر در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی گردیده‌اند:

- ماتریس K، مدل‌کننده حساسیت متقابل و ضریب مقیاس (نسبت ضریب تبدیل مقیاس واقعی به ضریب تبدیل مقیاس نامی مطرح شده برای حسگر)

$$\mathbf{a}'_s = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \mathbf{a} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \omega_z &= \sin \beta \cdot \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\alpha}{dt} \\ \omega_y &= -\sin \alpha \cos \beta \cdot \frac{d\gamma}{dt} + \cos \alpha \cdot \frac{d\beta}{dt} \\ \omega_x &= \cos \alpha \cos \beta \cdot \frac{d\gamma}{dt} + \sin \alpha \cdot \frac{d\beta}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

برای ژيروسکوپ، عوامل خطای زیر در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی گردیده است:

عمودی Z میدان مغناطیس زمین در دستگاه مختصات ثابت هستند. برای حسگر مغناطیسی عوامل خطای زیر در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی گردیده است:

- نسبت‌های ضریب مقیاس (نسبت ضریب تبدیل مقیاس واقعی به ضریب تبدیل مقیاس نامی)  $S_x, S_y, S_z$  برای هر یک از مؤلفه‌های X, Y, Z حسگر.

- بایاس متغیر با زمان (t) بصورت چند جمله‌ای از درجه ۲ به شکل‌های  $O_x=O_{x0}+O_{x1}t+O_{x2}t^2$ ،  $O_y=O_{y0}+O_{y1}t$  و  $O_z=O_{z0}+O_{z1}t+O_{z2}t^2$  به ترتیب برای هر یک از مؤلفه‌های X, Y و Z حسگر

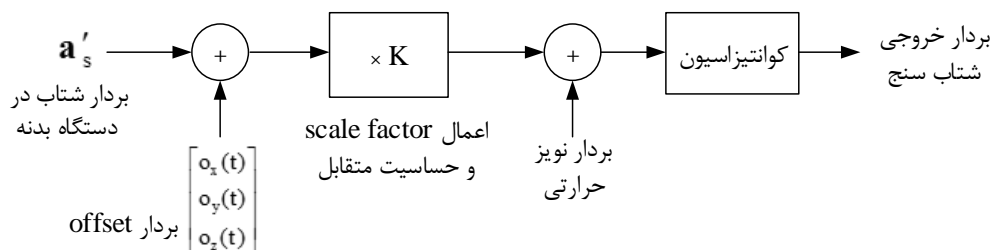
- نویز سفید اندازه‌گیری (نویز حرارتی) با سطح طیف توان (یک طرفه)  $S_{n,mz}, S_{n,my}, S_{n,mx}$  و تفکیک شده برای هر یک از مؤلفه‌های X, Y و Z حسگر. توان (واریانس) نویز حرارتی در هر نمونه از اندازه‌گیری برابر است با حاصل ضرب سطح طیف توان در جذر پهنای باند (نصف فرکانس نمونه‌برداری). نویز حرارتی بصورت فرآیند تصادفی سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس یاب شده برای هر نمونه از اندازه‌گیری در هر یک از خروجی‌های شتاب‌سنج، مدل و شبیه‌سازی گردیده است.

- خطای کوانتیزاسیون با پله  $\Delta$  که در واقع همان ضریب تبدیل مقیاس حسگر دیجیتال، یعنی نسبت تبدیل رقم ۱ به مقدار میدان مغناطیسی است. بدین ترتیب، حسگر مغناطیسی مطابق با شکل (۶) مدل گردیده است.

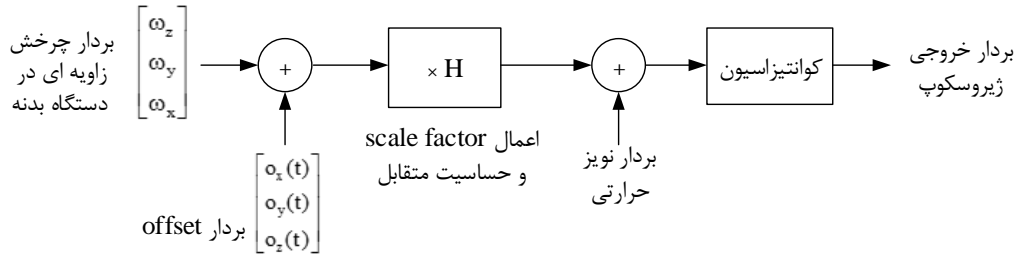
- نویز سفید اندازه‌گیری (نویز حرارتی) با سطح طیف توان (یک طرفه)  $S_{n,\omega z}, S_{n,\omega y}, S_{n,\omega x}$  تفکیک شده برای هر یک از مؤلفه‌های X, Y و Z ژيروسکوپ. توان (واریانس)

- نویز حرارتی در هر نمونه از اندازه‌گیری برابر است با حاصل ضرب سطح طیف توان در جذر پهنای باند (نصف فرکانس نمونه‌برداری). نویز حرارتی بصورت فرآیند تصادفی سفید گوسی با متوسط صفر و واریانس یاب شده برای هر نمونه از اندازه‌گیری در هر یک از خروجی‌های ژيروسکوپ، مدل و شبیه‌سازی گردیده‌اند.

