



طراحی و پیاده سازی سنسور موج نگار جهتی بویه های اقیانوس شناسی بر مبنای سریهای زمانی شتاب و شیب حرکات نسبت به شمال

سید مصطفی نوربخش^۱، احمد رضا زمانی^۲

کلید واژه: سنسور موج نگار الکترونیکی، تکرار موزی سنسورها، کالیبراسیون سنسورها، پردازش داده ها

مقدمه

سنسورهای موج نگار کاربرد وسیعی در اندازه گیری مشخصه های امواج دریا دارند. این سنسورها عمدتاً در بویه های هواشناسی و اقیانوس شناسی نصب گردیده و از آنها در ثبت اطلاعات سری زمانی امواج و طیف حاصل از آنها استفاده می شود. از جمله سنسورهای موج نگار موفق می توان به سنسورهای جهتی roll-pitch [۱] اشاره کرد. استفاده از سنسورهای موج نگار roll-pitch تا امروزه تداوم یافته اند. نمونه های اولیه از سنسورهای مکانیکی از این گونه، مانند سنسور آنالوگ Hippy با ابعاد بزرگ و وزن بالا با وزن ۳۶ کیلوگرم [۲] تشکیل شده است. نمونه های نوین سنسورهای موج نگار از سنسورهای مکانیکی - الکترونیکی استفاده می کنند که ابعاد و وزن به مراتب کوچکتری دارند؛ مانند سنسور بویه موج نگار شرکت OCEANOR [۳] و سنسور بویه موج نگار TRIAXYS [۴]. این سنسورها مجهز به بوردهای پردازش سیگنال برای محاسبات موج نگاری می باشند. ساخت سنسورهای فوق در حال حاضر توسط چند شرکت خارجی صورت می پذیرد و مسائل تست و کالیبراسیون آنها نیز بایستی در همان شرکتها و با صرف زمان نسبتاً طولانی انجام شود. با توجه به گسترش اندازه گیری های میدانی در داخل کشور، دستیابی به دانش فنی طراحی، ساخت و کالیبراسیون سنسورهای فوق در داخل کشور ضروری به نظر می رسد. تاکنون تجربه طراحی و ساخت سنسورهای فوق در داخل کشور وجود نداشته و کار حاضر در جهت ساخت و بکار گیری یک نمونه سنسور موج نگار بر مبنای فن آوری روز MEMS^۳ در پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۲ انجام شده است. این فن آوری در ادامه سیر تحول سنسورهای شتاب سنج و ژيروسکوپ از حالت پیاده سازی تمام مکانیکی بسوی پیاده سازی میکرو الکترونیکی است که ابعاد، وزن و هزینه پائینی دارند و در واقع، فن آوری روز می باشد [۵-۹].

سنسور موج نگاری «جهتی roll-pitch» سه کمیت بر حسب زمان حرکت عمودی heave بویه $z(t)$ ، و شیب های موج نسبت به محورهای افقی x , y یعنی $\partial z / \partial x$, $\partial z / \partial y$ را به عنوان سری های زمانی اولیه برای پردازشهای موج نگاری فراهم می کند [۱۰]. در عمل سنسورهایی که کمیت های یاد شده را مستقیماً اندازه گیری کنند، در دسترس نمی باشند. معمولاً از سنسورهایی مانند شتاب سنج و ژيروسکوپ برای اندازه گیری کمیت های مرتبط با کمیت های یاد شده استفاده می شود. لذا یک سیستم پردازش سیگنال و فیلتر برای خروجی سنسورهای موج نگاری مورد نیاز است تا سری های زمانی یاد شده برای پردازشهای اصلی موج نگاری ارائه گردد.

پردازش سیگنال در سنسور موج نگاری

^۱ استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان، mostafanoorbakhsh@cc.iut.ac.ir

^۲ استادیار پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان، arzamani@cc.iut.ac.ir

^۳ Micro-Electro-Mechanical Systems

در طراحی سنسور موج نگار لازم است پردازش سیگنال بر روی داده های دو سنسور شتاب سنج و ژيروسکوپ انجام پذیرد. در مورد شتاب سنج، هدف این است که پردازش سیگنال بصورت مطلوبی روی خروجی های شتاب سنج انجام شود تا مختصات موقعیت عمودی، Z ارائه شود. در مورد ژيروسکوپ نیز هدف این است که پردازش سیگنال بصورت مطلوبی روی خروجی های آن انجام شود تا زاویه های $roll$, $pitch$ و شیب آنها $\partial Z/\partial X$, $\partial Z/\partial Y$ بصورت لحظه ای ارائه گردد. خروجی سنسورها به عنوان داده های خام در نرخ اولیه $F_1 = 100 \text{ Hz}$ دریافت می شوند. خروجی های نهایی سیستم، Z , $\partial Z/\partial X$, $\partial Z/\partial Y$ ، نیز در نرخ کاهش یافته $F_2 = 1 \text{ Hz}$ تولید می شوند.

