

УДК 537.877+532.5.013

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОПИСАНИИ ФОРМЫ ОТРАЖЕННОГО ИМПУЛЬСА РАДИОАЛЬТИМЕТРА

И. П. Шумейко, М. И. Ожиганова

Севастопольский государственный университет,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2018 г.

Аннотация. Анализируются ошибки определения уровня морской поверхности по данным вертикального радиозондирования с космических аппаратов. Рассматриваются ошибки, вызванные погрешностью аппроксимации функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности усеченным распределением Грама-Шарлье. Для численных расчетов используются данные измерений кумулянтов морской поверхности до шестого порядка включительно, полученные в морских условиях. Также используются оценки кумулянтов седьмого и восьмого порядков, определенные в лабораторных условиях. Показано, что в зависимости от выбора аппроксимации функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности расчетное положение переднего фронта отраженного импульса может смещаться на 0.3 нс. Такое смещение приводит к разбросу в определении уровня морской поверхности, равному 4.5 см.

Ключевые слова: морская поверхность, распределение Грама-Шарлье, радиоальтиметр, зеркальное отражение, модель отраженного импульса.

Abstract. Errors in determining the level of the sea surface by retracking altimeter waveforms from spacecraft are analyzed. Errors that are caused by the error in the approximation of the probability density function of sea surface elevations by a truncated Gram-Charlier distribution are considered. Estimates of sea surface cumulants up to the sixth order inclusive obtained in sea conditions are used for the numerical calculations. We also use seventh and eighth order cumulants surface waves, certain in laboratory conditions. The calculations were carried out within the

framework of the well known Brown model which describes the shape of the reflected pulse of the altimeter. It is shown that, depending on the choice of the approximation of the probability density function, the calculated position of the leading edge of the reflected pulse can shift. Simultaneously with the displacement of the leading edge its inclination is changed. The magnitude of the time shift can reach 0.3 ns, if significant wave height is 5 m. Such a time shift is equivalent to an error in determining the level of the sea surface which is equal to 4.5 cm. If the significant height increases, the sea level error increases linearly. Numerical calculations were performed for parameters which correspond to parameters of the altimeter located on the satellite Seasat-1.

Key words: sea surface, Gram-Charlier distribution, radar altimeter, mirror reflection, return waveform model.

Введение

В настоящее время установленные на космических аппаратах радиолокаторы, зондирующие в надир морскую поверхность, позволяют определять широкий круг ее параметров. Основными параметрами, которые определяются при вертикальном зондировании, являются: уровень морской поверхности, скорость приводного ветра, значимая высота [1-4]. Расчет указанных параметров осуществляется по характеристикам переднего фронта сжатого импульса радиоальтиметра, отраженного от морской поверхности [5, 6].

Модель, описывающая форму сжатого импульса радиоальтиметра, была предложена в работе [7] и известна как модель Брауна. Первоначально модель была построена для поверхности, волновые возвышения которой описываются распределением Гаусса. Свое развитие она получила в работе [8], где область ее применения была распространена на квазигауссову поверхность, каковой является морская поверхность.

Согласно модели Брауна форму радиоимпульса, отраженного от взволнованной морской поверхности, можно представить в виде свертки трех функций

$$V(t) = F_r(t) * s_r(t) * q_s(t), \quad (1)$$

где функции $F_r(t)$ и $s_r(t)$ определяются характеристиками радара, установленного на космическом аппарате; функция $q_s(t)$ определяется плотностью вероятностей точек зеркального отражения, которые предполагаются равномерно распределенными вдоль профиля волны; * – символ свертки. Предполагается, что функция $q_s(t)$ однозначно определяется функцией плотности вероятностей возвышений морской поверхности. Зависимость функции $V(t)$ от распределения возвышений морской поверхности позволяет решать обратную задачу, т.е. восстанавливать характеристики волнового поля по данным радиоальтиметрических измерений [9, 10], а также по изменениям шероховатости измерять скорость приводного ветра [11]. В то же время, эта зависимость, в силу значительной изменчивости состояния морской поверхности, является источником ошибок восстановления уровня поверхности [12, 13].