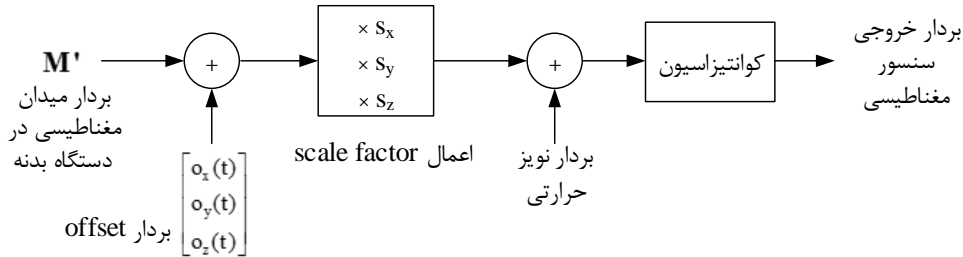
- خطای کوانتیزاسیون با پله  $\Delta$  که در واقع همان ضریب تبدیل مقیاس حسگر دیجیتال، یعنی نسبت تبدیل رقم ۱ به مقدار چرخش زاویه‌ای است. در صورت عدم تکرار موازی و در نظر گرفتن یک ژيروسکوپ، تابع کوانتیزاسیون با پارامتر  $\Delta$  روی خروجی ژيروسکوپ اعمال می‌شود. در صورت انجام تکرار موازی و در نظر گرفتن  $N_{gyro} > 1$  حسگر ژيروسکوپ، خطای کوانتیزاسیون بصورت نویز جمع شونده، مدل می‌شود. این نویز بصورت متوسط  $N_{gyro}$  متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت  $(-\Delta/2, \Delta/2)$  برای هر نمونه خروجی در هر یک از مؤلفه‌های ژيروسکوپ، شبیه‌سازی گردیده است. بدین ترتیب، ژيروسکوپ مطابق با شکل (۵) مدل شده است. خروجی حسگر مغناطیسی  $M' = [m'_x \ m'_y \ m'_z]^T$  در دستگاه مختصات بدنه با رابطه (۷) بیان می‌شود که در آن  $M_x$  و  $M_z$  به ترتیب مؤلفه‌های محور X (محور شمال مغناطیسی) و محور



شکل (۴) مدل شتاب‌سنج (معادل) در شبیه‌سازی.



شکل (۵) مدل ژيروسکوپ (معادل) در شبیه‌سازی.



شکل (۶) مدل حسگر مغناطیسی در شبیه‌سازی.

$$M' = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ 0 \\ M_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

خروجی شتابسنج اندازه‌گیری شده،  $a' = [a'_x \ a'_y \ a'_z]^T$  شتاب دینامیکی در دستگاه مختصات بدنه، 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،  $\{k_{x2}, k_{x3}, k_{y1}, k_{y3}, k_{z1}\}$  ضرایب حساسیت متقابل شتابسنج،  $\omega_{s\xi,n}$  خروجی حسگر ژيروسکوپ اندازه‌گیری شده،  $\omega_{\xi,n}$  مقدار مورد انتظار خروجی حسگر ژيروسکوپ،  $h_{\xi0}$  مقادیر بایاس ثابت برای هر محور ژيروسکوپ،  $\{h_{x1}, h_{y2}, h_{z3}\}$  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  $g'_{\xi,n}$ ،  $a'_{\xi,n}$  و  $\omega_{\xi,n}$  ( $\xi=x,y,z$ ) تابع اطلاعات حسگرهای آونگ ( $\theta, \phi$ ) می‌باشند.

معیار تخمین مجهول‌ها، روش حداقل مربعات بوده و عبارت از حداقل نمودن خطای E تعریف شده در روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب برای کالیبراسیون شتابسنج و ژيروسکوپ می‌باشد.

$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N \left( k_{\xi0} + k_{\xi1} a'_{sx,n} + k_{\xi2} a'_{sy,n} + k_{\xi3} a'_{sz,n} - v_{\xi,n} \right)^2 \quad (10)$$

$$E = \sum_{\xi=x,y,z} \sum_{n=1}^N \left( h_{\xi0} + h_{\xi1} \omega_{sx,n} + h_{\xi2} \omega_{sy,n} + h_{\xi3} \omega_{sz,n} - \omega_{\xi,n} \right)^2 \quad (11)$$

#### ۴- مؤلفه‌های شبیه‌سازی

##### ۴-۱- پردازش کالیبراسیون با آونگ

در فرآیند کالیبراسیون، برای حسگرهای شتابسنج و ژيروسکوپ مدلی در نظر گرفته شده که مقدار واقعی شتاب و چرخش زاویه‌ای حس شده را به خروجی حسگر ربط می‌دهد. مقادیر واقعی شتاب و چرخش زاویه‌ای از اطلاعات حسگرهای آونگ حاصل گردیده‌اند. بدین ترتیب معادلاتی بدست آمده که با حل آن‌ها مجهول‌های مدل کالیبراسیون شتابسنج و ژيروسکوپ تخمین زده شده‌اند. این معادلات به شرح زیر است:

$$a'_{\xi,n} + g'_{\xi,n} = v_{\xi,n} = k_{\xi0} + k_{\xi1} a'_{sx,n} + k_{\xi2} a'_{sy,n} + k_{\xi3} a'_{sz,n}, \quad \xi = x, y, z, \quad n = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$\omega_{\xi,n} = h_{\xi0} + h_{\xi1} \omega_{sx,n} + h_{\xi2} \omega_{sy,n} + h_{\xi3} \omega_{sz,n}, \quad \xi = x, y, z, \quad n = 1, \dots, N \quad (9)$$

