نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هشتم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۹

Vol.8, No.2, Summer 2020

۳۸- ۲۱

مقاله پژوهشی

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری

آنالیز حساسیت شکل موج مدل براون در ارتفاع‌سنجی راداری

رضا عرب صاحبی[۱*]، بهزاد وثوقی[۲]، محمدجواد طوریان[۳]

۱- دانشجوی دکتری گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳- دانشیار پژوهشی انستیتو ژئودزی دانشگاه اشتوتگارت

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

چکیده

در ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای (ارتفاع‌سنجی 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 شکل‌موج، 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 دقیق‌تر فاصله سنجنده تا سطح آب نقش مهمی را ایفا کند. در این تحقیق، آنالیز حساسیت شکل موج بازگشتی برای شکل موج شبیه‌سازی شده مأموریت ارتفاع‌سنجی 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 : ارتفاع‌سنجی راداری، آنالیز حساسیت، شکل‌موج، 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]

[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

۱- مقدمه

شکل موج حاصل از ارتفاع‌سنجی 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] می‌گویند. تعیین دقیق این نقطه به منزله تعیین دقیق ارتفاع سنجنده تا سطح آب و به دنبال آن تعیین دقیق‌تر ارتفاع آب خواهد بود. اما چون ردپای ماهواره[۲] در حین دوران بدور زمین از محیط‌های آبی مختلف نظیر مناطق عمیق، کم‌عمق و ساحلی عبور می‌کند، موقعیت نقطه ردیابی نسبت به جایگاه ایده‌آل آن (مشابه آنچه در محیط اقیانوسی رخ می‌دهد)، تغییر خواهد کرد و شکل‌موج 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 می‌زنیم، بازتعقیب شکل موج[۳] می‌گویند و یکی از الگوریتم‌های مشهور که جهت تخمین نقطه ردیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد، الگوریتم تخمین بیشینه درستنمایی[۴] (*MLE*) است که می‌تواند 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 می‌بایست 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 پارامتره[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 پارامتره[۶] (*MLE4*) می‌گویند [۷]. اولین مطالعات مربوط به بررسی اثر تغییرات پارامترها در شکل موج توسط رودریگز انجام شد. او اثرات غیرگوسی را بر روی تخمین پارامترهای ارتفاع‌سنجی بررسی کرد و نشان داد بمنظور دستیابی به ارتفاع سنجنده، می‌بایست 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 می‌باشد [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 بروی شکل موج بررسی گردید [۹]. انری و دیگران روشی را جهت بهبود ارتفاع موثر موج و فاصله سنجنده اِن‌وی‌ست 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 می‌گیرد) برای این منظور در نظر

[1] *Tracking-point*
[2] *Footprint*
[3] *Retracking waveform*
[4] *Maximum Likelihood Estimation*
[5] *Maximum Likelihood Estimation 3*
[6] *Maximum Likelihood Estimation 4*
[7] *Point Target response (PTR)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

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 اِن‌وی‌ست و روش بیشینه درستنمایی خطی ۶/۹ سانتیمتر بدست آمد؛ در حالیکه انحراف معیار این اختلاف با روش بیشینه درستنمایی غیرخطی حدود ۵/۵ سانتیمتر شد که نشان می داد 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[1]) 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 ۰/۳درجه 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 ازپارامترهای اقیانوسی ارائه دهد [۱۱]. تیبو و دیگران بمنظور تصحیح پارامترهای برآورد شده حاصل از الگوریتم‌های ردیابی موجود در سنجنده و ایستگاه زمینی، از جدول مراجعه[2] 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 نسبت به اثر خروج از نادیر با استفاده از تابع پلی‌نومیال 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]. اِنری 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 اِن‌وی‌ست 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 امادلایل منفی شدن پارامتر اریبی موج استفاده از این فیلتر نبود بلکه پارامتر خروج از نادیر پارامتر تأثیر گذار بر اریبی موج قلمداد شد [۱۳]. اِنری 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 اِن‌وی‌ست 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 ۳-۲ سانتیمتر در فاصله‌سنجی ایجاد می‌کند. [۱۴]. تیبو 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