В настоящей работе анализируется влияние выбора распределения возвышений морской поверхности на моделируемую форму сжатого импульса радиоальтиметра.

Распределение возвышений морской поверхности

Морское волнение является квазигaussian процессом [14-16]. Для его описания обычно применяют распределения, построенные на основе рядов Грама-Шарлье [17]. Как правило, используется Эджвортова форма типа А рядов Грама-Шарлье. В общем виде распределение Грама-Шарлье можно представить в форме, где коэффициенты ряда выражены через статистические моменты μ_n случайной величины η или её кумулянты λ_n [18]. Если среднее значение случайной величины η равно нулю, то первые восемь кумулянтов её распределения описываются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= 0 \\ \lambda_2 &= \mu_2 \\ \lambda_3 &= \mu_3 \\ \lambda_4 &= \mu_4 - 3\mu_2^2 \\ \lambda_5 &= \mu_5 - 10\mu_3\mu_2 \\ \lambda_6 &= \mu_6 - 15\mu_4\mu_2 - 10\mu_3^2 + 30\mu_2^3 \\ \lambda_7 &= \mu_7 - 21\mu_5\mu_2 - 35\mu_4\mu_3 + 210\mu_3\mu_2^2 \\ \lambda_8 &= \mu_8 - 28\mu_6\mu_2 - 56\mu_5\mu_3 - 35\mu_4^2 + \\ &+ 420\mu_4\mu_2^2 + 560\mu_3^2\mu_2 - 630\mu_2^4 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $\mu_n = \int_{-\infty}^{\infty} \eta^n P(\eta) d\eta$ – статистический момент порядка n . Здесь P – плотность вероятностей. Для кумулянтов старше второго порядка введем нормировку $\tilde{\lambda}_n = \lambda_n / \lambda_2^{n/2}$, тогда распределение возвышений морской поверхности можно представить в виде [18]

$$\begin{aligned} P_{G-C}(\eta) &= \frac{\exp\left(-\frac{\eta^2}{2\lambda_2}\right)}{\sqrt{2\pi\lambda_2}} \left[1 + \frac{\tilde{\lambda}_3}{6} H_3\left(\frac{\eta}{\sqrt{\lambda_2}}\right) + \frac{\tilde{\lambda}_4}{24} H_4\left(\frac{\eta}{\sqrt{\lambda_2}}\right) + \frac{\tilde{\lambda}_5}{120} H_5\left(\frac{\eta}{\sqrt{\lambda_2}}\right) + \right. \\ &+ \frac{\tilde{\lambda}_6 + 10\tilde{\lambda}_3^2}{720} H_6\left(\frac{\eta}{\sqrt{\lambda_2}}\right) + \frac{\tilde{\lambda}_7 + 35\tilde{\lambda}_4\tilde{\lambda}_3}{5040} H_7\left(\frac{\eta}{\sqrt{\lambda_2}}\right) + \\ &\left. + \frac{\tilde{\lambda}_8 + 56\tilde{\lambda}_5\tilde{\lambda}_3 + 35\tilde{\lambda}_4^2}{40320} H_8\left(\frac{\eta}{\sqrt{\lambda_2}}\right) + \dots \right]. \quad (3) \end{aligned}$$

где H_n – обладающие свойством ортогональности полиномы Эрмита порядка n . Здесь λ_2 – дисперсия, $\tilde{\lambda}_3$ и $\tilde{\lambda}_4$ – асимметрия и эксцесс распределения. Первые восемь ортогональных полиномов описываются выражениями:

$$\left. \begin{aligned}
 H_0 &= 1 \\
 H_1 &= x \\
 H_2 &= x^2 - 1 \\
 H_3 &= x^3 - 3x \\
 H_4 &= x^4 - 6x^2 + 3 \\
 H_5 &= x^5 - 10x^3 + 15x \\
 H_6 &= x^6 - 15x^4 + 45x^2 - 15 \\
 H_7 &= x^7 - 21x^5 + 105x^3 - 105x \\
 H_8 &= x^8 - 28x^6 + 210x^4 - 420x^2 + 105
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Численное моделирование распределения возвышений морской поверхности