الگوریتم کالیبراسیون مطابق با روابط (۸) و (۹)، مدل در نظر گرفته شده برای حسگرهای شتابسنج و ژيروسکوپ، مقدار بایاس، ضریب مقیاس و حساسیت متقابل را در نظر می‌گیرد. در روابط فوق، n اندیس زمان گسسته، N تعداد نمونه داده‌های جمع‌آوری شده،  $a'_s = [a'_{sx} \ a'_{sy} \ a'_{sz}]^T$

بر حسب متر،  $\omega_i$  فرکانس‌های زمانی امواج بر حسب رادیان بر ثانیه،  $t_n$  زمان‌های نمونه‌برداری دیجیتال بر حسب ثانیه،  $k_i(\omega)$  بردار عدد موج متناظر با فرکانس  $\omega_i$  بر حسب رادیان بر متر، و  $\phi_{0i}$  فاز تصادفی موج با توزیع یکنواخت  $U(-\pi, \pi)$  بر حسب رادیان می‌باشد.  $\Gamma$  بردار مکان افقی x-y نقطه مورد اندازه‌گیری در دریا نسبت به یک مبدأ مختصات مرجع بوده و عملگر نقطه بین بردار  $\Gamma$  و بردار  $k_i(\omega)$  بیانگر ضرب نقطه بین دو بردار می‌باشد. فرکانس‌های زمانی امواج بصورت  $\omega_i = \pi F_2 i / N_f$  برای  $i=1, \dots, N_f-1$  انتخاب می‌شوند که  $F_2$  نرخ پردازش داده‌های موج‌نگاری است، در حالی که تولید سری زمانی در نرخ نمونه برداری  $F_1$  (Hz) می‌باشد.

در شبیه‌سازی برای هر جهت ورود موج، فقط یک مؤلفه فرکانسی در نظر گرفته شده است. اگر زاویه‌های ورود هر موج در فرکانس  $\omega_i$  برابر با  $\theta_i$  باشد، بردار  $k_i(\omega)$  را می‌توان بصورت  $k_i(\omega) = \begin{bmatrix} K(\omega_i) \cos \theta_i \\ K(\omega_i) \sin \theta_i \end{bmatrix}$  نوشت که  $K(\omega) = k(\omega) / \omega$  در آن اندازه بردار عدد موج است که از حل عددی معادله  $\omega^2 = Kg \tanh(Kh)$  بدست می‌آید.

در شبیه‌سازی انجام شده، روش نیوتون - رفسون برای حل معادله فوق استفاده شده است.  $g$  شتاب جاذبه زمین در میدان برحسب متر بر مجذور ثانیه و  $h$  عمق دریا برحسب متر می‌باشد. با توجه به توضیحات داده شده،  $\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_i(\omega) = K(\omega_i) \cos(\theta_i) \cdot x + K(\omega_i) \sin(\theta_i) \cdot y$  لذا خواهیم داشت:  $z(n) = \sum_{i=1}^{N_f-1} A_i \cos(\omega_i t_n - K(\omega_i) \cos(\theta_i) x - K(\omega_i) \sin(\theta_i) y + \phi_{0i})$  بنابراین شیب‌های موج عبارتند از:

$$\frac{\partial z}{\partial x}(n) = \sum_{i=1}^{N_f-1} A_i K(\omega_i) \cos(\theta_i) \sin(\omega_i t_n - K(\omega_i) \cos(\theta_i) x - K(\omega_i) \sin(\theta_i) y + \phi_{0i}) \quad (14)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y}(n) = \sum_{i=1}^{N_f-1} A_i K(\omega_i) \sin(\theta_i) \sin(\omega_i t_n - K(\omega_i) \cos(\theta_i) x - K(\omega_i) \sin(\theta_i) y + \phi_{0i}) \quad (15)$$

$$z(n) = \sum_{i=1}^{N_f-1} A_i \cos(2\pi F_i n / F_1 + \phi_i) \quad (16)$$

$$z_x(n) = \frac{\partial z}{\partial x}(n) = \sum_{i=1}^{N_f-1} A_i K(\omega_i) \cos(\theta_i) \sin(2\pi F_i n / F_1 + \phi_i) \quad (17)$$

در عبارت خطای فوق، مجهول‌های  $k_{\xi i}$  و  $h_{\xi i}$  رابطه درجه ۲ با  $E$  دارند. لذا مجهول‌های یاد شده به ترتیب از حل معادله  $A k_{\xi} = b_{\xi}$  و  $Ch_{\xi} = d_{\xi}$  بدست می‌آید که در آن:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a'_{sx,1} & a'_{sy,1} & a'_{sz,1} \\ 1 & a'_{sx,2} & a'_{sy,2} & a'_{sz,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & a'_{sx,N} & a'_{sy,N} & a'_{sz,N} \end{bmatrix}, k_{\xi} = \begin{bmatrix} k_{\xi 0} \\ k_{\xi 1} \\ k_{\xi 2} \\ k_{\xi 3} \end{bmatrix}, b_{\xi} = \begin{bmatrix} v_{\xi,1} \\ v_{\xi,2} \\ \vdots \\ v_{\xi,N} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{sx,1} & \omega_{sy,1} & \omega_{sz,1} \\ 1 & \omega_{sx,2} & \omega_{sy,2} & \omega_{sz,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \omega_{sx,N} & \omega_{sy,N} & \omega_{sz,N} \end{bmatrix}, h_{\xi} = \begin{bmatrix} h_{\xi 0} \\ h_{\xi 1} \\ h_{\xi 2} \\ h_{\xi 3} \end{bmatrix}, d_{\xi} = \begin{bmatrix} \omega_{\xi,1} \\ \omega_{\xi,2} \\ \vdots \\ \omega_{\xi,N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ضرایب  $\{k_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=1,2,3\}$  و  $\{h_{\xi i}, \xi=x,y,z, i=1,2,3\}$  که بیانگر ضریب مقیاس و حساسیت متقابل هستند، برای تصحیح خروجی حسگرها در حالت عملکرد میدانی در دریا ذخیره و استفاده می‌شوند.

