

آنالیز حساسیت شکل موج مدل براون در ارتفاع سنجی راداری

رضا عرب صاحبی^{۱*}، بهزاد وثوقی^۲، محمدجواد طوریان^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار پژوهشی انستیتو ژئودزی دانشگاه اشتونگارت

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۵

چکیده

در ارتفاع سنجی ماهواره‌ای (ارتفاع سنجی راداری)، سنجنده به منظور تعیین ارتفاع سطح آب، پالس‌های راداری با توان معلوم را به سمت زمین ارسال و انعکاس آنرا بطور پیوسته ثبت می‌کند. سری زمانی متوسط توان بازگشتی ثبت شده در سنجنده، "شکل موج" نامیده می‌شود. مدل ریاضی شکل موج بازگشتی که اولین بار توسط براون معرفی شد؛ تحت تأثیر شش پارامتر: ارتفاع موثر موج، اپک زمانی، اریبی سطح، خروج از نادیر، سطح نویز حرارتی و ضریب پراکنش سطح می‌باشد. نقطه میانی شکل موج، نقش اصلی را در تعیین فاصله سنجنده تا سطح آب برعهده دارد. بنابراین ارزیابی میزان حساسیت این مدل ریاضی به شش پارامتر مذکور، می‌تواند در تعیین دقیق تر فاصله سنجنده تا سطح آب نقش مهمی را ایفا کند. در این تحقیق، آنالیز حساسیت شکل موج بازگشتی برای شکل موج شبیه سازی شده مأموریت ارتفاع سنجی راداری جیسون-۲ به انجام رسیده است. سپس، برای نشان دادن اثر پارامترهای اشاره شده در حالت واقعی در شکل موج بازگشتی جیسون-۲، در مسیر موجود در منطقه خلیج فارس و دریای عمان از سیکل ۲۰۸ این ماهواره ۲۲ نقطه انتخاب و آنالیز حساسیت پارامترها انجام گرفته است. نتایج حاصل نشان داد که موقعیت نقطه میانی شکل موج از حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای ارتفاع موثر موج، خروج از نادیر و اریبی سطح برخوردار بوده و در مقابل، پارامتر اپک زمانی باعث جابجایی محسوسی در مکان نقطه میانی و در نتیجه ایجاد خطا در تعیین فاصله می‌گردد. چون فرایند تعیین مولفه‌های تشکیل دهنده شکل موج یک فرایند تکراری است؛ در این تحقیق نشان داده می‌شود که چگونه می‌توان مقادیر اولیه این پارامترها را برای استفاده در روش کمترین مربعات برآورد نمود.

کلید واژه‌ها: ارتفاع سنجی راداری، آنالیز حساسیت، شکل موج، مدل براون، روش کمترین مربعات.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران-خیابان ولیعصر - بعد از تقاطع میرداماد- دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۰۲۱۸۸۷۸۶۲۱۲

Email: r.arabsahebi@mail.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

شکل موج حاصل از ارتفاع سنجی راداری، نتیجه تأثیر شش پارامتر (نویز حرارتی، دامنه پالس دریافتی در سنجنده، ارتفاع موثر موج، اپک زمانی ارسال موج از سنجنده تا سطح آب، زاویه خروج از نادیر سنجنده و اریبی سطح منعکس کننده پالس) است که بیان ریاضی این شکل موج توسط براون اثبات شد [۱]. او سطح اقیانوس را یک سطح غیرگوسین در نظر گرفت اما پس از او افراد مختلفی نظیر هاین، باریک و لیپا، رودریگز و چاپمن، چالنور و سروکز، با در نظر گرفتن پارامتر اریبی سطح منعکس کننده پالس، رابطه ارائه شده توسط براون را بهبود بخشیدند [۲، ۳، ۴ و ۵]. در محیط اقیانوسی، بر روی شکل موج بازگشتی از سطح آب، یک نقطه خاص وجود دارد که در مقیاس زمانی نشان دهنده لحظه برخورد پالس ارسالی از سنجنده به سطح متوسط آب است و اصطلاحاً به آن، نقطه ردیابی^۱ می-گویند. تعیین دقیق این نقطه به منزله تعیین دقیق ارتفاع سنجنده تا سطح آب و به دنبال آن تعیین دقیق تر ارتفاع آب خواهد بود. اما چون ردیابی ماهواره^۲ در حین دوران بدور زمین از محیط‌های آبی مختلف نظیر مناطق عمیق، کم عمق و ساحلی عبور می کند، موقعیت نقطه ردیابی نسبت به جایگاه ایده آل آن (مشابه آنچه در محیط اقیانوسی رخ می دهد)، تغییر خواهد کرد و شکل موج دریافتی از اینگونه محیط‌های آبی دچار اعوجاج خواهد شد. به فرایند ریاضی که با استفاده از آن جایگاه این نقطه را بر روی شکل موج تخمین می-زنیم، بازتعقیب شکل موج^۳ می-گویند و یکی از الگوریتم‌های مشهور که جهت تخمین نقطه ردیابی مورد استفاده قرار می گیرد، الگوریتم تخمین بیشینه درست‌نمایی^۴ (MLE) است که می تواند پارامترهای تشکیل دهنده شکل موج را برآورد نماید [۶].

پارامترهای نویز حرارتی و دامنه پالس دریافتی به آسانی از سری زمانی شکل موج قابل دستیابی است اما چهار پارامتر دیگر می بایست با استفاده از الگوریتم‌های بازتعقیب بدست آیند. چنانچه الگوریتم ریاضی مورد استفاده، MLE باشد و پارامترهای ارتفاع موثر موج، اپک زمانی و زاویه خروج از نادیر را برآورد نماییم، به این روش بازتعقیب، تخمین بیشینه درست‌نمایی سه پارامتر^۵ (MLE3) و چنانچه علاوه بر سه پارامتر ذکر شده، پارامتر اریبی سطح منعکس کننده را نیز برآورد کنیم به این روش تخمین بیشینه درست‌نمایی چهار پارامتر^۶ (MLE4) می گویند [۷]. اولین مطالعات مربوط به بررسی اثر تغییرات پارامترها در شکل موج توسط رودریگز انجام شد. او اثرات غیرگوسی را بر روی تخمین پارامترهای ارتفاع سنجی بررسی کرد و نشان داد بمنظور دستیابی به ارتفاع سنجنده، می بایست از الگوریتم ردیابی و نیز پاسخ تارگت نقطه‌ای^۷ مناسب استفاده کرد. او همچنین نشان داد تخمین پارامترها در فضای لگاریتم-فرکانس، فرایند روش کمترین مربعات را آسانتر کرده و روش بیشینه درست‌نمایی در تخمین پارامترهای اقیانوسی غیرگوسی مشکلتر از روش دی-کانولشن می باشد [۸]. باسو و پندی نشان دادند اثر تغییر پارامتر خروج از نادیر تا ۰/۵ درجه، بر روی شکل موج خیلی شدید نیست و اریبی سطح آب اثر خیلی کمی بر روی شکل موج خواهد داشت. در مطالعات آنان، همچنین اثر تغییرات ارتفاع موثر موج و زاویه خروج از نادیر نیز بر روی شکل موج بررسی گردید [۹]. انری و دیگران روشی را جهت بهبود ارتفاع موثر موج و فاصله سنجنده این‌ویست تا سطح آب در مرکز ملی اقیانوس‌شناسی ساوت همپتون مبتنی بر روش بیشینه درست‌نمایی ارائه دادند. آنها دو مدل خطی و غیرخطی (که همان روش خطی است با این تفاوت که پارامتر اریبی را نیز در نظر می گیرد) برای این منظور در نظر

¹ Tracking-point² Footprint³ Retracking waveform⁴ Maximum Likelihood Estimation⁵ Maximum Likelihood Estimation 3⁶ Maximum Likelihood Estimation 4⁷ Point Target response (PTR)

نسبت به اثر خروج از نادیر با استفاده از تابع پلی‌نومیل تصحیح شدند. بنابراین آنها به جای آنکه از پاسخ تارگت نقطه‌ای و فیلتر پایین گذر اسمی تعریف شده در سنجنده استفاده کنند از مقادیر نظیرشان در مشاهدات استفاده کردند و جدول مراجعه را به ازای خروج از نادیرهای مختلف تولید نمودند و آنرا به عنوان تصحیحات به نتایج *MLE3* اعمال نمودند و بهبود قابل ملاحظه‌ای در ارتفاع موثر موج ایجاد کردند [۱۲]. انرژی و دیگران نشان دادند که طبیعت غیرخطی بودن امواج اقیانوسی به دلیل وجود پارامتر اریبی موج است اما تخمین اولیه اریبی نشان از درصد قابل توجهی از مقادیر منفی این پارامتر بود که هیچ مفهوم فیزیکی در بر نداشت [۷]. بنابراین آنها با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های سنجنده *RA-2* ماهواره *ین‌وی‌ست* به دنبال دلایل منفی بودن این پارامتر بودند. آنها با استفاده از فیلتر همینگ، اختلاف بین مقایر خروج از نادیر واقعی و مقادیر فرضی در الگوریتم بازتعقیب را پردازش نمودند. فیلتر همینگ در حالت امواج کوتاه بشدت روی پارامترهای بازتعقیب اثر می‌گذارد امدادلیل منفی شدن پارامتر اریبی موج استفاده از این فیلتر نبود بلکه پارامتر خروج از نادیر پارامتر تأثیر گذار بر اریبی موج قلمداد شد [۱۳]. انرژی و دیگران با استفاده از الگوریتم توسعه یافته، ارتفاع موج‌های قوی در حد ۵ متر را در منطقه اقیانوس منجمد جنوبی شناسایی کردند. آنها از سیکل ۲۶ در فصل پاییز و سیکل ۲۹ در فصل زمستان ماهواره *ین‌وی‌ست* استفاده کرده و اطلاعات اضافی نظیر پارامتر اریبی موج را که مربوط به ویژگی غیرگوسی امواج اقیانوسی است برآورد کردند و نشان دادند که صرفنظر از این پارامتر خطایی در حدود ۲-۳ سانتیمتر در فاصله‌سنجی ایجاد می‌کند. [۱۴]. تیو و دیگران با استفاده از داده‌های ارتفاع‌سنجی جیسون-۲ نتایج حاصل از بازتعقیب دو روش *MLE3* و *MLE4* را با هم مقایسه نموده و دریافتند که روش *MLE4* در برآورد ارتفاع موثر موج و فاصله بخصوص در حالتیکه شکل موج از مدل براون تبعیت نمی‌کند دارای برتری است