[1] *Star tracker*
[2] *Look-up table*

[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]

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[1] 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 شکل‌موج حاصل از مأموریت جیسون-۲، حساسیت شکل‌موج 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 *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

ارتفاع‌سنج 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

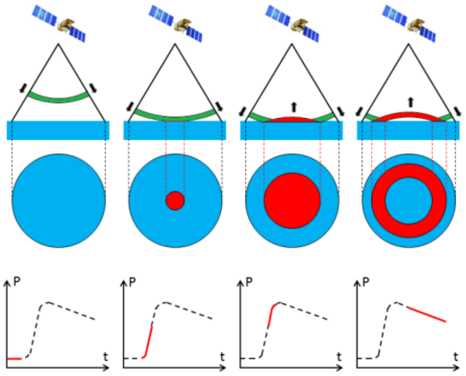
$$SSH = H - h_c = H - \left(h + h_{atm} + h_{SSB}\right) \qquad \text{(۱)رابطه}$$

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 شکل‌موج 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[2] میشناسیم.

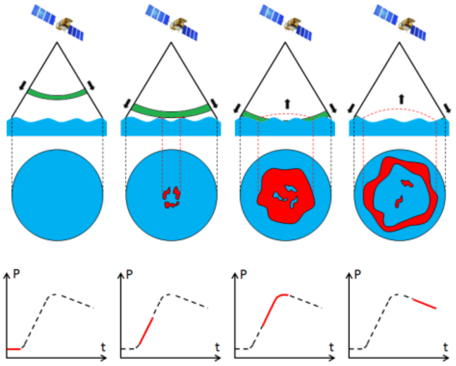
[1] *SIRAL (SAR Interferometer Radar Altimeter)*

[2] *Thermal Noise*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]



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]

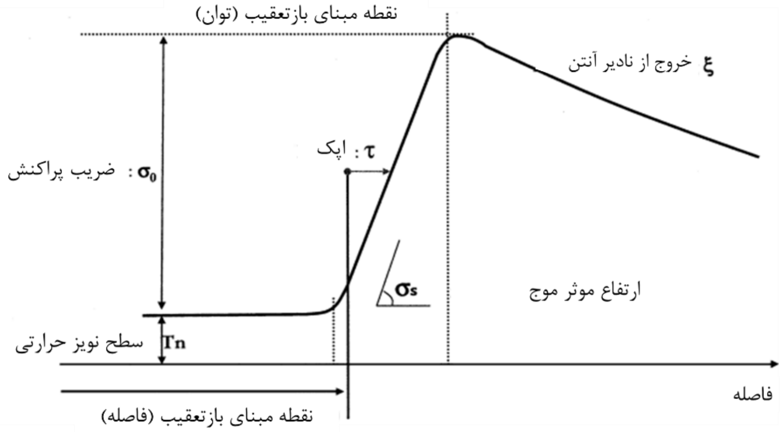
به محض اینکه پالس به سطح مشاهداتی (اقیانوس) می‌رسد مرحله دوم تولید سیگنال اتفاق می‌افتد که نشان دهنده خیزش سیگنال است. این مرحله با دوایری با شعاع‌های در حال افزایش نشان داده شده که شعاع این دوایر متناسب با توان دریافتی در ارتفاع‌سنج است [۱۹]. تا مادامی که پالس به درون سطح مشاهداتی (اقیانوس) نفوذ می‌کند، 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 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، P دامنه پالس دریافتی در ارتفاع‌سنج است که با سرعت باد مرتبط است، SWH[۳] ارتفاع موثر موج است که با σ_s مرتبط است، ξ 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 پنجره‌هایی است (τ_0) که با رزولوشن زمانی (T_s) با فرمول $\tau = \tau_0 \mathbf{T}_s$ رابطه دارد.