#### ۴-۲- شبیه‌ساز دینامیک امواج دریا

شبیه‌ساز دینامیک امواج دریا سری‌های زمانی جابجائی عمودی (هیو) و شیب‌های موج نسبت به محورهای افقی  $z_x = \partial z / \partial x, z_y = \partial z / \partial y$  را برای یک مختصات مد نظر در سطح دریا تولید می‌کند. مدل ایجاد امواج دریا، جمع خطی چند موج با فرکانس و زاویه‌های مختلف است [۱۶]. بر این اساس، سری زمانی جابجائی عمودی (هیو) بصورت  $z(n) = \sum_{i=1}^{N_f-1} A_i \cos(\omega_i t_n - \mathbf{k}_i(\omega) \cdot \mathbf{r} + \phi_{0i})$  مدل می‌شود.

در این رابطه،  $z(n)$  سری زمانی هیو بر حسب متر،  $N_f-1$  تعداد فرکانسها و جهت‌های مورد نظر،  $A_i$  دامنه‌های امواج

با در نظر گرفتن  $\phi_i = \phi_{i0} - k_i(\omega) \cdot r$  و تبدیل فرکانس‌های  $F_i$  برحسب هرترتز به فرکانس‌ها برحسب رادیان بر ثانیه، بصورت  $\omega_i = 2\pi F_i$  و تعیین زمان‌های نمونه‌برداری بصورت فواصل منظم با مقدار  $t_n = n / F_1$ ، سری‌های زمانی حرکت عمودی موج و شیب‌های موج بصورت زیر شبیه‌سازی گردیده‌اند:



طبق روند نمای شکل (۷) انجام گردیده است. بنابراین در شبیه‌سازی انجام‌شده، تنظیمات دینامیک امواج دریا مقادیر دامنه موج  $A_{0k}$ ، ضریب پهنای طیف  $\lambda_k$  و جهت موج  $\theta_{0k}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۴- شبیه‌سازی بویه

در شبیه‌سازی بویه (محل نصب واحد ناوبری اینرسی) ایجاد زاویه دوران افقی یا  $(\alpha)$  مطرح است. در مورد شبیه‌سازی این زاویه، سری زمانی این زاویه از نظر مشخصات طیفی و دامنه نوسانات، با حالت واقعی در شرایط میدانی مشابه‌سازی شده است. لذا ابتدا یک فرآیند تخمین طیف برای این زاویه با استفاده از داده‌های میدانی ذخیره شده، طراحی و پیاده‌سازی شده، سپس طبق مدل طیف تخمین زده شده، زاویه یا شبیه‌سازی گردیده است. یک روش معتبر برای تخمین طیف سیگنال‌هایی که ماهیت باند باریک دارند، تخمین طیف تمام قطب اتورگرسیو<sup>۲</sup> (AR) است [۱۷].

شکل (۸) ساختار الگوریتمی شبیه‌سازی یک فرآیند تصادفی بر اساس مدل سازی AR را نشان می‌دهد. در این روش، ابتدا تابع خود همبستگی نمونه واقعی سری زمانی ذخیره شده تخمین زده شده است. سپس مدل تمام قطب AR برای طیف سیگنال در نظر گرفته شده و ضرایب مجهول آن در طی معادلاتی تخمین زده شده و پس از آن، سری زمانی که باید شبیه‌سازی شود، از فیلتر کردن یک فرآیند تصادفی سفید گوسی  $N(0,1)$  با فیلتر تمام قطب تخمین زده شده، حاصل گردیده است.

تخمین تابع خود همبستگی یک سری زمانی  $x(n)$  عبارت است از  $R(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} x(n+k)x(n)$  . مرحله بعد،

تخمین ضرایب مدل فیلتر تمام قطب AR است. تابع تبدیل این فیلتر در حوزه تبدیل Z (فرکانس مختلط نرمالیزه Z) عبارت است از:

$$H(z) = \frac{\sigma_v}{\sum_{k=0}^P a_k z^{-k}}$$

که  $a_0 = 1$  و P مرتبه فیلتر می‌باشد و بصورت تجربی مقدار مناسبی برای آن در نظر گرفته شده است. ضرایب مجهول عبارتند از  $\sigma_v$  و  $a_k$ . تخمین این ضرایب از روی معادلات یول-واکر<sup>۳</sup> [۱۷] انجام شده که عبارت است از:

$$z_y(n) = \frac{\partial z}{\partial y}(n) = \sum_{i=1}^{N_f} A_i K(\theta_i) \sin(\theta_i) \sin(2\pi F_i n / F_1 + \phi_i) \quad (18)$$