گرفتند و نشان دادند بازای ارتفاع موثر موج تا ۴ متر، میزان شیفت زمانی تا حد ۸ نانوثانیه می‌تواند باشد که این میزان تصحیح زمان، تصحیح فاصله ارتفاع‌سنجی تا حد ۱۲۰ سانتیمتر را منجر خواهد شد و انحراف معیار اختلاف بین داده‌های بدست آمده از ثبت داده‌های ژئوفیزیکی سنسور *RA-2* مربوط به ماهواره *ین‌وی‌ست* و روش پیشینه درستمایی خطی ۶/۹ سانتیمتر بدست آمد؛ در حالیکه انحراف معیار این اختلاف با روش پیشینه درستمایی غیرخطی حدود ۵/۵ سانتیمتر شد که نشان می‌داد ثابت فرض نمودن پارامتر اریبی موج در سنجنده برابر صفر فرض مناسبی نیست [۱۰]. آماروچ و دیگران اثر زاویه خروج از نادیر پلت‌فرم ماهواره بر روی پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط سنجنده را بررسی کردند و الگوریتم محاسبه فاصله (ردیاب ستاره)^۱ که در سنجنده تعبیه شده است را بهبود بخشیدند. در مأموریت جیسون-۱ مشخص شد این الگوریتم دارای یک سری آنامولی‌هاست و در مأموریت جیسون-۲ این الگوریتم بازاء زاویه خروج از نادیر کمتر از ۰/۳ درجه تعریف شد. اما این روش بازاء مقادیر بزرگ زاویه خروج از نادیر، مقادیر پارامترهای اقیانوسی را غیردقیق برآورد می‌کرد بنابراین آنها این روش ردیابی را با استفاده از یک مدل تحلیلی بهبود دادند که می‌توانست بازاء زاویه خروج از نادیر تا ۰/۸ درجه نیز برآورد دقیقی از پارامترهای اقیانوسی ارائه دهد [۱۱]. تیو و دیگران بمنظور تصحیح پارامترهای برآورد شده حاصل از الگوریتم‌های ردیابی موجود در سنجنده و ایستگاه زمینی، از جدول مراجعه^۲ استفاده کردند. پارامترهای ارتفاع موثر موج، ضریب پراکنش و فاصله سنجنده تا سطح آب از داده‌های ارتفاع‌سنجی جیسون-۱ مبتنی بر روش *MLE3* را بدست آوردند. در واقع، جهت محاسبه پارامترهای ژئوفیزیکی از الگوریتم نسخه ساده شده *MLE3* استفاده کرده و این پارامترها

¹ Star tracker² Look-up table

$MLE3$ و $MLE4$ روش‌های مبتنی بر تکرار هستند و در فرایند کمترین مربعات مربوط به آنها به مقادیر اولیه این پارامترها نیاز است، در پایان نیز به نحوه دستیابی به این مقادیر می‌پردازیم.

۲- تشریح شکل موج

ارتفاع سنج راداری، یک سنجنده راداری است که پالس‌های منظمی را در راستای نادیر ارسال کرده و زمان رفت و برگشت پالس همراه با توان سیگنال بازگشتی از سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه، فاصله بین ماهواره تا سطح دریا را با عنوان h اندازه‌گیری می‌کند. ارتفاع ماهواره تا بیضوی رفرنس H و h_{atm} و h_{SSB} به ترتیب تصحیح اتمسفری و تصحیح وضعیت دریا محسوب می‌شوند. [۱۷ و ۱۸].

بنابراین ارتفاع سطح آب از رابطه (۱) بدست می‌آید

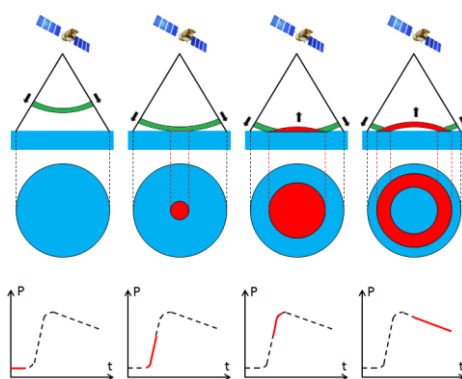
$$SSH = H - h_c = H - (h + h_{atm} + h_{SSB}) \quad (۱)$$

شکل پالس بازگشتی به ویژگی‌های سطح مشاهداتی (سطح اقیانوسی) بستگی دارد. این سطح، یک سطح هموژن است که از آن می‌توان پارامترهای ژئوفیزیکی؛ نظیر ارتفاع موج دریا و سرعت باد را استخراج کرد. نحوه تشکیل شکل موج بازگشتی از سطح اقیانوسی آرام و ناآرام در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. ابتدا، قبل از اینکه پالس ارسالی به زمین برسد، سیگنال (توان دریافتی در سنجنده) یک سطح پایین ثابتی را نشان می‌دهد. این بخش از سیگنال دریافتی، نتیجه تابش یا تشعشعات طبیعی (تشعشعات لرزه‌ای، تشعشعات اتمسفری و ...) و یا ممکن است نتیجه تابش یا تشعشعات خود بدنه و تجهیزات ماهواره باشد که آنرا به نام نویز حرارتی^۲ می‌شناسیم.

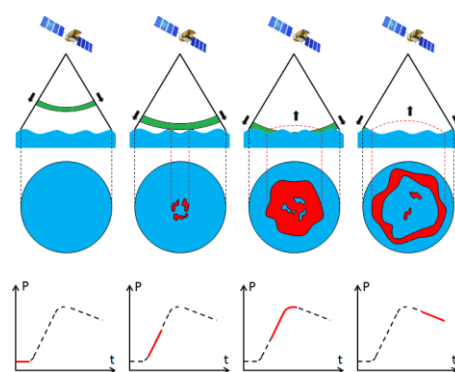
اما در محاسبه سطح نویز فاصله و نیز تخمین ضریب پراکنش دارای ضعف است [۱۵]. ملونی و دیگران با ارائه یک رابطه ساده برای پاسخ ضربه‌ای اقیانوسی، رابطه ارائه شده توسط براون را ساده‌تر کردند و با استفاده از بررسی اثر مقادیر ضریب پراکنش، خروج از نادیر و انحراف معیار سطح و نیز در نظر گرفتن پارامترهای سنسور سیرال^۱ نتایج را شبیه‌سازی نمودند و دریافتند که رابطه ساده شده، در سطوح صاف در لبه پسین شکل موج، تغییرات کوچکی خواهد داشت اما در سطوح یخی، این لبه تحت تأثیر زیادی قرار خواهد گرفت و روی زمین هموار، شکل موج به حالت گوسی در می‌آید و اختلاف بدست آمده مربوط به اندازه‌گیری فاصله در زمین ناهموار در حد ۳ متر است و هرچه نقاط نشانه‌روی هموارتر باشد این اختلاف کمتر خواهد بود [۱۶]. بطور کلی، برای آنکه به سراغ بهبود شکل-موج در محیط‌های غیراقیانوسی برویم یا به عبارتی موقعیت نقطه میانی در شکل موج را بطور دقیق مشخص نماییم نیاز است ابتدا میزان تأثیرپذیری شکل-موج را از تغییر المانهای تشکیل دهنده آن بدانیم. در این مقاله، هدف نشان دادن اثر تغییرات این پارامترها در شکل موج مدل براون و تعیین مقادیر محتمل این پارامتر در مشاهدات ارتفاع‌سنجی در یک سیکل است. به همین منظور، از پارامترهای ماهواره جیسون-۲ استفاده کرده و با شبیه‌سازی آن به ارزیابی اثرات تغییر پارامترهای شکل موج خواهیم پرداخت. در واقع، نوآوری مقاله در این است که با استفاده از شبیه‌سازی شکل موج حاصل از مأموریت جیسون-۲، حساسیت شکل موج به پارامترهای تشکیل دهنده آن مشخص گردیده است. اما در واقعیت انتظار نداریم که تنها یک پارامتر تغییر کند و مابقی آنها ثابت باشند؛ بنابراین بر روی مشاهدات واقعی این سنجنده، اثر توأم تغییر پارامترهای تشکیل دهنده را در شکل‌دهی شکل موج نهایی نشان خواهیم داد. چون روش‌های بازتعقیب