Проблема моделирования распределения возвышений морской поверхности заключается в том, что в морских условия редко определяются кумулянты старше четвертого порядка. Определению кумулянтов $\tilde{\lambda}_3$ и $\tilde{\lambda}_4$ посвящено достаточно большое количество работ. Пределы их изменения, полученные в разных экспериментах близки. При дальнейших расчетах будем использовать оценки кумулянтов $\tilde{\lambda}_3$ и $\tilde{\lambda}_4$, полученные в работе [19], значения кумулянтов $\tilde{\lambda}_5$ и $\tilde{\lambda}_6$ взяты из работы [20]. Поскольку кумулянты $\tilde{\lambda}_7$ и $\tilde{\lambda}_8$ в морских условиях не определялись, будем использовать результаты, полученные в экспериментах, проводившихся в лотках [21]. Области значений, внутри которых в основном лежат оценки кумулянтов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Старшие кумулянты возвышений морской поверхности

Параметр	$\tilde{\lambda}_3$	$\tilde{\lambda}_4$	$\tilde{\lambda}_5$	$\tilde{\lambda}_6$	$\tilde{\lambda}_7$	$\tilde{\lambda}_8$
Значение	0 – 0.4	-0.4 – 0.4	-1 – 2	-2 – 3	5 – 20	5 – 80

Отсутствие данных о старших статистических моментах морской поверхности приводит к тому, что при построении аппроксимаций функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности используется

следующее приближение. Кумулянты $\lambda_n = 0$, если $n > n_i$, а также коэффициенты в выражении (3) при полиномах H_n равны нулю, если $n > n_i$. Наиболее распространенными являются два приближения, при которых n_i равно 3 и 4.

В данной работе мы рассмотрим три варианта усеченного распределения Грама-Шарлье, $n_1 = 4$, $n_2 = 6$ и $n_3 = 8$. Функции плотности вероятностей и модели формы отраженного импульса, соответствующие указанным приближениям, будем обозначать как $P^{(i)}(\eta)$ и $V^{(i)}(t)$ ($i=1, 2$ и 3). Отметим, что учет влияния четвертого кумулянта $\tilde{\lambda}_4$ на форму отраженного импульса ранее анализировался в работе [13]

Введем безразмерную величину $\xi = \eta / \sqrt{\lambda_2}$. Представим отклонения от распределения Гаусса, которые описываются выражением в квадратных скобках в (3), как $F^{(i)}(\xi)$. Результаты расчетов функций $F^{(i)}(\xi)$ для трех вариантов усеченного распределения Грама-Шарлье представлены на рис. 1. Следствием появления отрицательных значений функций $F^{(i)}(\xi)$ является нефизический эффект, который проявляется в виде отрицательных значений моделируемого отраженного импульса [13]. Из приведенного рисунка видно, что включение в аппроксимацию плотности вероятностей возвышений морской поверхности членов ряда, старше четвертого порядка приводит к заметным изменениям функций $F^{(i)}(\xi)$.

Моделирование функции $q_s(t)$

Пространственная η и временная t переменные связаны между собой соотношением

$$t = \eta / (c/2). \quad (5)$$

где c – скорость света. Функция $q_s(t)$ может быть получена путем замены переменной в функции плотности вероятностей возвышений поверхности