در روابط فوق، فازهای تصادفی  $\phi_i$  با توزیع یکنواخت  $U(-\pi, \pi)$  برحسب رادبان برای هر فرکانس شبیه‌سازی شده اند. برای شبیه‌سازی زاویه‌های ورود  $\theta_i$  و دامنه‌های  $A_i$ ، در تعداد محدودی (P) از فرکانس‌های مورد علاقه  $F_k$  که مقدار پیک طیف در آن‌ها در نظر گرفته می‌شود، مقادیری برای دامنه موج،  $A_{0k}$ ، ضریب پهنای طیف،  $\lambda_k$  جهت موج،  $\theta_{0k}$ ، انتخاب شده است ( $k=1, \dots, P$ ). فیلتر شکل دهنده<sup>۱</sup> به هر یک از پیک‌های طیف انتخابی طبق تابع انتقال زیر طراحی گردیده است:

$$H_k(z) = \frac{(1 - \lambda_k) \sqrt{1 - 2\lambda_k \cos(4\pi F_k / F_2) + \lambda_k^2}}{1 - 2\lambda_k \cos(F_k / F_2) z^{-1} + \lambda_k^2 z^{-2}} \quad (19)$$

در این رابطه z متغیر فرکانس مختلط نرمالیزه با واحد رادبان می‌باشد.  $\lambda_k$  ضریب پهنای طیف که محدوده آن  $(0-1)$  است، برای پیک‌های تیز و بلند، نزدیک ۱ و برای پیک‌های ضعیف، نزدیک صفر قرار داده شده است. ضریب ثابت این فیلتر بگونه‌ای طراحی شده که داشته باشیم  $H_k(e^{j2\pi F_k / F_2}) = 1$  در این حال با در نظر گرفتن فرکانس نرمالیزه  $f_i = i/(2N_f)$  ,  $i=1, \dots, N_f-1$  داریم:

$$A_i = \sum_{k=1}^P A_{0k} / H_k(e^{-j2\pi f_i}) \quad (20)$$

و یا:

$$A_i = \sum_{k=1}^P \frac{A_{0k} (1 - \lambda_k) \sqrt{1 - 2\lambda_k \cos(4\pi F_k / F_2) + \lambda_k^2}}{|1 - 2\lambda_k \cos(F_k / F_2) e^{-j2\pi f_i} + \lambda_k^2 e^{-j4\pi f_i}|} \quad (21)$$

رابطه فوق دامنه‌های  $A_i$  مورد استفاده در شبیه‌سازی هیو و شیب‌های موج را تولید می‌کند. موضوع دیگر، شبیه‌سازی زاویه‌های ورود موج برای فرکانس‌های مورد نظر می‌باشد. در این بحث از روی P زاویه انتخابی  $\theta_{0k}$ ،  $N_f$  زاویه  $\theta_i$  برای شبیه‌سازی هیو و شیب‌های موج، بصورت زیر تولید شده است:

$$\begin{cases} \theta_i = \theta_{0k} , & (F_k - 0.02 \text{ Hz}) \leq F_i \leq (F_k + 0.02 \text{ Hz}) \\ \theta_i \sim U(0, 2\pi) \text{ rad} & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

بدین صورت، شبیه‌سازی کامل هیو و شیب‌های موج

<sup>1</sup> Auto Regressive

<sup>2</sup> Yule-Walker

<sup>1</sup> Spectrum Shape Filter

داده‌های ضریب مقیاس و حساسیت متقابل که در مرحله کالیبراسیون با آونگ حاصل شده است، جهت تصحیح داده‌های شتابسنج و ژیرسکوپ استفاده شده است.

عامل مهم باقیمانده در کالیبراسیون شتابسنج و ژیرسکوپ، حذف مقدار بایاس است. به لحاظ تغییرات زمان، از مقادیر اندازه‌گیری شده هنگام کالیبراسیون با آونگ نمی‌توان در میدان استفاده کرد. لذا بایاس در محل باید تخمین زده شود. 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) قابل تخمین است.

### ۵- موج‌نگاری

این بخش از شبیه‌سازی، محاسبات موج‌نگاری [۱۶] اعم از پردازش‌های تخمین طیف بدون جهت و جهت‌دار موج، زاویه ورود موج و پراکندگی زاویه‌ای در هر فرکانس و پردازش‌های پارامترهای موج‌نگاری از قبیل تخمین حداکثر ارتفاع موج، ارتفاع مؤثر موج، دوره تناوب متوسط موج، و ... را انجام می‌دهد. جهت ارزیابی محاسبات موج‌نگاری مطرح شده، در نرم‌افزار شبیه‌سازی، بخش محاسبات کمیت‌های موج‌نگاری مورد انتظار پیش‌بینی شده است که عمدتاً مقادیر طیفی می‌باشند (طیف بدون جهت و جهت‌دار موج، زاویه ورود موج و پراکندگی زاویه‌ای در هر فرکانس).

برتری و نوآوری روش حاضر را می‌توان استفاده ساده آزمایشگاهی از یک آونگ به عنوان ابزار کالیبراسیون و نیز استفاده کاربردی از نتایج شبیه‌سازی جهت هرگونه طراحی در زمینه‌های متنوعی از قبیل پردازش سیگنال، مخابرات، رادار، سونار، موج‌نگار و ... و نیز راست-آزمایی ساده دانست.