طراحی فیلترها

الف) فیلتر کاهش نرخ

طبقه اول مجموعه فیلترها، فیلتر پایین گذر کاهش نرخ است که روی داده های سنسورهای شتاب سنج، ژيروسکوپ، و قطبنا که در نرخ F_1 نمونه برداری شده اند، انجام می شود. نوع فیلتر، بصورت FIR⁴ متقارن فاز خطی انتخاب می شود تا هم در سیگنالهای فیلتر شده، اعوجاج فاز رخ ندهد و هم بتوان در عمل این پردازش را با پردازش کاهش نرخ $F_1 \rightarrow F_2$ توأم نموده و بار محاسباتی فیلتر کردن را به میزان $M = F_1/F_2$ کاهش داد.

ب) انتگرال گیری:

پردازش بعدی، دو بار انتگرال گیری برای بردار شتاب تخمین زده شده در دستگاه ثابت $[\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z]^T$ و یکبار انتگرال گیری برای سرعت زاویه ای $roll$, $pitch$, $d\gamma/dt$, $d\beta/dt$ است تا تخمین موقعیت \hat{X} , \hat{Y} , \hat{Z} و تخمین $roll$, $pitch$ در دستگاه بدنه $\hat{\gamma}$, $\hat{\beta}$ حاصل شود. در حالت دو بار انتگرال گیری، پردازش ایده آل، دو بار انتگرال گیری زمان پیوسته است که تابع انتقال آن به ازاء فرکانس زاویه ای Ω (rad/s) عبارت است از $H_{I2}(j\Omega) = -1/\Omega^2$. به نحو مشخص، تقریب دو بار انتگرال گیری دوزنقه ای که در حوزه زمان گسسته بصورت فیلتر⁵ IIR جمع کننده با تابع انتقال $H_{I2}(e^{j\omega}) = F_2^{-2}(1 - e^{-j\omega})^{-2}$ صورت می گیرد،⁶ میزانی از خطا در مقایسه با حالت ایده آل انتگرال گیری دارد. بخصوص اینکه برای صرفه جویی در نرخ نمونه برداری داده ها چه از نظر مصرف انرژی الکتریکی برای ارسال و چه از نظر حجم ذخیره سازی، برای نمونه برداری برای امواج دریا که تا حدود 0.3 هرتز پهنای باند دارند، به نرخ $F_2 = 1 \text{ Hz}$ اکتفا می شود.

ج) حذف بایاس

در هر یک از خروجی های سنسورهای شتاب سنج و ژيروسکوپ، مقدار تقریباً ثابتی که وابسته به دما بوده و با زمان به کندی تغییر می کند تحت عنوان بایاس اضافه می شود. بایاس معلول ساختار درونی این سنسورها می باشد. برآورد دقیق این مقدار بر حسب دمای سنسور یا دیگر مشخصات فیزیکی و شرایط محیطی، بسیار مشکل است. علاوه بر ضرورت حذف بایاس نیاز است که مؤلفه های نویز نزدیک DC نیز حذف گردند. برای حذف این مؤلفه های ناخواسته از فیلتر حذف بایاس بصورت یک فیلتر بالا گذر FIR⁷ فاز خطی استفاده می شود.

کالیبراسیون سنسورها

در مورد سنسورهای مانند شتاب سنج و ژيروسکوپ که خروجی آنها متناظر با X, Y, Z بعد متعامد است، موارد زیر را به عنوان عوامل خطا می توان برشمرد که موجب فاصله گرفتن مقادیر خروجی نهایی سنسور موج نگار از مقادیر واقعی می شوند:

- بردار مقدار ثابت خروجی، بایاس. این بردار هم با تغییرات دما و هم با گذشت زمان بصورت تصادفی تغییر می کند. تغییرات آن با گذشت زمان، آرام بوده و ثابت زمانی در حدود 5 تا 10 دقیقه می توان برای آن در نظر گرفت.
- حساسیت متقابل⁷: حس کردن کمیت مورد اندازه گیری که در ابعاد متعامد غیر از بُعد مورد نظر وجود دارد. به عنوان مثال، شتاب سنج، مؤلفه X یا Y شتاب را در بُعد Z خود حس کند. حساسیت متقابل ناشی از دو عامل ساختار درونی سنسور و عدم تطابق⁸ محورهای مختصات سنسور با محورهای مختصات بدنه می باشد.
- ضریب مقیاس⁹: نسبت ضریب تبدیل مقیاس (نسبت کمیت مورد اندازه گیری به ولتاژ یا عدد دیجیتال خروجی) واقعی به ضریب تبدیل مقیاس نامی مطرح شده برای سنسور

⁴ - Finite Impulse Response

⁵ - Infinite Impulse Response

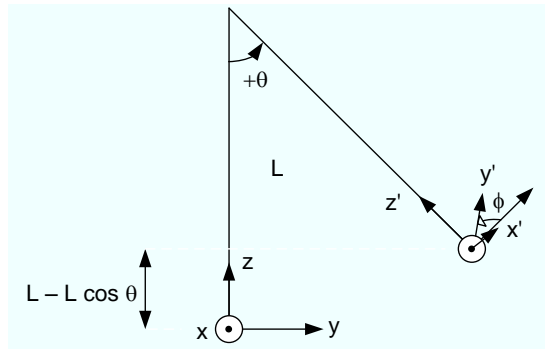
⁷ - Cross axis sensitivity

⁸ - Misalignment

⁹ - Scale factor

¹ j عدد موهومی و ω (rad) فرکانس نرمالیزه زاویه ای است.

در فرکانسهای پایین در حد امواج دریا (۰/۴ تا ۰/۳ هرتز) مقادیر عوامل خطای فوق با مقادیر مطلوب قابل مقایسه است. پردازش « مدل کردن عوامل مختلف خطا»، « تخمین پارامترهای این مدل» و «اصلاح مقادیر سنسورها با توجه به مدل و پارامترهای تخمین زده شده آن» کالیبراسیون سنسور نام دارد. تخمین پارامترها در کالیبراسیون سنسور نیاز به سنسورهای مرجع اضافه ای دارد تا مجهول های مورد نظر « با حل یک سری معادلات کمترین مربعات»، قابل تخمین باشند. برای این منظور یک مجموعه تست و کالیبراسیون بصورت آونگ طراحی و پیاده سازی شده است. این مجموعه مجهز به دو سنسور اندازه گیری زاویه نوسان آونگ θ و زاویه دوران حول شافت آونگ ϕ می باشد. شکل ۱ دستگاههای مختصات و مدل دینامیک آونگ



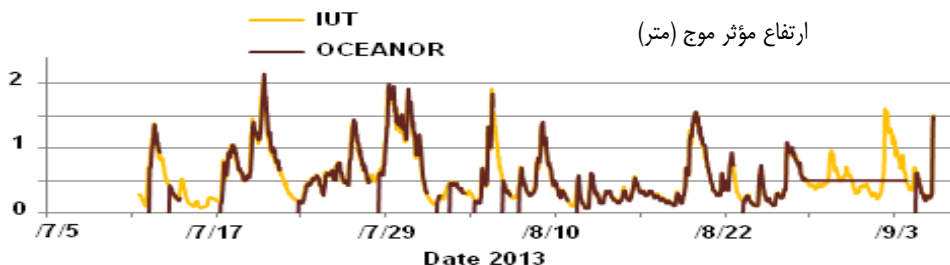
شکل ۱) دستگاههای مختصات و مدل دینامیک آونگ

پیاده سازی سخت افزاری

برای پیاده سازی سخت افزاری سنسور موج نگار، رویکرد استفاده از سنسورهای MEMS برای سنسورهای شتاب سنج و ژيروسکوپ در نظر گرفته شده است. برای کاهش نویز (خطای اندازه گیری) سنسورها، تعدادی شتاب سنج و ژيروسکوپ بصورت موازی عمل کرده و خروجی آنها با هم برآیندگیری شده اند، بصورتی که بخش پردازش، یک سنسور برآیند شده شتاب سنج و یک سنسور برآیند شده ژيروسکوپ حس می نماید. این رویکرد در واقع همان تکنیک معروف به دایورسیتی می باشد. سنسور قطبنا نیز از نوع MEMS انتخاب شده است. پردازشگر مورد استفاده، پردازنده ARM7 می باشد.