$$q_s(t) = \frac{d\eta}{dt} P(\eta(t)). \quad (6)$$

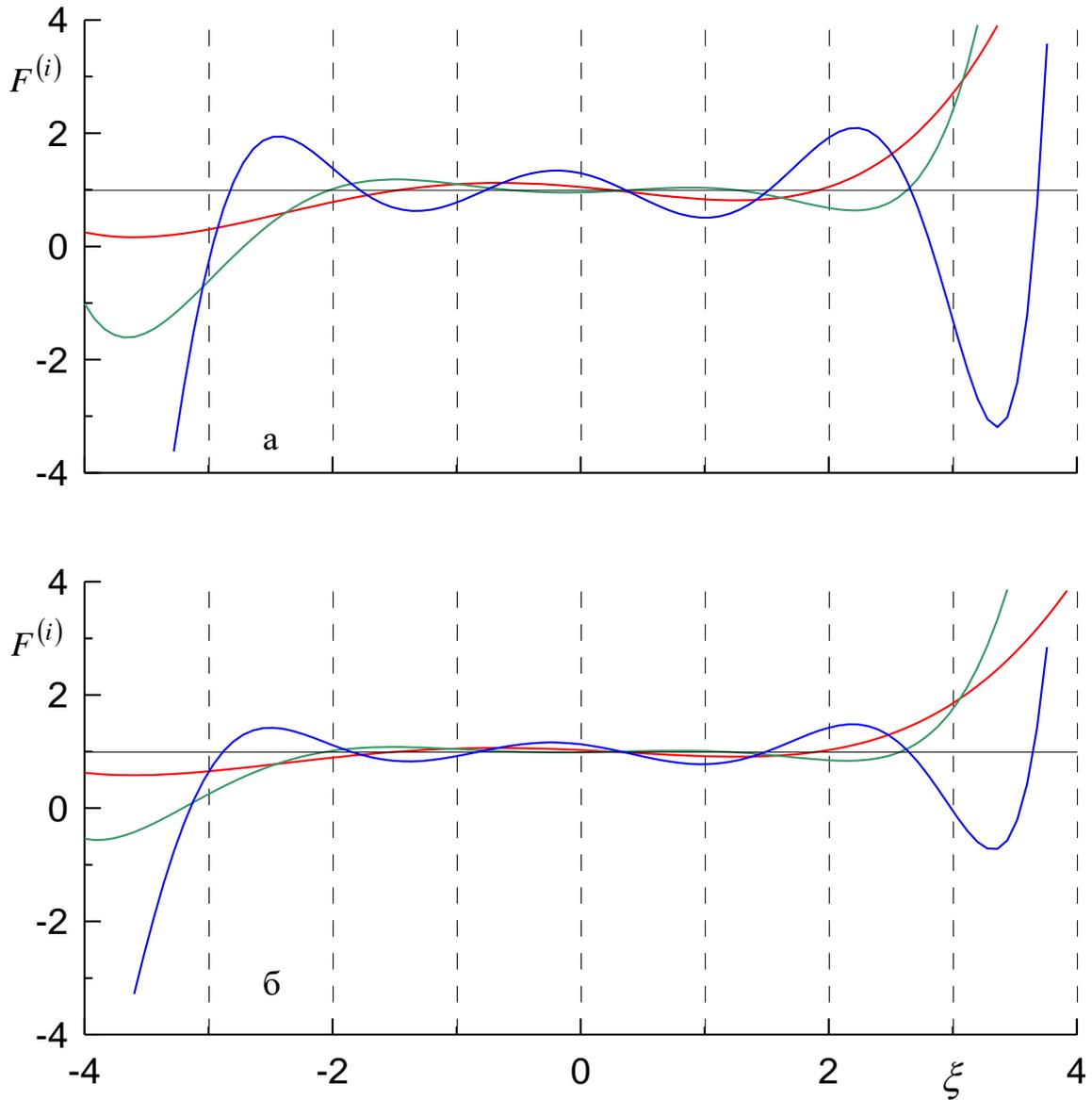


Рис.1. Отклонения от распределения Гаусса аппроксимаций, построенных на основе рядов Грама-Шарлье, а – максимальные отклонения приведенных в табл. 1 кумулянтов $\tilde{\lambda}_n$ от значений, соответствующих распределению Гаусса; б – средние отклонения.

Красная кривая – $F^{(1)}$; зеленая кривая – $F^{(2)}$; синяя кривая – $F^{(3)}$.

Учитывая (5), получаем

$$q_s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp\left(-\frac{t^2}{2D}\right) \left[1 + \frac{\tilde{\lambda}_3}{6} H_3\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) + \frac{\tilde{\lambda}_4}{24} H_4\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) + \frac{\tilde{\lambda}_5}{120} H_5\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) + \right. \\ \left. + \frac{\tilde{\lambda}_6 + 10\tilde{\lambda}_3^2}{720} H_6\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) + \frac{\tilde{\lambda}_7 + 35\tilde{\lambda}_4\tilde{\lambda}_3}{5040} H_7\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) + \right.$$

$$+ \frac{\tilde{\lambda}_8 + 56\tilde{\lambda}_5\tilde{\lambda}_3 + 35\tilde{\lambda}_4^2}{40320} H_8\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) + \dots \quad (7)$$

где $D = (4/c^2)\lambda_2$.