به علاوه با روش ارائه شده، قابلیت بررسی رفتار دینامیکی بویه‌های موج‌نگار با جزئیات بیشتر و کاربردی‌تر فراهم گردیده است. هم‌چنین با توجه به عدم ارائه روند شبیه‌سازی از سوی شرکت‌های مشابه در دنیا، بومی‌سازی موضوع شامل طراحی مقدماتی، شبیه‌سازی و ساده‌سازی عملی موج‌نگار، ره‌آور مناسبی از انجام این کار پژوهشی می‌باشد. مطابق با شکل (۲)، این کمیت‌ها بر اساس

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(P-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(P-2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ R(P-1) & R(P-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(1) \\ R(2) \\ \vdots \\ R(P) \end{bmatrix} \quad (23)$$

که در آن،  $w_k = -a_k$ ،  $k = 1, \dots, P$  می‌باشد. مجهول  $\sigma_v$  مطابق با  $\sigma_v^2 = \sum_{k=0}^P a_k R(k)$  محاسبه می‌شود.

با توجه به این‌که ماتریس A یک ماتریس قطر ثابت می‌باشد، حل معادله فوق با بار محاسباتی کمتر با الگوریتم لوینسون<sup>۱</sup> قابل انجام است. جزئیات در این مورد در مرجع [۱۵] قابل مطالعه می‌باشد. بدین صورت، تخمین طیف (یک‌طرفه) سری زمانی در فرکانس‌های f (Hz) عبارت است از:

$$S(f) = \frac{2}{F_s} |H(e^{j2\pi f / F_s})|^2 = \frac{2\sigma_v^2}{F_s \left| \sum_{k=0}^P a_k e^{-j2\pi k f / F_s} \right|^2} \quad (24)$$

$F_s$  فرکانس نمونه‌برداری داده واقعی ذخیره شده می‌باشد. مطلب دیگر در شبیه‌سازی زاویه یاو این است که تخمین طیف بر اساس مدل AR بصورت یاد شده، مقدار DC صفر را برای سیگنال در نظر می‌گیرد. کما این‌که مقدار DC نویز سفید ورودی به فیلتر شبیه‌ساز H(z) صفر است. در عمل هنگام تخمین طیف، مقدار DC قطعه داده‌های ضبط شده قبل از محاسبه تابع خود همبستگی حذف می‌شود. هم‌چنین در انتها، خروجی فیلتر شبیه‌ساز H(z) با یک مقدار DC تصادفی جمع می‌شود که توزیع یکنواخت U(0,  $2\pi$ ) دارد. حاصل، سری زمانی شبیه‌سازی شده "یاو" است. شکل (۹) تخمین طیف انجام شده بر اساس داده‌های تجربی کپکو ۲۸۰۰ بویه اشنور ضبط شده در محدوده زمانی ۲۰۰۶/۹/۱۱ تا ۲۰۰۷/۵/۲ را نشان می‌دهد. منطقه داده‌برداری، میانه دریای خزر با عمق ۸۰۰ بوده است. نرخ ذخیره داده‌ها،  $F_2=1$  هرتز می‌باشد. تخمین طیف (با حذف DC) صورت گرفته، نشان می‌دهد که عمده انرژی سیگنال در محدوده زیر ۰/۰۶ هرتز قرار دارد.

### ۴-۴- پردازش کالیبراسیون در محل و تخمین هیو و

#### شیب‌های موج

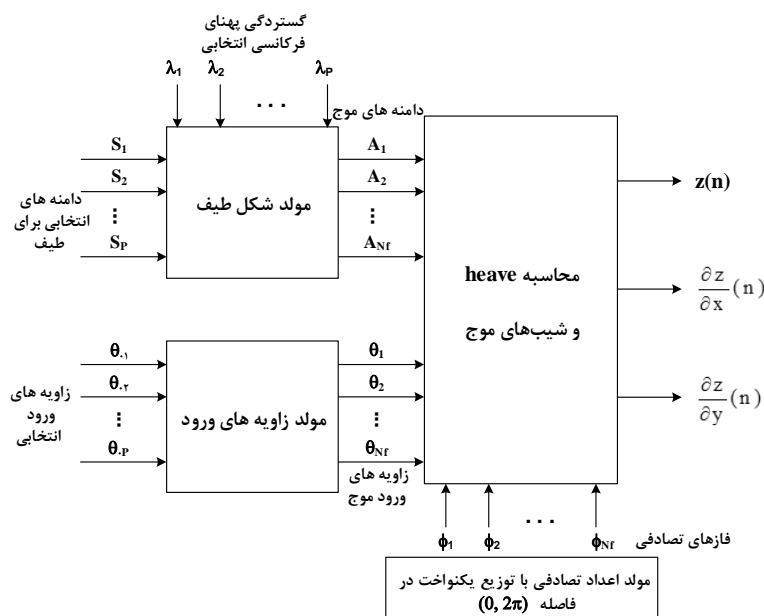
در حالت فعالیت میدانی واحد ناوبری اینرسی در دریا، از

<sup>3</sup> Levinson

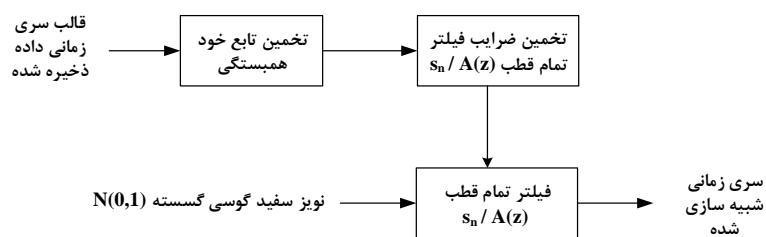
<sup>4</sup> KEPKO 800

به عنوان نمونه، شکل (۱۰) تخمین طیف بدون جهت موج را با مقدار مورد انتظار آن مقایسه نموده است. در این شکل مشاهده می‌شود که منحنی تخمین طیف انطباق خوبی با منحنی مورد انتظار طیف دارد.