[1] *Leading Edge*

[2] *Trailing Edge*
[3] *Significant Wave Height*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]



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 منعکس‌کننده 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].

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

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 محدودۀ 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] (σ^0)، بعنوان سطح واقعی شکل می‌گیرد. چون با سطح تارگتی مواجهیم که در حال افزایش است، $P_{fs}(t)$ را میتوان از انتگرال روی محدودۀ ردپای ماهواره طبق رابطه (۳) بدست آورد.

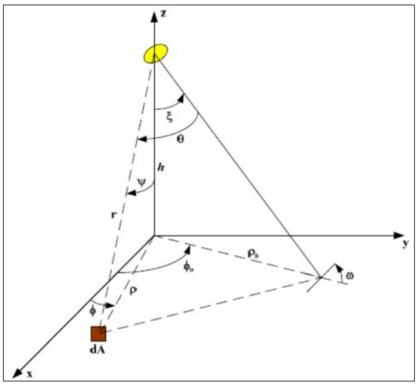
در رابطۀ (۳)، λ طول موج رادار، L_p میرایی انتشار دوطرفه[2]، $\delta(t-2r/c)$ تابع دلتای ارسالی متناسب با تأخیر در زمان[3]، $G(\theta,\omega)$ بهرۀ رادار آنتن و r فاصلۀ رادار تا المان مساحت پراکنش روی سطح است.

شکل (۴) هندسۀ 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*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

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



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

صفحه xy مرتبط با سطح صاف و محور z با خط رادار آنتن تا نقطه نادیر روی سطح مرتبط است. محور خط دید رادار[1] 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 صفحهٔ xy قرار دارد. توجه داشته باشید که بهره آنتن با زوایایی بیان میشود که نسبت به خط دید رادار اندازه‌گیری شده‌اند (θ,ω)، 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 هندسهٔ 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 محدودهٔ ردپای ماهواره روی سطح زمین طبق رابطه(۴) نشان داد. در رابطهٔ (۴) عبارت $U(\tau)$ تابع پله‌ای، $I_0(\beta\tau^{1/2})$ تابع بسل تعمیم‌یافته، A دامنه که همان ترم مقیاسی است که شامل زاویه خروج از نادیر ξ و چند مقدار ثابت دیگر نظیر طول موج رادار، بازتاب‌پذیری اقیانوس و بهرهٔ آنتن رادار می‌باشد[۱]. در رابطهٔ (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 رابطهٔ (۷)، θ، پهنای اشعه آنتن است.

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

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

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

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

۳-۲- تابع چگالی احتمال ارتفاع نقاط آئینه‌ای

الگوی آشکارسازی لحظه‌ای ارتفاع‌سنج، به ارتفاع موج در لحظهٔ τ در محدودهٔ 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

[1] Radar bore-sight axis

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

تا پایین‌ترین ارتفاع یک سوم مرتفع‌ترین موج‌ها تعریف می‌گردد. برای بیان ویژگی‌های آماری ارتفاعات خطی رابطه(۸)

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

۳-۳- پاسخ تارگت نقطه‌ای سیستم راداری

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

سطح، از توزیع چگالی احتمال گوسین نقاط آیینه‌ای استفاده می‌کنیم [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، P_{PTR} بسط متقارن پاسخ ضربه حول $t=0$ است. چون پهنای PTR پالس کوتاه ارتفاع‌سنج راداری از دستهٔ ۲۰ نانوثانیه است. رابطهٔ (۹) را برحسب 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)، ۰/۴۲۵ تقریبی از پالس فشرده می باشد که با استفاده از تابع گوسین بدست می‌آید [۲۲].