² Thermal Noise

¹SIRAL (SAR Interferometer Radar Altimeter)



شکل ۱: نحوه شکل‌دهی سیگنال دریافتی در سنجنده در حالت انعکاس از دریای آرام [۲۰]



شکل ۲: نحوه شکل‌دهی سیگنال دریافتی در سنجنده در حالت انعکاس از دریای ناآرام [۲۰]

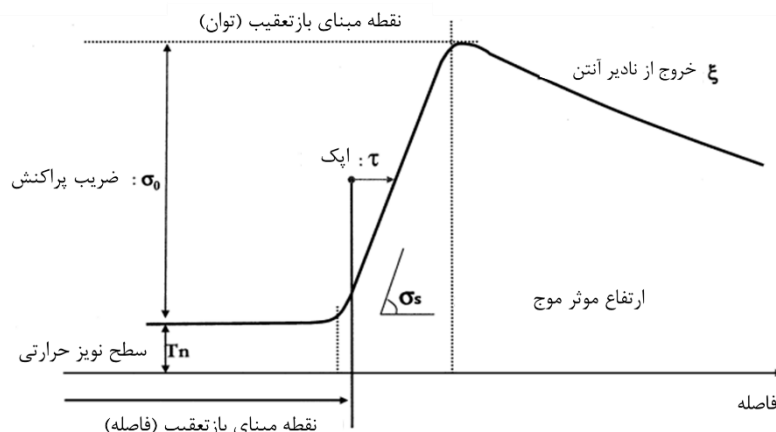
نادیر دور می‌شود، سیگنال شروع به کاهش می‌کند. این بخش نزولی سیگنال را لبه پسرو^۲ می‌نامیم. نتیجه پالس ارتفاع‌سنج به شش پارامتر تشریح شده در شکل (۳) بستگی دارد. پارامتر T_n نویز حرارتی است، دامنه پالس دریافتی در ارتفاع‌سنج است که با سرعت باد مرتبط است، SWH ^۳ ارتفاع موثر موج است که با σ_s مرتبط است، ϵ زاویه خروج از نادیر و λ_s اریبی مرتبط با انحناء لبه پیشین سیگنال است. با استفاده از پارامتر اپک τ ، ارتفاع ماهواره را بدست می‌آوریم. این پارامتر، بیانگر شیفت زمانی است و بر حسب ثانیه بیان می‌شود. اپک معمولاً بر حسب تعداد پنجره-هایی است (τ_0) که با رزولوشن زمانی (T_s) با فرمول $\tau = \tau_0 T_s$ رابطه دارد.

به محض اینکه پالس به سطح مشاهداتی (اقیانوس) می‌رسد مرحله دوم تولید سیگنال اتفاق می‌افتد که نشان دهنده خیزش سیگنال است. این مرحله با دوایری با شعاع‌های در حال افزایش نشان داده شده که شعاع این دوایر متناسب با توان دریافتی در ارتفاع‌سنج است [۱۹]. تا مادامی که پالس به درون سطح مشاهداتی (اقیانوس) نفوذ می‌کند، سیگنال حاصله به خیزش ادامه می‌دهد که این میزان خیزش نشان دهنده شیبی است که بطور مستقیم متناسب با ناهمواری سطح مشاهداتی می‌باشد (بعبارت دیگر این میزان خیزش یا شیب، بیانگر ارتفاع موج می‌باشد). این بخش صعودی سیگنال را لبه پیشرو^۱ می‌نامیم. در مرحله آخر، سطح مشاهداتی به یک چنبره تبدیل می‌شود و بخاطر بهره‌وری آنتن بمحض اینکه پالس از

² Trailing Edge

³ Significant Wave Height

¹ Leading Edge



شکل ۳: پارامترهای ژئوفیزیکی شکل موج [۱۱]

۳- مدل ریاضی شکل موج (مدل براون)

مدل ریاضی که برای بدست آوردن شکل موج بازگشتی از یک سطح منعکس کننده مورد استفاده قرار گرفت، مبتنی بر تئوری فیزیک نور بود که به موجب آن، این سطح منعکس کننده بصورت مجموعه‌ای از سطوح آئینه‌ای با توزیع چگالی احتمال ارتفاع و شیب معلوم در نظر گرفته شد. سری زمانی متوسط توان بازگشتی (شکل موج) یا همان $P(t)$ ، که با استفاده از ارتفاع سنج اندازه‌گیری میشود، با استفاده از رابطه (۲) بعنوان کانولشن سه ترم در فضای زمان بیان می‌گردد [۱].

$$P(t) = P_{fs}(t) \otimes q_s(t) \otimes P_{PTR}(t) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که t زمان اندازه‌گیری شده در گیرنده ماهواره، $t=0$ ، مربوط به فاصله تا سطح متوسط در موقعیت نادیر و سمبل $\otimes$ علامت کانولشن است. $P_{fs}(t)$ پاسخ متوسط ضربه‌ای از سطح صاف، $q_s(t)$ تابع چگالی احتمال ارتفاع نقاط آئینه‌ای در محدوده ردپای ماهواره و $P_{PTR}(t)$ پاسخ تارگت نقطه‌ای سیستم راداری است که هر یک از این ترم‌ها را در ادامه توضیح خواهیم داد.

بمنظور بیان تحلیلی رابطه کانولشن (۲)، براون بیان ساده‌ای از این ترم‌ها را در حالت نزدیک به نادیر ارائه داد که برای تمام سیستم‌های راداری ارتفاع‌سنجی مرسوم است.

۳-۱- پاسخ ضربه‌ای متوسط سطح صاف

در رابطه (۲)، $P_{fs}(t)$ توان بازگشتی متوسط از سطح صاف (در محدوده‌ای که تحت تأثیر ضربه قرار گرفته) است که دارای مقیاس کوچکی از ناهمواری بوده، اما توسط همان مقطع عرضی پراکنش بر واحد سطح پراکنش $^1 (\sigma^0)$ ، بعنوان سطح واقعی شکل می‌گیرد. چون با سطح تارگتی مواجهیم که در حال افزایش است، $P_{fs}(t)$ را میتوان از انتگرال روی محدوده ردپای ماهواره طبق رابطه (۳) بدست آورد.

در رابطه (۳)، λ طول موج رادار، L_p میرایی انتشار دوطرفه $^2 \delta(t-2r/c)$ تابع دلتای ارسالی متناسب با تأخیر در زمان $^3 \delta(t-2r/c)$ ، بهره رادار آنتن و r فاصله رادار تا المان مساحت پراکنش روی سطح است.

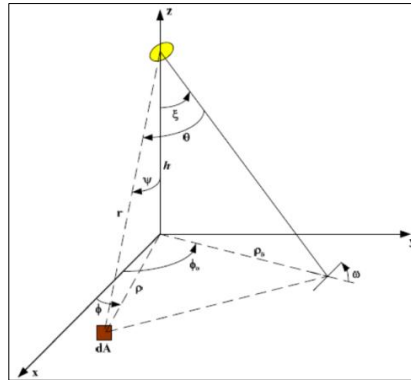
شکل (۴) هندسه پاسخ ضربه‌ای متوسط سطح صاف را نشان میدهد.

¹ Backscatter Coefficient of surface

² Two-way propagation loss

³ Transmitted delta function appropriately delayed in time

$$P_{fs}(t) = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 L_p} \int_{\text{illuminated area}} \frac{\delta\left(t - \frac{2r}{c}\right) G^2(\theta, \omega) \sigma^0(\psi, \phi)}{r^4} dA \quad \text{رابطه (۳)}$$



شکل ۴: هندسه متوسط پاسخ ضربه‌ای سطح صاف [۲۰]

که همان ترم مقیاسی است که شامل زاویه خروج از نادیر ξ و چند مقدار ثابت دیگر نظیر طول موج رادار، بازتاب‌پذیری اقیانوس و بهره‌آنتن رادار می‌باشد [۱]. در رابطه (۵) و (۶)، h ، ارتفاع ماهواره نسبت به سطح رفرانس بیضوی و γ_a پارامتر پهنای اشعه آنتن است که توسط براون تعریف شده است. در رابطه (۷)، θ ، پهنای اشعه آنتن است.

$$P_{fs}(\tau) = A \exp(-\alpha\tau) I_0(\beta\tau^{1/2}) U(\tau) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\alpha = \frac{4c}{\gamma_a h} \cos(2\xi) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\beta = \frac{4}{\gamma_a} \left(\frac{c}{h}\right)^{1/2} \sin(2\xi) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\gamma_a = \frac{\sin^2 \theta}{\ln 4} \quad \text{رابطه (۷)}$$

۲-۳- تابع چگالی احتمال ارتفاع نقاط آئینه‌ای

الگوی آشکارسازی لحظه‌ای ارتفاع‌سنج، به ارتفاع موج در لحظه τ در محدوده ردپا بستگی دارد. بخاطر طبیعت تصادفی توزیع ارتفاع سطح موج، می‌بایست برای تعیین شکل موج، پاسخ تارگت نقطه‌ای نقاط آئینه‌ای را در نظر بگیریم. بعنوان اولین تقریب، توزیع ارتفاع سطح آب گوسی است [۱۷]. مقیاس توزیع ارتفاع موج با SWH بیان می‌شود که متوسط ارتفاع اوج

صفحه XY مرتبط با سطح صاف و محور z با خط رادار آنتن تا نقطه نادیر روی سطح مرتبط است. محور خط دید رادار^۱ با محور z زاویه ξ و با محور z زاویه ϕ_0 می‌سازد. زاویه θ از خط دید رادار تا خط واصل آنتن تا المان سطحی پراکنش (dA) ادامه داشته و زاویه ψ زاویه‌ایست که این خط با محور z می‌سازد. آنتن در ارتفاع h نسبت به صفحه XY قرار دارد. توجه داشته باشید که بهره آنتن با زوایایی بیان می‌شود که نسبت به خط دید رادار اندازه‌گیری شده‌اند (θ, ω) و، در حالیکه σ^0 بر حسب زوایایی است که نسبت به محور z بیان می‌شود (ψ, ϕ).