تنظیمات دینامیک امواج دریا بدست می‌آیند. با مقایسه خروجی محاسبات موج‌نگاری در جریان داده تخمین سری‌های زمانی با خروجی محاسبات کمیت‌های مورد انتظار، می‌توان کیفیت تخمین‌های انجام شده را ارزیابی نمود.

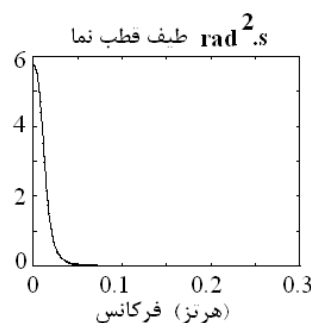


شکل (۷) روند نمای شبیه‌سازی هیو و شیب‌های موج.



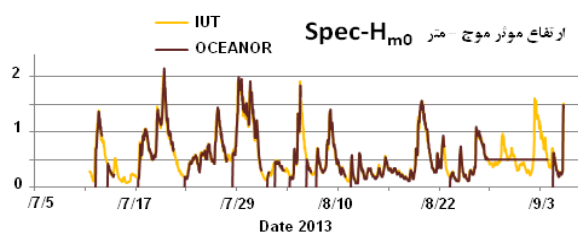
شکل (۸) ساختار الگوریتمی شبیه‌سازی یک فرایند تصادفی بر اساس مدل سازی AR آن.

شکل مشاهده می‌شود که مقادیر تخمین زاویه موج در حوالی فرکانس‌های مورد علاقه  $F_k$  به مقادیر مورد انتظار  $\theta_{0k}$  نزدیک می‌باشند. علاوه بر کنترل شکل طیف موج و متوسط زاویه ورود موج، برخی تحلیل‌های کنترل کیفی دیگر [۱۸] روی مقادیر طیفی بدست آمده قابل اجرا است تا اعتبار پردازش سیگنال انجام شده از جهت مختلف کنترل گردد. صحت‌سنجی مجموعه پردازش‌های شبیه‌سازی امواج دریا و حسگر موج‌نگار با پیاده‌سازی و آزمون فیزیکی موج‌نگار انجام شده است. بر اساس ساختار پردازشی مجموعه پردازش‌های شبیه‌سازی امواج دریا و حسگر موج‌نگار تشریح شده در این مقاله، یک حسگر موج‌نگار نصب بر بویه طراحی، ساخته و با مجموعه آزمون



شکل (۹) تخمین طیف زاویه یا با داده‌های ضبط شده کپکو ۸۰۰.

شکل (۱۱) نیز تخمین زاویه موج را با مقدار مورد انتظار آن مقایسه نموده است. بخش‌های ثابت در منحنی مورد انتظار، مقادیر  $\theta_{0k}$  می‌باشند (مطابق رابطه (۲۲)). در این



شکل (۱۲) ارتفاع مؤثر موج اندازه گیری شده از روی سری زمانی هیبو توسط حسگر موج‌نگار طراحی شده در دانشگاه صنعتی اصفهان و بویه اشنور.

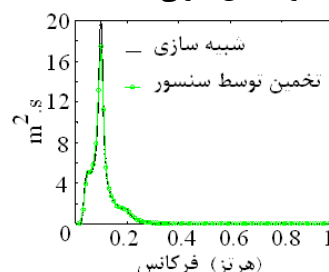
### ۷- علائم و نشانه‌ها

a	بردار شتاب دینامیکی در دستگاه ثابت (m/s <sup>2</sup> )
a'	بردار شتاب دینامیکی در دستگاه بدنه (m/s <sup>2</sup> )
a's	بردار شتاب دینامیکی در دستگاه بدنه (m/s <sup>2</sup> )
g	بردار شتاب جاذبه زمین در دستگاه ثابت (m/s <sup>2</sup> )
g'	بردار شتاب جاذبه زمین در دستگاه بدنه (m/s <sup>2</sup> )
f	فرکانس (Hz)
H(z)	تابع انتقال فیلتر زمان گسسته H در فرکانس مختلط
n	زمان گسسته
M	بردار میدان مغناطیسی حس شده در دستگاه ثابت (m/s <sup>2</sup> )
M'	بردار میدان مغناطیسی حس شده در دستگاه بدنه (m/s <sup>2</sup> )
R(k)	تابع خودهمبستگی فرآیند زمان گسسته در تأخیر k
t	زمان (sec)
z	حرکت عمودی موج (m)
$\alpha$	زاویه دوران افقی (yaw)
$\beta$	زاویه پیچش (pitch)
$\gamma$	زاویه چرخش (roll)
$\omega$	بردار چرخش زاویه‌ای حس شده (rad/s)
$\partial z / \partial x$	شیب موج نسبت به محور افقی x
$\partial z / \partial y$	شیب موج نسبت به محور افقی y