رابطه(۹)

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

رابطه(۱۰)

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

رابطه(۱۱)

$$\sigma_p = 0.425T$$

۳-۴- شکل موج بازگشتی براون

براون با استفاده از روابط (۴)، (۸)، و (۱۰) نشان داد که کانولشن (۲) با فرض پارامتر اریبی سطح برابر صفر بصورت رابطه (۱۲) خلاصه می‌شود که در آن $erf(x)$ تابع خطا و σ زمان اوج ترکیبی است که بصورت رابطه (۱۳) می‌باشد.

رابطهٔ (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

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 می‌باشد. شکل (۵) نتیجه کانولشن این سه ترم را نشان می‌دهد.

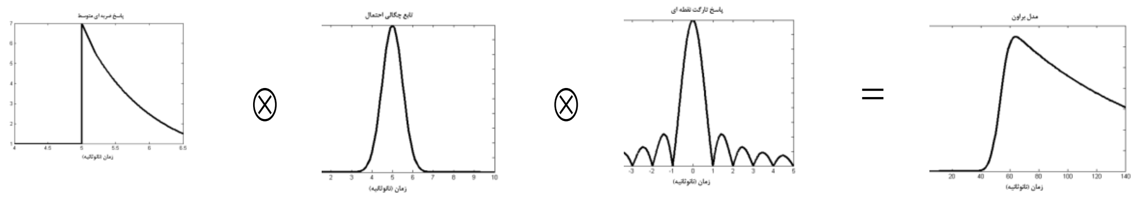
رابطه(۱۲)

$$P(\mathrm{t}) \approx P_{fs}(t)\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P_{PTR}(t-\tau)q_s\left(\frac{c}{2}(\tau-\hat{\tau})\right)d\tau d\hat{\tau}$$
$$\approx \eta_P P_T P_{fs}(t)\sigma_P \frac{1}{2}\left[erf\left(\frac{t}{\sqrt{2}\sigma}\right)+1\right]$$

رابطه(۱۳)

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]



شکل ۵: نحوه شکل‌گیری مدل براون

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

۴- آنالیز حساسیت شکل موج

در تمام مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی، از طریق الگوریتم‌های بازتعقیب که یک مدل تحلیلی به شکل-موج حاصل از اندازه گیری برازش 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 طبقه-بندی 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 فرایند پردازش زمینی مأموریت‌های ارتفاع‌سنجی نظیر توپکس، جیسون-۱، جیسون-۲ و اِن‌وی‌ست 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 از اینکه 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 اریبی سطح اقیانوس هم در نظر گرفته میشود و نیاز است بعنوان پارامتر مجهول برآورد شود.

۴-۱- آنالیز حساسیت شکل موج بر اساس مدل شبیه سازی شده

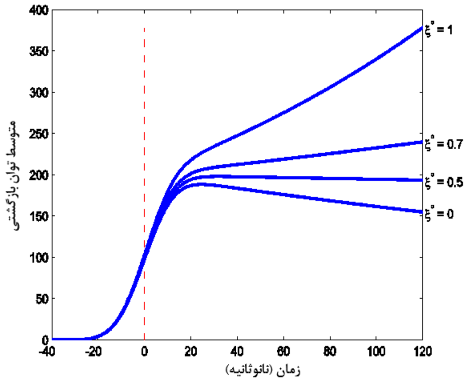
بمنظور برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی اقیانوس (اریبی و *SWH*) و پارامتر ماهواره (خروج از نادیر آنتن) با استفاده از شبیه‌سازی، اثر این پارامترها بر روی شکل‌موج بدست آمده در سنجنده را نشان می‌دهیم.

جدول۱: 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

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 توان موج استفاده می‌کنیم. آن تعداد پارامتر که در 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 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 سنجنده 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 نویز 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 ۰٫۶ درجه تغییر خواهد کرد.