المان سطحی پراکنش بصورت $dA = \rho d\rho d\psi$ تعریف شده و نمو زمان فاصله‌سنجی دوطرفه را بصورت $\tau = t - 2h/c$ در نظر می‌گیریم. تحت هندسه فوق و بر اساس فرضیات صورت گرفته، در حالت $\tau \geq 0$ و نیز با استفاده از تقریب گوسی بهره آنتن، براون، $P_{fs}(t)$ را در محدوده ردپای ماهواره روی سطح زمین طبق رابطه (۴) نشان داد. در رابطه (۴) عبارت $U(\tau)$ تابع پله‌ای، $I_0(\beta\tau^{1/2})$ تابع بسل تعمیم‌یافته، A دامنه

¹ Radar bore-sight axis

تا پایین ترین ارتفاع یک سوم مرتفع ترین موج ها تعریف می گردد. برای بیان ویژگی های آماری ارتفاعات خطی رابطه (۸)

در رابطه (۸)، ζ ارتفاع سطح بالای سطح متوسط نقاط آینه ای (مثبت بسمت بالا)، λ_s پارامتر اریبی سطح، σ_s انحراف معیار ارتفاع سطحی نسبت به SWH با استفاده از رابطه $SWH = 4(2/c)\sigma_s$ و $H_3(\zeta)$ چند جمله ای درجه ۳ از درونیاب هرمیت است.

۳-۳ پاسخ تارگت نقطه ای سیستم راداری

اساساً پاسخ تارگت نقطه ای سیستم راداری همان شکل پالس ارسالی رادار است. این پاسخ بصورت رابطه (۹) ارائه می شود [۲۱] که در این رابطه T دوره پالس ارسالی (یا طول پالس فشرده است و a ثابتی

سطح، از توزیع چگالی احتمال گوسین نقاط آینه ای استفاده می کنیم [۱].

$$q_s(\zeta) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_s} \left(1 + \frac{\lambda_s}{6} H_3(\zeta)\right) \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2}\right)$$

است که به پهنای اشعه رادار وابسته است. بنابراین، بسط متقارن پاسخ ضربه حول $t=0$ است. چون پهنای PTR پالس کوتاه ارتفاع سنج راداری از دسته ۲۰ نانوثانیه است. رابطه (۹) را بر حسب تابع گوسی میتوان بصورت رابطه (۱۰) ساده کرد که در آن η_p نرخ فشردگی پالس، P_T اوج توان ارسالی و σ_p اندازه پهنای پالس است که طبق رابطه (۱۱)، 0.425 تقریبی از پالس فشرده می باشد که با استفاده از تابع گوسین بدست می آید [۲۲].

$$P_{PTR}(t) = \frac{\sin^2\left[\frac{(at/2)(T-|t|)}{(at/2)^2}\right]}{(at/2)^2}; -T \leq t \leq T$$

$$P_{PTR}(t) \approx \eta_p P_T \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma_p}\right)^2\right] \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\sigma_p = 0.425T \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که پارامترهای ژئوفیزیکی آب را میتوان از شکل موج بازگشتی استخراج نمود. اگر بخواهیم توان بازگشتی از سطح اقیانوسی که با استفاده از رابطه (۱۲) توسط براون مدلسازی شده است را بطور خلاصه نشان دهیم این مدل حاصل کانولشن سه ترم است: (۱) $P_{fs}(t)$ که یک تابع نمایی است، (۲) $q_s(t)$ یا PDF که یک تابع گوسی است و (۳) $P_{PTR}(t)$ که یک تابع سینک می باشد. شکل (۵) نتیجه کانولشن این سه ترم را نشان می دهد.

$$P(t) \approx P_{fs}(t) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{PTR}(t-\tau) q_s\left(\frac{c}{2}(\tau-\hat{\tau})\right) d\tau d\hat{\tau} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

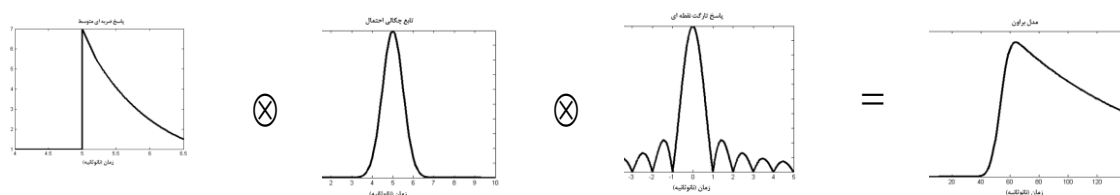
$$\approx \eta_p P_T P_{fs}(t) \sigma_p \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right) + 1 \right]$$

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \left(\frac{2}{c}\sigma_s\right)^2 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

۳-۴ شکل موج بازگشتی براون

بروان با استفاده از روابط (۴)، (۸)، و (۱۰) نشان داد که کانولشن (۲) با فرض پارامتر اریبی سطح برابر صفر بصورت رابطه (۱۲) خلاصه می شود که در آن $\operatorname{erf}(x)$ تابع خطا و σ زمان اوج ترکیبی است که بصورت رابطه (۱۳) می باشد.

رابطه (۱۲)، مدل اساسی شکل موج بازگشتی از سطح اقیانوسی است که به مدل براون معروف است. این رابطه خیلی مهم است چون بوضوح نشان میدهد



شکل ۵: نحوه شکل‌گیری مدل براون

۴- آنالیز حساسیت شکل موج

در تمام مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی، از طریق الگوریتم‌های بازتعقیب که یک مدل تحلیلی به شکل-موج حاصل از اندازه‌گیری برآزش می‌کند، تخمین دقیق پارامترهای ژئوفیزیکی صورت می‌گیرد. برای آنکه بتوان یک روش بازتعقیب برای دسته‌ای خاص از شکل-موج‌ها ارائه نمود می‌بایست ابتدا شکل‌موج‌ها را طبقه‌بندی نمود. لازمه طبقه‌بندی صحیح شکل‌موج‌ها اینست که شکل‌موج را بشناسیم و حساسیت آنرا به پارامترهای تشکیل‌دهنده شکل‌موج بررسی نماییم [۲۳]. مدل براون یک نمایش بسیار مناسبی از توان بازگشتی از سطح اقیانوس‌ها است. تخمین‌گر کمترین مربعات که از MLE بدست می‌آید در بیشتر فرایندها پردازش زمینی مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی نظیر توپکس، جیسون-۱، جیسون-۲ و این‌وی‌ست استفاده می‌شود [۲۴ و ۲۵]. الگوریتم $MLE3$ سه پارامتر را تخمین می‌زند (فاصله، SWH و توان) در حالیکه الگوریتم $MLE4$ علاوه بر پارامترهای گفته شده پارامتر شیب لبه پسین شکل‌موج را نیز تخمین می‌زند. الگوریتم $MLE3$ در جیسون-۱ قبل از آنکه مشکلات مربوط به ردیاب ستاره در آن رخ دهد استفاده شد و الگوریتم $MLE4$ در نسخه B جیسون-۱ و در محصولات جیسون-۲ از شروع مأموریت استفاده گردیده است [۲۶]. در واقع در $MLE3$ فرض بر خطی بودن پارامترهاست ولی در $MLE4$ فرض بر غیرخطی بودن پارامترهاست و ارببی سطح اقیانوس هم در نظر گرفته می‌شود و نیاز است بعنوان پارامتر مجهول برآورد شود.