Поскольку соотношение (5) является линейным, то при переходе во временную область кумулянты $\tilde{\lambda}_n$ ($n \geq 3$), которые определяют коэффициенты ряда (6), не меняются.

Численное моделирование отраженного импульса

Как и в работах [8, 22] будем полагать, что форма зондирующего радиоимпульса является гауссовой

$$s_r(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_r}} \exp\left(-\frac{t^2}{2D_r}\right), \quad (8)$$

где параметр D_r определяет ширину радиоимпульса, диаграмма направленности описывается функцией Гаусса. В этом случае, если диаграмма направленности антенны также описывается функцией Гаусса, при нулевом угле падения форма отраженного от плоской поверхности импульса имеет вид

$$F_r(t) = a \exp\left[-\frac{\ln 4c}{\cos^2(\theta/2)h} t\right] He(t), \quad (9)$$

где a – амплитуда; θ – ширина луча антенны, определенная по уровню половинной мощности; h – высота орбиты космического аппарата; $He(t)$ – единичная функция Хевисайда. Тогда свертка двух функций, характеризующих радиоальтиметр,

$$I(t) = F_r(t) * s_r(t) = \frac{a}{2} \exp\left[\delta^2 \frac{D_r}{2} - \delta t\right] \left[1 - \operatorname{erf}\left(\left(\delta - \frac{t}{D_r}\right) \sqrt{\frac{D_r}{2}}\right)\right], \quad (10)$$

где $\delta = \frac{\ln 4c}{\cos^2(\theta/2)h}$; $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$ – функция ошибок. Формы

отраженного импульса, рассчитанные для трех вариантов аппроксимации функции плотности вероятностей, представлены на рис. 2. На этом же рисунке

показана форма отраженного импульса $V^{(0)}(t)$, рассчитанная для гауссовой поверхности.