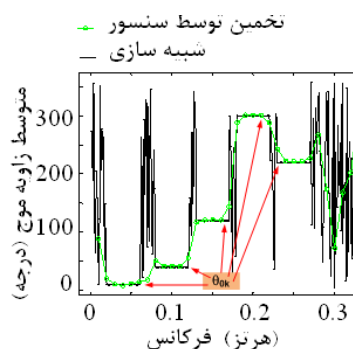
آونگ بصورت فیزیکی کالیبره گردیده است. سپس این حسگر در آب‌های بندر انزلی در نزدیکی (حدود ۵۰۰ متر) یک بویه موج‌نگار دیگر (بویه اشنور) به عنوان حسگر مرجع، آزمون گردیده است. نتایج تخمین ارتفاع مؤثر موج جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. ارتفاع مؤثر موج یک پارامتر استاندارد مشتق از سری زمانی هیبو بوده و عبارت از متوسط یک سوم بزرگترین ارتفاع موج ضبط شده است. در شکل‌های یاد شده، داده‌های بویه اشنور نیز رسم شده است که انطباق خوبی با داده‌های حسگر طراحی شده دارد.

### ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به کمک نرم‌افزار جامع شبیه‌سازی امواج دریا و حسگر موج‌نگار، حسگر طراحی شده آزمون و ارزیابی گردیده است. این نرم‌افزار بستری را فراهم نموده است تا زیرحسگرهای مختلف واحد ناوبری اینرسی، الگوریتم‌های مختلف کالیبراسیون حسگر، الگوریتم‌های مختلف تخمین سری‌های زمانی و الگوریتم‌های مختلف تخمین کمیت‌های موج‌نگاری شبیه‌سازی شده و گزینه‌های مناسب برای اجرا انتخاب گردد. نتایج تخمین ارتفاع مؤثر موج و جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف با بویه یک شرکت خارجی مقایسه و انطباق خوبی ملاحظه شده است.



شکل (۱۰) طیف فرکانسی هیبو شبیه‌سازی شده و تخمین آن توسط حسگر موج‌نگار.



شکل (۱۱) تخمین متوسط زاویه ورود موج در هر فرکانس و تطابق آن با مقادیر شبیه‌سازی شده  $\theta_i$ .

Directional Wave Module”, OCEANS MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, pp.1-8, 2009.

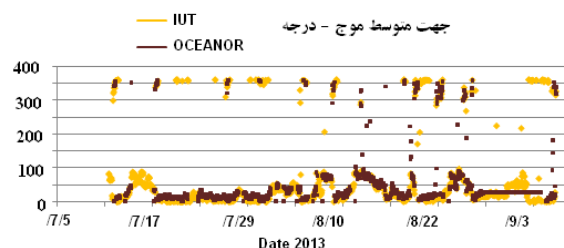
- [9] Riley, R., Teng, C., Bouchard, R., Dinoso, R. and Mettlach, T., “Enhancements to NDBC's Digital Directional Wave Module”, IEEE Oceans Conference, pp. 1-10, Sept. 2011.
- [10] Kuperus, J., “Wave Monitoring Using Wireless Sensor Nodes,” Master's Thesis, University of Melbourne, Melbourne, Australia, Sept. 2009.
- [11] Brown, H. C., Meadows, G. A., “Wave Sensing in the Upper-Great Lakes Observing System”, Ocean Waves Workshop, Nov. 2011.
- [12] Williams, J. A., “Vector Averaging in a Wave Field”, IEEE Oceans Conference, pp. 1-8, 2013.
- [13] Woodman, O. J., “An Introduction to Inertial Navigation”, University of Cambridge, Technical Report, Aug. 2007.
- [14] 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.
- [15] Ochi, M. K., “Ocean Waves: The Stochastic Approach” Cambridge Ocean Technology Series, Cambridge University Press, July 2005.
- [16] Kay, S. M., “Modern Spectrum Estimation: Theory and Application”, Englewood Cliffs, PTR Prentice Hall, 1988.
- [17] Swaykos, J., “Real-Time Quality Control Tests for In Situ Ocean Surface Waves”, U.S. Integrated Ocean Obseving System Program Office Validation, Version 10, July 2007.

[۱۸] نوریخس، "تبدیل زاویه‌های roll, pitch اندازه گیری

شده از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات

ثابت"، گزارش فنی، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر

دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.



شکل (۱۳) جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف توسط حسگر موج‌نگار طراحی شده در دانشگاه صنعتی اصفهان و بویه اشنور.

## 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, 2013.
- [3] Seawatch Wave scan Buoy, 2013, Web Site of: [www.oceanor.com](http://www.oceanor.com).
- [4] Triaxys™ Directional Wave Sensor, 2013, Web Site of: [www.axystechnologies.com](http://www.axystechnologies.com).
- [5] 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.
- [6] W. A. Venezia, A. M. Clark, K. F. Schmit, “Development of a Six Degree of Freedom Buoy Design and Analysis Program With Validating data”, IEEE Oceans Conference, Vol. 1, pp. 1390-4, 1993.
- [7] 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.
- [8] Teng, C., Bouchard, R., Riley, R., Mettlach, T., Dinoso, R., Chaffin, J., “NDBC's Digital