۴-۱- آنالیز حساسیت شکل موج بر اساس مدل

شبیه‌سازی شده

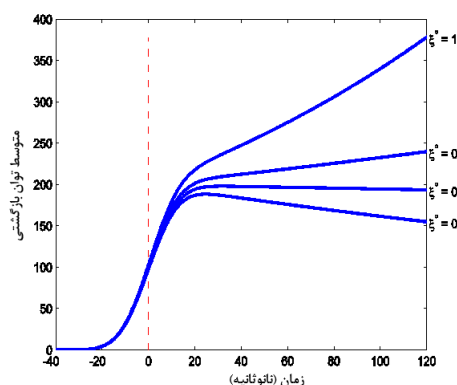
بمنظور برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی اقیانوس (اریبی و SWH) و پارامتر ماهواره (خروج از نادیر آنتن) با استفاده از شبیه‌سازی، اثر این پارامترها بر روی شکل‌موج بدست آمده در سنجنده را نشان می‌دهیم.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی ماهواره جیسون-۲

ارتفاع ماهواره (کیلومتر)	۱۳۳۶	
زاویه میل مداری (درجه)	۶۶	
باند طیفی	Ku	C
فرکانس راداری (گیگاهرتز)	۱۳/۶	۵/۳
پهنای باند آنتن (درجه)	۲۶/۱	۳/۳۸
فرکانس تکرارپذیری پالس	۱۸۰۰	۳۰۰
پهنای گیت (نانوثانیه)	۳/۱۲۵	۳/۱۲۵

ماهواره جیسون-۲ در ۲۰ ژوئن ۲۰۰۸ میلادی در مدار قرار گرفت و در ۱۷ ژانویه ۲۰۱۶، ماهواره جیسون-۳ جایگزین آن شد. جدول (۱)، برخی از اطلاعات مربوط به سنجنده ارتفاع‌سنج مورد استفاده در ماهواره جیسون-۲ را نشان می‌دهد. این سنجنده در دو باند فرکانسی Ku و C به جمع‌آوری داده‌ها پرداخت. بر اساس رابطه (۱۲) که نشان دهنده ارتباط شکل موج یا توان موج ($P(t)$) با پارامترهای ژئوفیزیکی اقیانوس و پارامتر ماهواره است، می‌خواهیم نشان دهیم که تغییرات این پارامترها چه تأثیری در مقدار توان موج خواهد داشت. در اینجا قرار است میزان حساسیت پارامتر توان موج را نسبت به تغییرات پارامترهای ژئوفیزیکی و پارامتر ماهواره تعیین کنیم. در واقع، در

شکل (۶)، ملاحظه می‌گردد که با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای اپک، SWH و صفر در نظر گرفتن اریبی موج، تغییرات زاویه خروج از نادیر، هم شیب لبه پیشین (خیلی کمتر) را و هم شیب لبه پسین (بصورت معنی‌دار) را تغییر می‌دهد که تغییرات شیب لبه پسین نسبت به تغییرات ξ بصورت صعودی و خطی است. با وجود تغییر شیب لبه پیشین در اثر تغییر ξ ، موقعیت نقطه میانی روی لبه پیشین (فاصله سنجده تا سطح متوسط آب) تغییر نمی‌کند. از طرفی ملاحظه می‌گردد با افزایش مقدار ξ ماکزیمم توان شکل موج نیز افزایش می‌یابد اما بر روی سطح نويز حرارتی نیز بی‌تأثیر است. بنابراین، با وجود اثرگذاری تغییرات ξ بر روی شیب لبه پیشین و پسین، موقعیت نقطه میانی شکل موج تغییر نخواهد کرد و شیب لبه پسین از ξ برابر 0.6 درجه تغییر خواهد کرد.



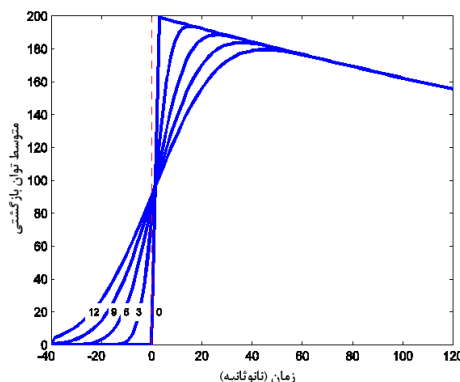
شکل ۶: اثر تغییرات زاویه خروج از نادیر بر روی متوسط توان بازگشتی در حالت $SWH = 6m$ و $t_0 = 0$ ، $\lambda_s = 0$

گردیده و باعث می‌شود ماکزیمم توان شکل موج نیز کاهش یابد اما در موقعیت کلی نقطه میانی تغییری ایجاد نمی‌کند. شکل (۷) بیانگر اثر تغییرات پارامتر SWH بر روی توان دریافتی در سنجنده است. بر خلاف دو پارامتر قبلی، تغییرات اریبی سطح اقیانوس تأثیر قابل ملاحظه‌ای در شکل کلی موج نداشته و تغییر این پارامتر از صفر به ۵، در ابتدا و انتهای لبه پیشین اثر بیشتری نسبت به نقطه میانی داشته اما باعث شیف‌ت خیلی جزئی در راستای افقی می‌شود و باعث خطایی در یافتن ارتفاع سطح متوسط

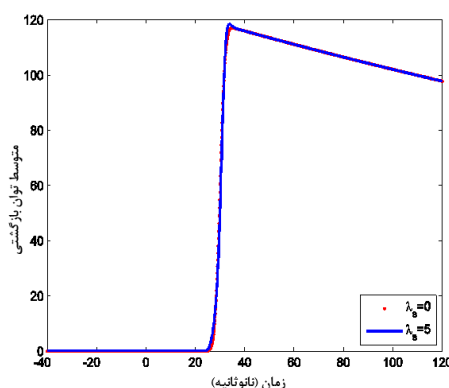
اینحالت فرض می‌کنیم مابقی پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۱۲) معلوم بوده و در سمت راست رابطه، تنها چهار پارامتر مربوط به الگوریتم $MLE4$ می‌تواند متغیر باشد. اما آنچه که مهم است در پیدایش رابطه (۱۲) دستیابی به تمام پارامترهای ماهواره و سنجنده امکانپذیر نیست. در چنین حالتی از فرم نرمالایز شده دسترس قرار دارد استفاده می‌شود و پارامترهایی که در دسترس نیست، حاصل آنها به مقدار واحد در نظر گرفته می‌شود. در نهایت به عدد بدست آمده یک مقیاس اعمال می‌کنیم. برای آنکه بتوانیم آنالیز حساسیت شکل موج را بر حسب تغییرات پارامترهای مورد بحث نشان دهیم، رابطه (۱۲) را به فرم $P(t) = P(SWH, \xi, \tau, \lambda_s)$ در نظر گرفته و در ادامه به این بررسی خواهیم پرداخت. با توجه به

در حالت دوم، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای اپک، زاویه خروج از نادیر و اریبی، تغییرات SWH بر روی تغییر موقعیت نقطه میانی لبه پیشین (نقطه ردیابی) تأثیری نداشته و تنها باعث خوابیدن شکل موج، قبل و بعد از نقطه میانی می‌شود. SWH برابر صفر، سطح نويز حرارتی را در حد صفر نگه می‌دارد در حالیکه افزایش ارتفاع موج باعث افزایش سطح نويز حرارتی و نیز باعث کاهش توان نقطه ماکزیمم می‌گردد. افزایش SWH از صفر تا ۱۲ متر باعث دوران شکل موج حول نقطه میانی در جهت عقربه ساعت

گردیده و در تعیین ارتفاع دقیق می‌بایست مراقب آن باشیم [۹]. اثر این پارامتر در شکل (۸) نشان داده شده است.



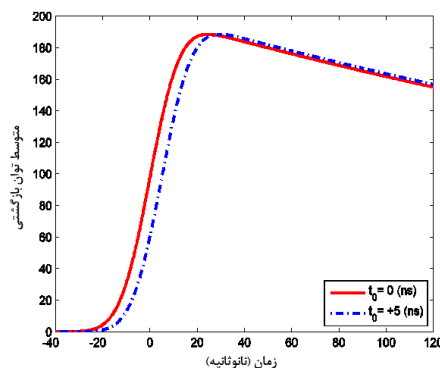
شکل ۷: اثر تغییرات SWH (بر حسب متر) بر روی متوسط توان بازگشتی در حالت نادیر ($\xi = 0^\circ$) برای $t_0 = 0$ و $\lambda_s = 0$



شکل ۸: اثر تغییرات اریبی بر روی متوسط توان بازگشتی در حالت نادیر ($\xi = 0^\circ$) برای $SWH = 6m$ و $t_0 = 0$

میانی خواهد داشت. حال، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای خروج از نادیر، SWH و اریبی سطح اقیانوس، چنانچه پارامتر اپک از صفر به $+5$ نانوثانیه تغییر نماید باعث شیفت شکل موج در راستای افق بسمت راست می‌گردد که این بدان معنی است که فاصله سنجنده تا سطح آب بیشتر تخمین زده شده است. بنابراین انتظار داریم که اگر پارامتر اپک -5 نانوثانیه در نظر گرفته شود شکل موج بسمت چپ انتقال یابد. نحوه اثر این پارامتر بر روی شکل موج براون در شکل (۹) نشان داده شده است.