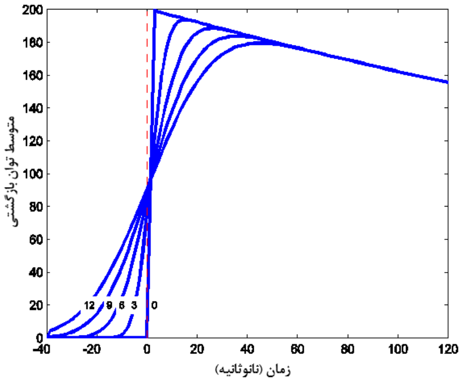
شکل ۶: اثر تغییرات زاویه خروج از نادیر بر روی متوسط توان بازگشتی در حالت $\lambda_s = 0$، $t_0 = 0$ و $SWH = 6m$

در حالت دوم، با ثابت در نظرگرفتن 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 شکل‌موج، قبل و بعد از نقطه میانی می‌شود. *SWH* برابر صفر، سطح نویز حرارتی را در حد صفر نگه می‌دارد در حالیکه افزایش ارتفاع موج باعث افزایش سطح نویز 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 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.

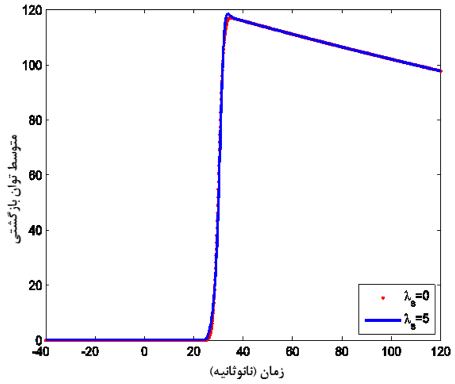
بر خلاف دو پارامتر قبلی، تغییرات اریبی سطح اقیانوس تأثیر قابل ملاحظه‌ای در شکل کلی موج نداشته و تغییر این پارامتر از صفر به ۵، در ابتدا و انتهای لبه پیشین اثر بیشتری نسبت به نقطه میانی داشته اما باعث شیفت خیلی جزئی در راستای افقی می‌شود و باعث خطایی در یافتن ارتفاع سطح متوسط

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

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



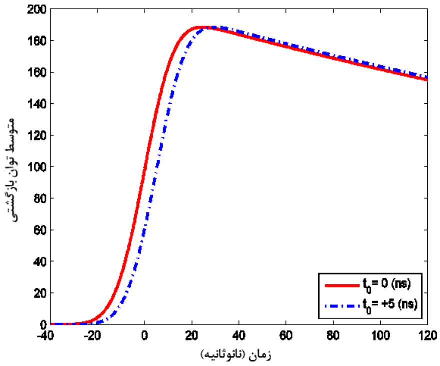
شکل ۷: اثر تغییرات SWH **(بر حسب متر) بر روی متوسط توان بازگشتی در حالت نادیر (** $\xi = 0^{\circ}$ **) بازای** $t_0 = 0$ **و** $\lambda_s = 0$



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

تاکنون ملاحظه شد با ثابت در نظر گرفتن ۳ پارامتر از ۴ پارامترِ 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 میانی خواهد داشت. حال، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای خروج از نادیر، SWH و اریبی سطح اقیانوس، چنانچه پارامتر اپک از صفر به ۵+ 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 ۵- 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.

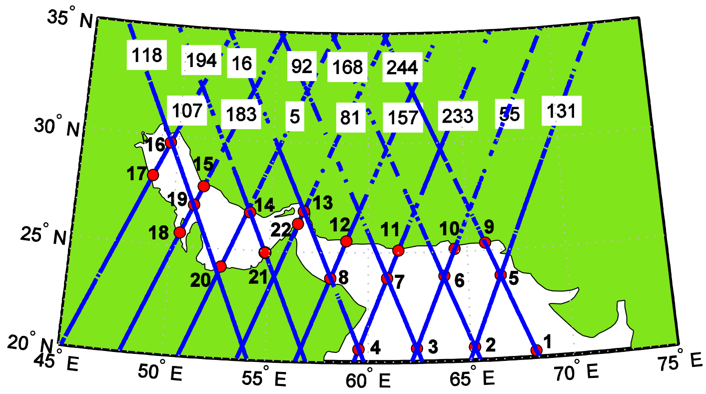
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]



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

۴-۲- 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 ماهواره و سطح اقیانوسی (بصورت توأم) چگونه شکل موج حاصل از ارتفاع‌سنجی راداری جیسون-۲ را تغییر خواهد داد. بهمین منظور، ۲۲ نقطه از مسیرهای صعودی (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 خلیج‌فارس و دریای عمان در نظر گرفته شده است.