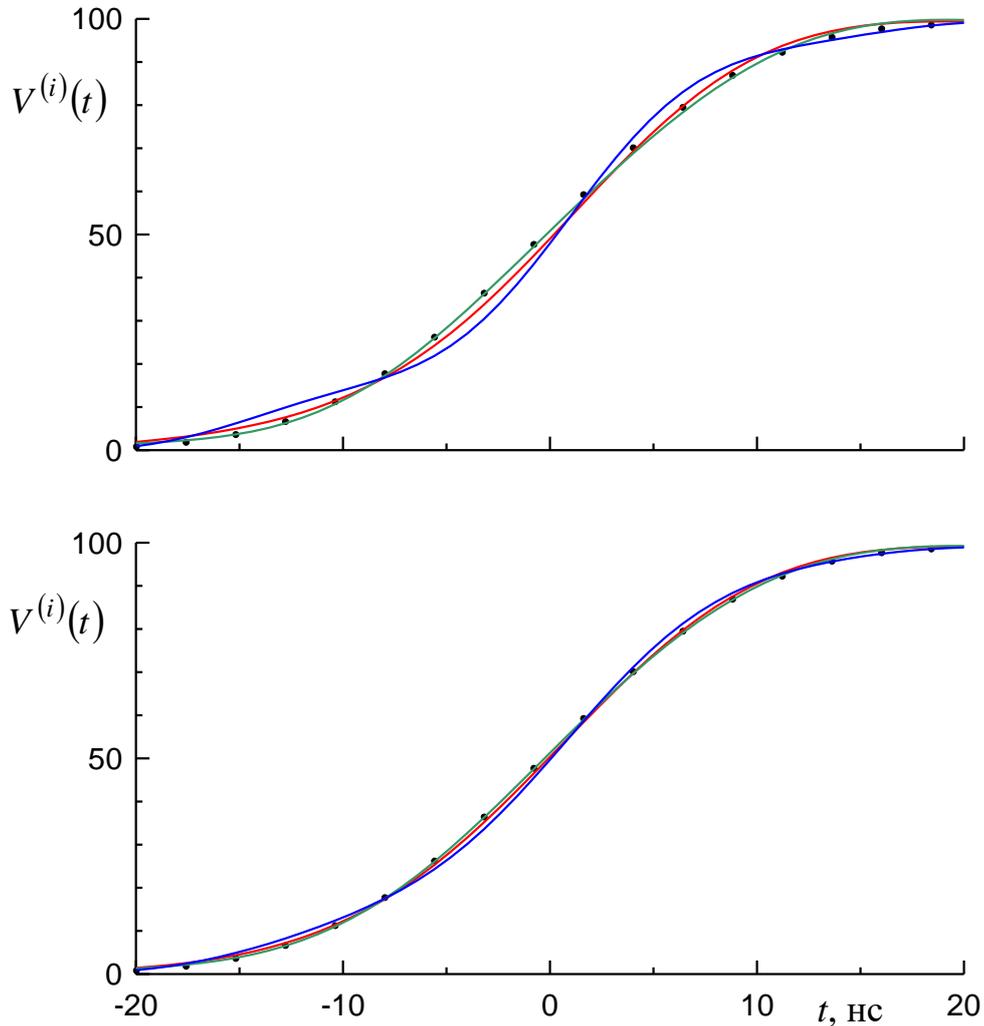


Рис. 2. Форма отраженного импульса $V^{(i)}$, рассчитанная при аппроксимациях $q_s^{(i)}$, а – максимальные отклонения приведенных в табл. 1 кумулянтов $\tilde{\lambda}_n$ от значений, соответствующих распределению Гаусса; б – средние отклонения.
 Пунктир – $V^{(0)}$,
 красная кривая – $V^{(1)}$; зеленая кривая – $V^{(2)}$; синяя кривая – $V^{(3)}$.

При расчетах формы отраженного импульса для радиоальтиметра приняты следующие значения параметров: $\theta_w = 1.6^\circ$, $\sqrt{D_r} = 1.327$ нс и $h = 8 \times 10^5$ м. Эти значения соответствуют параметрам радиоальтиметра, установленного на космическом аппарате Seasat-1 [23]. Расчеты проводились для значимой высоты волн равной 5 м.

Расстояние от космического аппарата до уровня морской поверхности определяется по положению центральной точки переднего фронта отраженного импульса, равному $\tau = 2h/c$. Из рис. 2 следует, что положение переднего фронта отраженного импульса в окрестности этой точки меняется в зависимости от выбора аппроксимации $q_s^{(i)}$. Разброс может достигать 0.3 нс, что соответствует разности в оценках уровня 4.5 см. Кроме смещения переднего фронта при изменении $q_s^{(i)}$ наблюдается заметное изменение его наклона.

Следует отметить, что в штормовых условиях при значимой высоте волн более 10 м, отклонения от распределения Гаусса заметно возрастают. Среднее значение асимметрии равно 0.32 при среднеквадратическом отклонении 0.088, среднее значение эксцесса равняется 0.73 при среднеквадратическом отклонении 0.45 [24]. Соответственно можно принять, что значения асимметрии в основном лежат в пределах от 0.23 до 0.41, значения эксцесса – в пределах от 0.28 до 1.18.