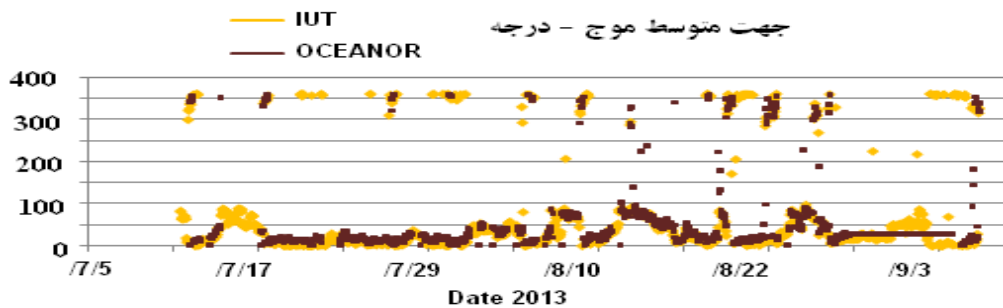
آزمونهای میدانی

صحت سنجی مجموعه پردازشهای شبیه سازی امواج دریا و سنسور موج نگار با پیاده سازی و تست فیزیکی موج نگار انجام شده است. براساس ساختار پردازشی مجموعه پردازشهای شبیه سازی امواج دریا، یک سنسور موج نگار نصب بر بویه طراحی و ساخته و با مجموعه تست آونگ بصورت فیزیکی کالیبره گردید. سپس این سنسور در آبهای بندر انزلی در نزدیکی (حدود ۵۰۰ متر) یک بویه موج نگار دیگر (بویه Oceanor) به عنوان سنسور مرجع، تست شد. نتایج تخمین ارتفاع مؤثر موج و جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف درشکلهای ۲ و ۳ آورده شده است. درشکلهای یاد شده داده های بویه با سنسور موج نگار مرجع نیز رسم شده است که انطباق خوبی با داده های سنسور طراحی شده دارد.



شکل ۲) ارتفاع مؤثر موج اندازه گیری شده از روی سری زمانی هیو توسط سنسور موج نگار طراحی شده (IUT) و بویه Oceanor

جهت متوسط موج (درجه)



شکل ۳) جهت متوسط موج در فرکانس پیک طیف توسط سنسور موج نگار طراحی شده (IUT) و بویه Oceanor

نتیجه گیری

سنسور موج نگار الکترونیکی بر اساس زیرسنسورهای شتاب سنج، ژيروسکوپ و قطب نما با فن آوری MEMS پیاده سازی شده است. با قطب نما زاویه yaw و با جریان داده ژيروسکوپ زاویه های roll, pitch و با جریان داده شتاب سنج، جابجایی عمودی heave تخمین زده می شود. برای کاهش نویز زیرسنسورها تعدادی از آنها با یکدیگر موازی شده و برآیند آنها استفاده گردیده است. برای کالیبراسیون زیرسنسورهای شتاب سنج و ژيروسکوپ، یک مجموعه تست بصورت آونگ طراحی و پیاده سازی شده است. آزمونهای میدانی، انطباق و هماهنگی داده های موج نگار طراحی شده را با موج نگار مرجع نشان می دهد.

مراجع

- [1] Longuet-Higgins, M.S., Cokelet, E.D., Smith N.D., (1961), Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, pp. 111-132.
- [2] "Ocean Waves HIPPY-40" data sheet, Coastal Environmental Systems, Inc., www.CoastalEnvironmental.com
- [3] SEAWATCH Wave scan Buoy, WWW.OCEANOR.COM
- [4] TRIAXYS™ Directional Wave Sensor, www.axystechnologies.com
- [5] Marimon, M.C., et al, (2011), Low cost sensor system for wave monitoring, Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), pp. 312-316.
- [6] Teng, C., et al, (2007), National Data Buoy Center 1.8-meter Discus Buoy, Directional Wave System, OCEANS 2007, pp. 1-9.
- [7] Teng, C., et al, (2009), "NDBC's Digital Directional Wave Module", OCEANS 2009, pp. 1-8.
- [8] Riley, R., et al, (2011), Enhancements to NDBC's Digital Directional Wave Module, OCEANS 2011, pp. 1-10.
- [9] Kuperus, J., (2009), Wave Monitoring using Wireless Sensor Nodes" M. Eng. Thesis,. University of Melbourne, Melbourne, Australia, 2009.
- [10] Ochi, M.K., (2005) Ocean Waves: The Stochastic Approach, Cambridge Ocean Technology Series.