تاکنون ملاحظه شد با ثابت در نظر گرفتن ۳ پارامتر از ۴ پارامتر تعریف کننده شکل موج براون، تغییرات خروج از نادیر (که یک پارامتر مربوط به ماهواره است) باعث تغییر شکل موج براون در لبه پسین گردیده اما در موقعیت نقطه میانی تأثیر چندانی نخواهد داشت. افزایش SWH (که یک پارامتر ژئوفیزیکی سطح اقیانوس است) باعث فشرده شدن شکل موج از بالا و پایین خواهد شد اما تأثیری در جابجایی نقطه میانی نخواهد داشت. تغییر پارامتر اریبی سطح اقیانوسی که مشابه پارامتر SWH یک پارامتر ژئوفیزیکی است، تأثیر اندکی بر روی جابجایی نقطه



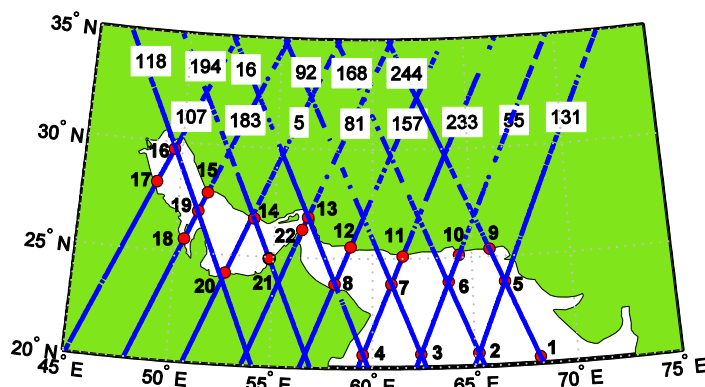
شکل ۹: اثر تغییرات اپک بر روی متوسط تاون بازگشتی در حالت نادیر ($\xi = 0^\circ$) برای $SWH = 6m$ و $\lambda_s = 0$

ماهواره و سطح اقیانوسی (بصورت توأم) چگونه شکل موج حاصل از ارتفاع سنجی راداری جیسون-۲ را تغییر خواهد داد. بهمین منظور، ۲۲ نقطه از مسیرهای سعودی (شماره‌های ۱۳۱، ۵۵، ۲۳۳، ۱۵۷، ۸۱، ۵، ۱۸۳ و ۱۰۷) و نزول‌ی (۲۴۴، ۱۶۸، ۹۲، ۱۶، ۱۹۴ و ۱۱۸) سیکل شماره ۲۰۸، مطابق شکل (۱۰) در منطقه خلیج فارس و دریای عمان در نظر گرفته شده است.

۲-۴- آنالیز حساسیت شکل موج بر اساس داده

های واقعی

در شرایط واقعی، اینگونه نیست که تنها با تغییر یکی از این پارامترها، شکل موج تغییر کند بلکه شکل موج، تابع همه پارامترهای تعریف کننده آن است. در واقع، هر شش پارامتر تشکیل دهنده شکل موج در تعیین ساختار شکل موج اثرگذار هستند. حال می-خواهیم نشان دهیم که تغییرات پارامترهای مرتبط با



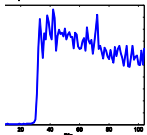
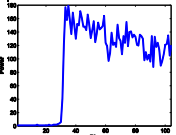
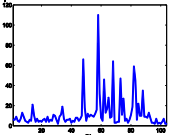
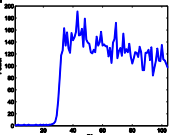
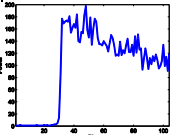
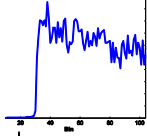
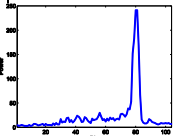
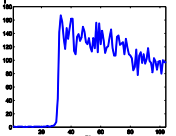
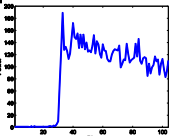
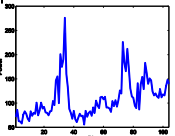
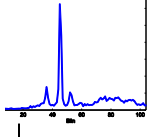
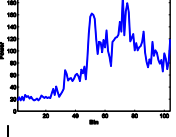
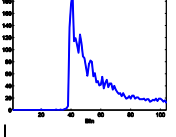
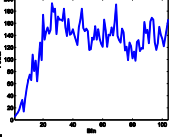
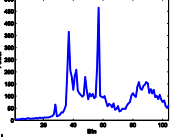
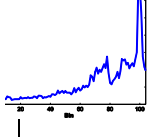
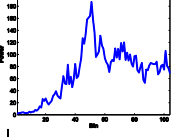
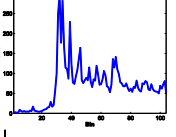
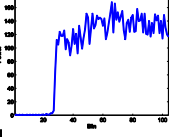
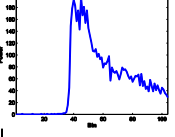
شکل ۱۰: نقاط مورد مطالعه مربوط به ماهواره جیسون-۲ در دریای عمان و خلیج فارس

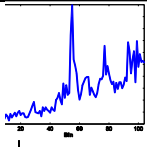
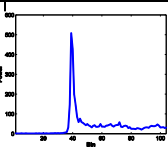
اتمسفری، تصحیحات جزرومدی، خروج از نادیر آنتن، ضریب پراکنش، سرعت باد، ارتفاع سطح متوسط دریا و ... موجود است. در این نقاط همراه با شکل موج بدست آمده از ارتفاع سنجی، پارامترهای ضریب پراکنش، خروج از نادیر آنتن و SWH در جدول (۲) نشان داده است.

داده‌های شکل موج در هر نقطه، در قالب فایل داده $SGDR^1$ در اختیار کاربران قرار می‌گیرد و بازاء هر نقطه ۲۰ داده مربوط به شکل موج خواهیم داشت. در فایل $SGDR$ علاوه بر اطلاعات مربوط به شکل موج (تاون بازگشتی)، مختصات نقاط زمینی، SWH ، فاصله سنجنده تا سطح مبنای مرجع، تصحیحات

¹ Sensor Geophysical Data record

جدول ۲: مثال هایی از شکل موج ها در نقاط مورد مطالعه همراه با پارامترهای شکل موج

شماره نقطه	۱	۵	۹	۲	۳
τ (ns)	-۳,۰۴	-۰,۰۴۰	-۴,۲۲	-۱,۰۷۱	-۲,۱۹۳
SWH (m)	۲,۷۵	۳,۸۷	۳,۸۵	۳,۰۶	۲,۸۰۴
ξ (degree)	-۰,۰۰۲۲	۰,۰۰۸۳	۰,۹۵۵۶	-۰,۰۰۶۲	-۰,۰۰۷۷
σ^0 (dB)	۱۳,۶۵	۱۳,۹	۴,۷۷	۱۲,۴۹	۱۲,۸۸
شکل موج					
شماره نقطه	۶	۱۰	۴	۷	۱۱
τ (ns)	-۳,۴۲۱	-۲,۱۹۹	-۱,۷۵۴	-۲,۵۴۶	-۳,۱۴۳
SWH (m)	۲,۷۴	۱,۹۹	۳,۱۴۲	۳,۲۰۹	۳,۲۲۳
ξ (degree)	۰,۰۲۴۹	—	-۰,۰۱۷	۰,۲۴۸	۰,۸۱۰
σ^0 (dB)	۱۳,۱۶	۱۳,۴۱	۱۲,۹۳	۱۲,۹۸	۱۳,۶۶
شکل موج					
شماره نقطه	۱۲	۸	۱۳	۲۲	۲۱
τ (ns)	-۳,۶۵۰	-۳,۲۰۶	-۲,۸۰۳	-۳,۶۱۴	-۲,۷۱۳
SWH (m)	۱,۸۱۱	۴,۲۹۱	۱,۹۹۷	۲,۳۷۹	۲,۷۵۶
ξ (degree)	۰,۶۲۲	۰,۰۹۳	—	۰,۰۵۲۴	۰,۶۲۱۹
σ^0 (dB)	۱۲,۹۸	۱۳,۱۱	۱۳,۴۱	۱۳,۱۱	—
شکل موج					
شماره نقطه	۱۴	۲۰	۱۵	۱۹	۱۸
τ (ns)	-۱,۶۸۲	-۰,۴۹۷۱	-۳,۲۱۹	-۱,۱۲۰	-۵,۳۸۴
SWH (m)	۳,۷۰۶	۲,۹۲۶	۲,۱۱۰	۴,۴۹۲	۲,۳۰۷
ξ (degree)	—	۰,۵۸۰۷	—	۰,۱۹۳	—
σ^0 (dB)	۵,۳۹	۲۴,۳۷	۱۲,۸۲	۱۳,۸۸	۱۳,۳۹
شکل موج					

شماره نقطه	۱۶	۱۷
τ (ns)	-۲,۸۹۷	-۲,۹۴۷
SWH (m)	۳,۷۳۶	۲,۳۹۳
ξ (degree)	۰,۶۶۲۹	---
σ^0 (dB)	۱۵,۲۸	۱۱,۴۶
شکل موج		

پارامتر ارتفاع سطح آب می‌بایست اضافه گردد. درحالیکه، در شکل موج شماره ۵ این تصحیح به اندازه ۶ میلیمتر است.