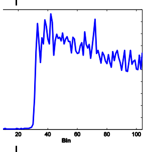
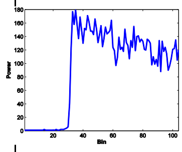
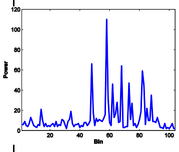
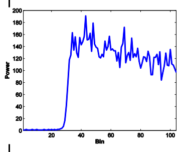
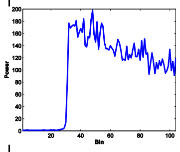
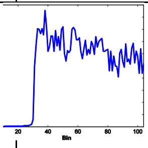
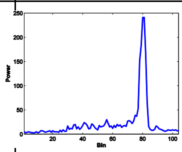
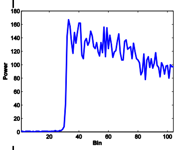
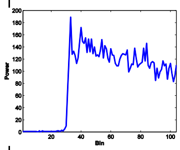
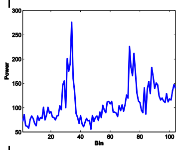
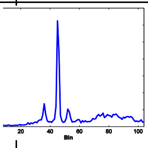
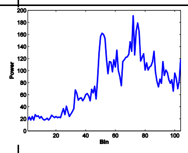
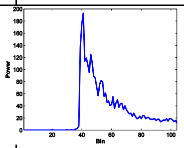
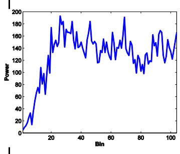
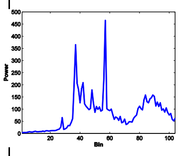
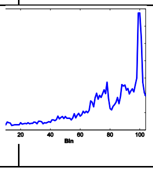
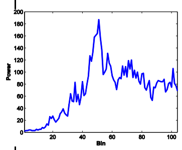
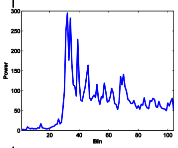
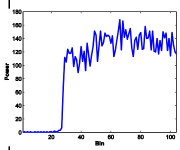
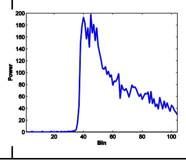
شکل ۱۰: نقاط مورد مطالعه مربوط به ماهواره جیسون-۲ در دریای عمان و خلیج‌فارس

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 (توان بازگشتی)، مختصات نقاط زمینی، SWH ، فاصله سنجنده تا سطح مبنای مرجع، تصحیحات اتمسفری، تصحیحات جزرومدی، خروج از نادیر آنتن، ضریب پراکنش، سرعت باد، ارتفاع سطح متوسط دریا و ... موجود است. در این نقاط همراه با شکل‌موج بدست آمده از ارتفاع‌سنجی، پارامترهای ضریب پراکنش، خروج از نادیر آنتن و SWH در جدول (۲) نشان داده است.

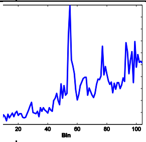
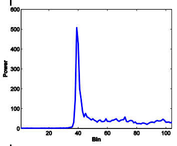
[1] *Sensor Geophysical Data record*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

جدول ۲: مثال هایی از شکل موج‌ها در نقاط مورد مطالعه همراه با پارامترهای شکل‌موج

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					

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

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		

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 شکل‌موجهایی که لبه پسین به سرعت با شیب نزولی کاهش می‌یابد خروج از نادیر تعریف نشده است (مانند شکل‌موجهای 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، شکل‌موجهای جدول (۲) نشان میدهد در تشکیل شکل‌موجها، تغییرات پارامترها در ساختن شکل موج نهایی اثرگذار است و اینگونه نیست که شکل موج تحت تأثیر یک یا دو پارامتر باشد.