۵- مقادیر اولیه پارامترهای شکل موج در روش کمترین مربعات

در رابطه ریاضی (۱۲) با در اختیار داشتن سری زمانی توان بازگشتی (سمت چپ معادله)، پارامترهای موجود اعم از اقیانوسی و ماهواره را برآورد می‌کنیم. اما از آنجا که در این الگوریتم نیاز به مقادیر اولیه داریم، این مقادیر را می‌توان بر اساس آنالیز اولیه داده‌های یک مسیر از مأموریت مورد نظر (مثلاً گذر ۲۴۶ از ماهواره جیسون-۲ در سیکل شماره ۴۰) بطور تقریبی تعیین کرد. یکی از این روشها، استفاده از نمودار هیستوگرام است که نشان می‌دهد فراوانی پارامترهایی که به دنبال آن هستیم بر اساس الگوریتم موجود در سنجنده چگونه است. در اینجا می‌توان مقادیر اولیه را بر اساس ماکزیمم مقدار پارامتر در هیستوگرام اشاره شده در نظر گرفت. مسلماً چون ماهیت این پارامترها متفاوت است بنابراین تابع چگالی احتمال فیت شده با این پارامترها نیز متفاوت خواهد بود. در شکل (۱۲) ملاحظه می‌گردد که در این گذر مشخص، SWH از شکل تابع گوسین با چولگی چپ تبعیت می‌کند و بر اساس ماکزیمم فراوانی در هیستوگرام می‌توان مقادیر اولیه SWH را ۱ متر در نظر گرفت. در همین گذر، بر اساس فیت نمودن تابع به هیستوگرام داده‌های ضریب پراکنش و خروج از

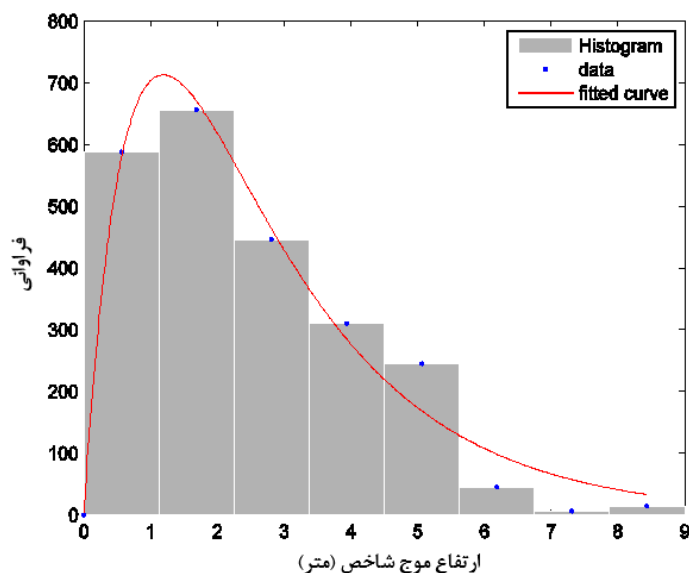
شکل موج‌های موجود در نقاط ۸ تا ۲۲ نشان می‌دهد وقتی سنجنده به ساحل نزدیک می‌شود، بر خلاف شکل موج‌های ۱ تا ۷، شکل موج از حالت براون (حالت ایده‌آل) دور می‌شود و پارامترهای تشکیل دهنده شکل موج (مطابق آنچه در شکل ۳ ملاحظه می‌کنید) دچار تغییر خواهند شد بطوریکه لبه‌های پیشین و پسین در آنها قابل تشخیص نیست.

در شکل موج‌هایی که لبه پسین به سرعت با شیب نزولی کاهش می‌یابد خروج از نادیر تعریف نشده است (مانند شکل موج‌های ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۸ و ۱۷). ضمناً برخلاف شکل موج براون، شکل موج‌های ۸، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ پارامتر خروج از نادیر عددی مثبت است. بطور کلی، شکل موج‌های جدول (۲) نشان می‌دهد در تشکیل شکل موج‌ها، تغییرات پارامترها در ساختن شکل موج نهایی اثرگذار است و اینگونه نیست که شکل موج تحت تأثیر یک یا دو پارامتر باشد.

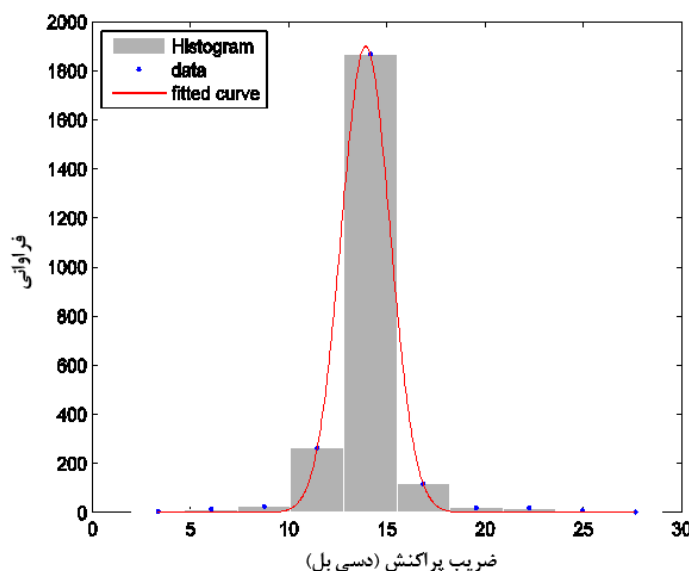
پارامتر فاصله (بین سنجنده تا سطح متوسط آب) به موقعیت نقطه میانی وابسته است. بنابراین در اینجا اثر تغییرات پارامترهای مورد بحث را بر روی تغییر پارامتر فاصله اشاره می‌کنیم. چون سایر پارامترها به غیر از پارامتر اپک تأثیری در جابجایی موقعیت نقطه میانی شکل موج ندارند بنابراین در مقاله تنها اثر پارامتر اپک را در مقدار فاصله اشاره می‌کنیم. در جدول (۲)، شکل موج شماره ۱، از مقدار فاصله به اندازه ۴۵ سانتیمتر می‌بایست کم شود بنابراین به همین اندازه به

یافت. با انجام فرایند تکرار در روش کمترین مربعات مقادیر این پارامترها را بصورت دقیقتری تخمین میزنیم.

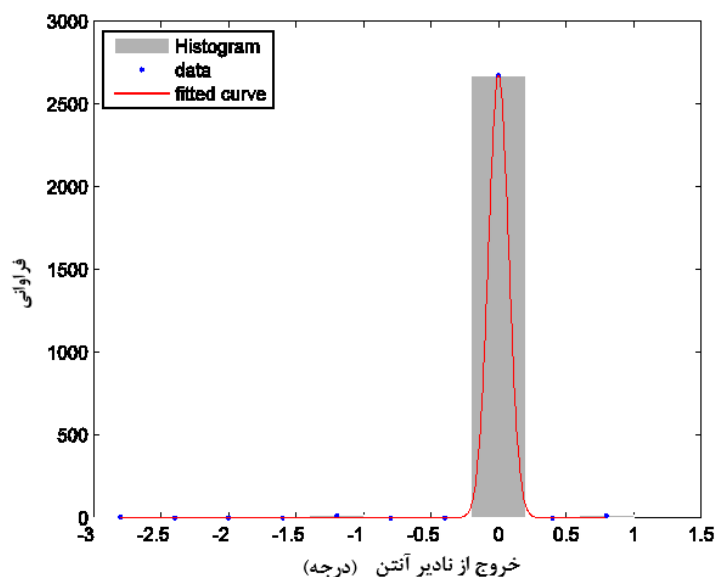
نادیر، در شکل (۱۳ و ۱۴) به ترتیب به مقادیر اولیه تقریبی ۱۵ دسی بل و صفر درجه می‌رسیم. بنابراین با در نظر گرفتن مقادیر پارامترها در یک گذر می‌توان به مقادیر تقریبی اولیه در روش کمترین مربعات دست



شکل ۱۲: هیستوگرام تغییرات SWH در مسیر شماره ۱۹۴ از سیکل شماره ۲۰۸ ماهواره جیسون-۲



شکل ۱۳: هیستوگرام تغییرات ضریب پراکنش در مسیر شماره ۱۹۴ از سیکل شماره ۲۰۸ ماهواره جیسون-۲



شکل ۱۴: هیستوگرام تغییرات خروج از نادیر در مسیر شماره ۱۹۴ از سیکل شماره ۲۰۸ ماهواره جیسون-۲

پیشین، بیشتر تغییر داده و وقتی مقدار آن را بتدریج از صفر تا یک تغییر می‌دهیم از ۰/۶ درجه به بعد، شیب لبه پسین از منفی به مثبت تغییر خواهد کرد. علاوه بر این، افزایش زاویه خروج از نادیر، باعث افزایش ماکزیمم توان شکل موج گردیده اما با این وجود تغییری در موقعیت نقطه میانی ایجاد نخواهد کرد. افزایش *SWH* باعث کاهش ماکزیمم توان شکل موج گردیده ولی در شکل کلی موج و نیز موقعیت نقطه میانی تغییری ایجاد نمی‌کند و بگونه‌ای باعث دوران شکل موج حول نقطه میانی خواهد شد. پارامتر ارببی نیز باعث شیفت خیلی جزئی در موقعیت نقطه میانی می‌گردد و این تغییر بصورت خیلی کم در شیب لبه پسین و سطح نویز حرارتی خواهد شد اما تغییر مثبت پارامتر اپک، باعث شیفت شکل موج بسمت راست و تغییر منفی آن اثر بالعکس بر روی شکل موج داشته و موقعیت نقطه میانی را تغییر خواهد داد. در واقع، این پارامتر است که بصورت محسوس در پارامتر فاصله ماهواره اثرگذار خواهد بود و ارتفاع سطح دریا تحت تأثیر این پارامتر، تغییر خواهد کرد. در حالت واقعی، با انتخاب ۲۲ نقطه بر روی گذرهای مختلف در منطقه خلیج فارس و دریای عمان از سیکل شماره ۲۰۸ ماهواره جیسون-۲

ملاحظه می‌گردد دستیابی به این پارامترها می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر تابع تحلیلی مدل براون و یا الگوریتم‌های مبتنی بر فیزیک موج صورت گیرد که روش کمترین مربعات یکی از این روشهاست که خود می‌تواند به دو صورت وزندار و غیروزندار انجام شود. در اختیار داشتن مقادیر اولیه تقریبی از این پارامترها باعث می‌شود در تکرارهای پایین به همگرایی سریعتر در محاسبه مقادیر پارامترهای مجهول دست یابیم.