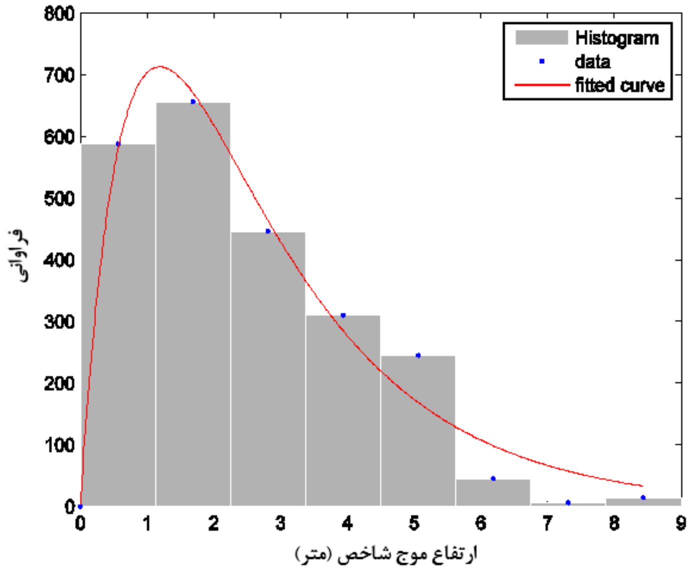
پارامتر فاصله (بین سنجنده تا سطح متوسط آب) به موقعیت نقطه میانی وابسته است. بنابراین در اینجا اثر تغییرات پارامترهای مورد بحث را بر روی تغییر پارامتر فاصله اشاره می‌کنیم. چون سایر پارامترها به غیر از پارامتر اپک تأثیری در جابجایی موقعیت نقطه میانی شکل‌موج ندارند بنابراین در مقاله تنها اثر پارامتر اپک را در مقدار فاصله اشاره می‌کنیم. در جدول (۲)، شکل‌موج شماره ۱، از مقدار فاصله به اندازه ۴۵ سانتیمتر می‌بایست کم شود بنابراین به همین اندازه به پارامتر ارتفاع سطح آب می‌بایست اضافه گردد. درحالیکه، در شکل‌موج شماره ۵ این تصحیح به اندازه ۶ میلیمتر است.

۵- مقادیر اولیه پارامترهای شکل موج در روش کمترین مربعات

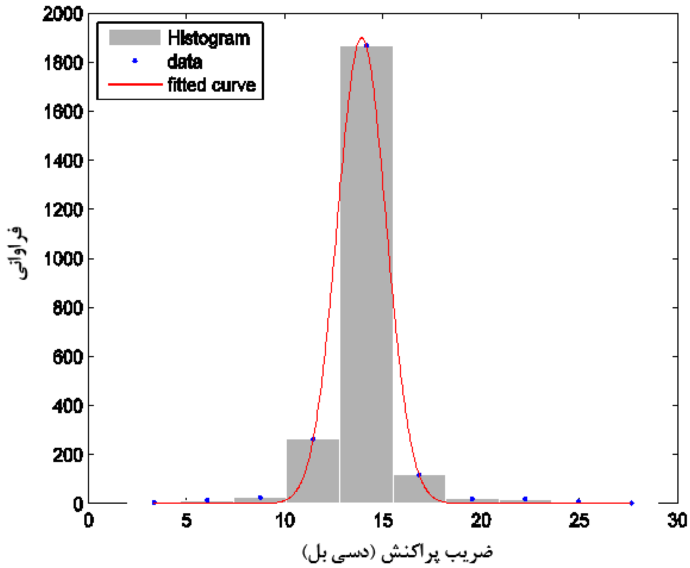
در رابطه ریاضی (۱۲) با در اختیار داشتن سری زمانی توان بازگشتی (سمت چپ معادله)، پارامترهای موجود اعم از اقیانوسی و ماهواره را برآورد می‌کنیم. اما از آنجا که در این الگوریتم نیاز به مقادیر اولیه داریم، این مقادیر را می‌توان بر اساس آنالیز اولیه داده‌های یک مسیر از مأموریت مورد نظر (مثلاً گذر ۲۴۶ از ماهواره 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