۶- نتیجه گیری

پارامتر سطح نویز حرارتی و ماکزیمم توان موجود در شکل موج، براحتی از سری زمانی تولید شده در شکل موج قابل حصول است، اما پارامترهای *SWH*، اپک، خروج از نادیر آنتن و ارببی سطح مستقیماً قابل حصول نیست. بنابراین با آنالیز حساسیت شکل موج، می‌توان میزان حساسیت تغییر شکل موج را نسبت به تغییرات پارامترهای ذکر شده بررسی نمود. در این تحقیق، در حالت شبیه‌سازی شکل موج، با ثابت در نظر گرفتن سه پارامتر از چهار پارامتر، تغییر شکل موج را بر اساس تغییر پارامتر چهارم پایش نمودیم. تغییرات زاویه خروج از نادیر، شیب لبه پسین را نسبت به لبه

دسی بل است. همچنین، با تحلیل آماری (هیستوگرام) بر روی یک گذر نشان دادیم چگونه می توان مقادیر اولیه پارامترهای مورد نظر را در روش کمترین مربعات که یکی از روشهای تخمین پارامترهای شکل موج است فراهم نمود.

نشان دادیم که پارامترهای موثر در تشکیل شکل موج بصورت توأم اثرگذار بوده و در نهایت باعث تشکیل شکل موج نهایی می گردند. میانگین پارامتر ایک، SWH، خروج از نادیر و ضریب پراکنش در سیکل ۲۰۸ بر روی منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۶۰۲ - نانوثانیه، ۲/۹۸ متر، ۰/۲۸۵ و ۰/۲۸۵ درجه و ۱۳/۰۰۱

مراجع

- [1] Brown, G. S., "The Average Impulse Response of a Rough Surface and Its Applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-25, No. 1, pp. 67-74, 1977.
- [2] Hayne, G. S., "Radar Altimeter Mean Return Waveform from Near-Normal-Incidence Ocean Surface Scattering", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-28, No. 5, pp. 687-692, 1980.
- [3] Barrick, D. E., Lipa, B.J., "Analysis and Interpretation of Altimeter Sea Echo", *Advances in Geophysics*, Vol. 27, pp. 61-100, 1985.
- [4] Rodriguez, E., Chapman, B., "Extracting Ocean Surface Information from Altimeter Returns: The Deconvolution Method", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. C7, pp. 9761-9778, 1989.
- [5] Challenor, P. G., Srokosz, M. A., "The Extraction of Geophysical Parameters from Radar Altimeter Return from a Nonlinear Sea Surface", in: *Mathematics in Remote Sensing*, Brooks, S. R. (ed.), Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 254-268, 1989.
- [6] Tokmakian, R. T., Challenor, P. G., Guymer, T. H., Srokosz, M. A., "The U.K. EODC ERS-1 Altimeter Oceans Processing Scheme", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 4, pp. 939-962, 1994.
- [7] Gomez-Enri, J., Villiares, P., Gommenginger, C., Srokosz, M., Challenor, P., Alonso, J.J., Arias, M., "Retrieving the ocean wave-skewness from Envisat Ra-2 averaged waveforms", *Envisat Symposium* 2007, Switzerland, 2007.
- [8] Rodriguez, E., "Altimetry for Non-Gaussian Oceans: Height Biases and Estimation of Parameters", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. C11, Page 14107-14120, 1988.
- [9] Basu, S., Pandey, P. C., "Numerical experiment with modeled return echo of a satellite altimeter from a rough ocean surface and a simple iterative algorithm for the estimation of significant wave height", *Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, Vol. 100, No. 2, pp. 155-163, 1991.
- [10] Gomez-Enri, J., Gommenginger, C., Srokosz, M., Challenor, P., "The retracking of ocean parameters in the Mediterranean Sea and the surrounding area of the Iberian Atlantic using RA-2 Envisat data", *25th EARSel Symposium on Global Developments in Environmental Earth Observation from Space*, Porto, Portugal, PP. 713-719, 2005.
- [11] Amarouche, L., Thibaut, P., Zanife, O.Z., Dumont, J.P., Vincent, P., Steunou, N., "Improving the Jason-1 Ground retracking to Better Account for Attitude Effects", *Marine Geodesy*, 27: 171-197. doi: 10.1080/01490410490465210, 2004.
- [12] Thibaut, P., Amarouche, L., Zanife, O.Z., Steunou, N., Vincent, P., Raizonville, P., "Jason-1 Altimeter Ground Processing Look-Up Correction Tables", *Marine Geodesy*, 27: 409-431. doi: 10.1080/01490410490902133, 2004.
- [13] Gomez-Enri, J., Srokosz, M., Gommenginger, C., Challenor, P., Milagro-Perez, M., "On the Impact of

- Mispointing Error and Hamming Filtering on Altimeter Waveform Retracking and Skewness Retrieval", *Marine Geodesy*. 30: 217-233. doi: 10.1080/01490410701438166, 2007.
- [14] Gomez-Enri, J., Jimenez-Garay, R., Villares, C., Challenor, P., Arias, M., Alonso, J.J., Catalan Perez-Urquiola, M., "Measuring ocean wave-skewness in the Austral Ocean from Radar Altimetry", *New development and challenges in Remote Sensing*, Rotterdam. ISBN: 978-90-5966-053-3, 2007.
- [15] Thibaut, P., Poisson, J.C., Bronner, E., Picot, N., "Relative Performance of the MLE3 and MLE4 Retracking Algorithm on Jason-2 Altimeter Waveforms", *Marine Geodesy*. 33: 317-335. doi: 10.1080/01490419.2010.491033, 2010.
- [16] Meloni, M., Vingione, G., Ferrazzoli, P., Parrinello, T., "Recent Development in Radar Altimetry over Land and Their Application to the Cryosat-2 Mission", *IEEE Aerospace and electronic systems magazine*. doi: 10.1109/MAES.2015.140221, 2015.
- [17] Chelton D.E., Ries J.C., Haines B.J., Fu L-L., Callahan P.S., "Satellite altimetry". In: Fu L-L., Cazenave A., editors Chapter 1 of 'Satellite Altimetry and Earth Sciences' Academic Press; 2001.
- [18] Robinson, I., "The methods of satellite oceanography". Springer Praxis, Books Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [19] Chelton., D. B. "Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6(3):407_438, 1989.
- [20] Halimi, A., "From conventional to delay/Doppler altimetry", *Ph.D, thesis Toulouse university*, 2013.
- [21] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, "Microwave Remote Sensing Active and Passive", Volume II Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1982.
- [22] Marth, P. C., Jensen, J. R., Kilgus, C. C., Perschy, J. A., MacArthur, J. L., Hancock, D. W., Hayne, G. S., Purdy, C. L., Rossi, L. C. and Koblinsky, C. J., "Prelaunch Performance of the NASA Altimeter for the TOPEX/POSEIDON Project", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No. 2, pp. 315-332, 1993.
- [23] Khaki, M., Forootan, E., Sharifi, M. and Safari, A., "Using new approach 'extr method 'to retrack satellite radar altimetry", case study: Persian Gulf, *Journal of Earth and Space Physics*, 2015.
- [24] Dumont, J.-P., "Estimation optimale des paramètres altimétriques des signaux radar Poseidon". Ph.D thesis, *Institute National Polytechnique de Toulouse, France*, 1985.
- [25] Rodriguez, E., "Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters". *J. Geophys. Res.* 93:14107-14120, 1988.
- [26] Thibaut, P., "Relative Performance of the MLE3 and MLE4 Retracking Algorithms on Jason-2 Altimeter Waveforms". *Marine Geodesy*, 33(S1):317-335, doi: 10.1080/01490419.2010.491033, 2010.



Sensitivity Analysis of Brown Model Waveform in Radar Altimetry

Reza Arabsahebi^{1*}, Behzad voosoghi², Mohammad-Javad Tourian³

1- PhD student of faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

2- Associate Professor of faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

3- Research Associate, University of Stuttgart, Institute of Geodesy

Abstract

In satellite altimetry (radar altimetry), the altimeter send radar pulses, with known power, to the earth surface and receives then back continuously to determine - the sea surface height. The recorded time series of the mean returned power is called waveform. Analytical model for the waveform that was first introduced by Brown, is affected by the following six parameters: significant wave height, epoch, skewness of surface, off-nadir angle, thermal noise and backscatter coefficient. The midpoint of the waveform has the main role in determining the distance between sensor and water surface (range). So, assessing sensitivity of the model to these parameters plays an important role in determining reliability of the range parameter. In this study, the returned waveform sensitivity analysis to the mentioned parameters is done for simulated waveform of JASON-2 radar altimetry mission. Then, in order to demonstrate the effect of the parameters in observed JASON-2 data, 22 points are chosen over Persian Gulf and Oman Sea from cycle 208 and the sensitivity analysis is performed using these points. Our results indicate that the mid-point of the waveform shape is less affected by significant wave height, skewness of surface and off-nadir angle but the epoch of half height affects mid-point position significantly, which results in inaccurate range calculation. As the process of determining the waveform components is a repetitive process, we discuss how the choice of initial values of the parameters are estimated in the least squares methods.

Key words: Radar altimetry, sensitivity analysis, waveform, Brown model, least square method.