نادیر، در شکل (۱۳ و ۱۴) به ترتیب به مقادیر اولیه تقریبی ۱۵ دسی‌بل و صفر درجه می‌رسیم. بنابراین با در نظر گرفتن مقادیر پارامترها دریک گذر می‌توان به مقادیر تقریبی اولیه در روش کمترین مربعات دست یافت. با انجام فرایند تکرار در روش کمترین مربعات مقادیر این پارامترها را بصورت دقیقتری تخمین میزنیم.

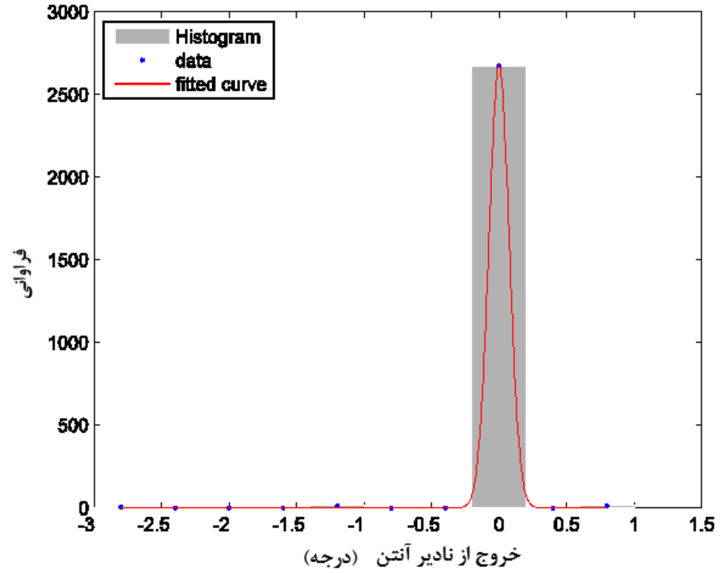


شکل ۱۲: هیستوگرام تغییرات SWH در مسیر شماره ۱۹۴ از سیکل شماره ۲۰۸ ماهواره جیسون-۲



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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]



شکل ۱۴: هیستوگرام تغییرات خروج از نادیر در مسیر شماره ۱۹۴ 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 اریبی 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 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 اریبی 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

نشان دادیم که پارامترهای موثر در تشکیل شکل موج بصورت توأم اثرگذار بوده و در نهایت باعث تشکیل شکل موج نهایی می‌گردند. میانگین پارامتر اپک، 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 ۰,۲۸۵ درجه و ۱۳٫۰۰۱ دسی‌بل است. همچنین، با تحلیل آماری (هیستوگرام) بر روی یک گذر نشان دادیم چگونه می‌توان مقادیر اولیه پارامترهای مورد نظر را در روش کمترین مربعات که یکی از روشهای تخمین پارامترهای شکل موج است فراهم نمود.

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 rretracking 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]

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 optimal des paramétrs 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.

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.8 No.2, Summer 2020

Research Paper

Sensitivity Analysis of Brown Model Waveform in Radar Altimetry

Reza Arabsahebi[1]*, Behzad voosoghi[2], Mohammad-Javad Tourian [3]

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 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.*

Correspondence Address: No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
Tel : +98 21 88786212.
Email : r.arabsahebi@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-12-07]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.2.2.4]
[DOI: 10.29252/jgit.8.2.21]