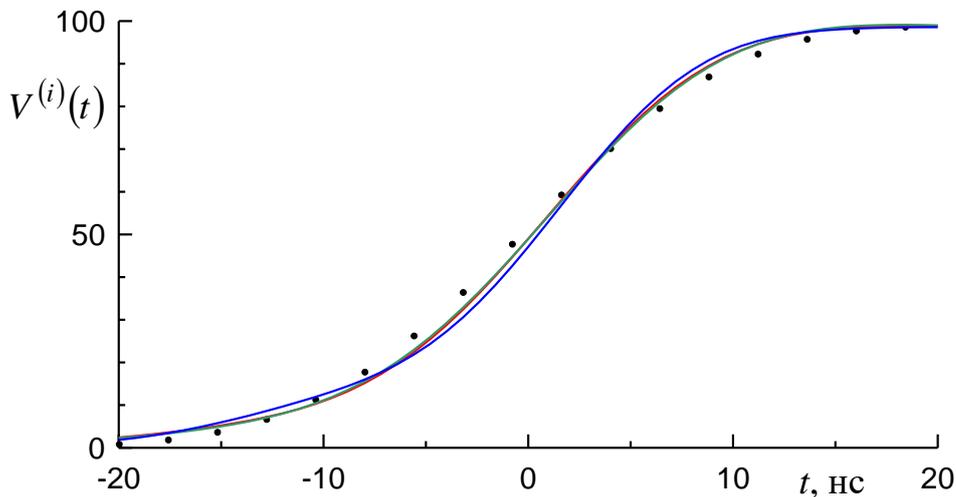


Рис. 3. Форма отраженного импульса $V^{(i)}$, рассчитанная для штормовых условий. Пунктир – $V^{(0)}$, красная кривая – $V^{(1)}$; зеленая кривая – $V^{(2)}$; синяя кривая – $V^{(3)}$.

Формы отраженных импульсов, рассчитанные для штормовых условий, представлены на рис. 3. Расчеты проведены для $\tilde{\lambda}_3 = 0.41$ и $\tilde{\lambda}_4 = 1.18$. Поскольку данные о кумулянтах, порядок которых выше четвертого, в штормовых условиях отсутствуют, было принято, что при $n > 4$ значения кумулянтов соответствуют значениям кумулянтов распределения Гаусса, т.е. равны нулю. Различие в функциях $V^{(2)}(t)$ и $V^{(3)}(t)$ вызваны тем, что коэффициенты при полиномах H_n при $n > 4$ зависят от кумулянтов $\tilde{\lambda}_3$ и $\tilde{\lambda}_4$.

Заключение

Проведен анализ погрешностей восстановления уровня морской поверхности по данным измерений радиоальтиметрами, установленными на космических аппаратах. Рассмотрены погрешности, связанные с аппроксимацией усеченным распределением Грама-Шарлье функции плотности вероятностей создаваемых поверхностными волнами возвышений.

Показано, что использование аппроксимаций, включающих разное число членов ряда Грама-Шарлье приводит к погрешности, которая может достигать 4.5 см. В условиях сильных штормов, когда нелинейность морского волнения возрастает, погрешность определения уровня также увеличивается.

Авторы благодарят А.С. Запевалова за внимание к работе и полезное обсуждение рассматриваемых в ней проблем.

Литература

1. Queffeulou P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters // Marine Geodesy. 2004. Vol. 27. P. 495-510. DOI: 10.1080/01490410490883478
2. Запевалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. О предельной точности альтиметрического определения скорости приводного ветра // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 49-54.
3. Vignudelli S., Kostianoy A., Cipollini P., Benveniste J. Coastal altimetry // Springer, 1st Edition. 2011. XII. 566 p.

4. Пустовойтенко В.В., Радайкина Л.Н., Терехин Ю.В., Коротаев Г.К. Космические средства радиолокационного мониторинга морских акваторий // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2008. № 16. С. 45-83.
5. Callahan P.S., Rodriguez E. Retracking of Jason-1 Data // Marine Geodesy. 2004. Vol. 27. P. 391-407. DOI: 10.1080/01490410490902098.
6. Robinson I.S. Measuring the Oceans from Space: the principles and methods of satellite oceanography. – Berlin, Germany: Springer/Praxis Publishing. 2004. 669 p.
7. Brown G.S. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1977. Vol. AP-25. P. 67-74.
8. Hayne G.S. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1980. Vol. AP-28. P. 687-692.
9. Gulev S., Cotton P.D., Sterl A. Intercomparison of the North Atlantic wave climatology from in-situ, voluntary observing, satellite data and modeling // Physics and Chemistry of the Earth. 1997. Vol. 23. P. 587-592.
10. Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G. Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2007. Vol. 24. P. 1102-1116.
11. Witter D.L. Chelton D.B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development // J. Geoph. Res. 1991. Vol. 96, No C5. P. 8853-8860.
12. Hausman J., Lotnicki V. Sea state bias in radar altimetry revisited // Marine Geodesy. 2010. Vol. 33(S1). P. 336–347. DOI: 10.1080/01490419.2010.487804.
13. Запевалов А.С. Влияние асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности на точность альтиметрических измерений ее уровня // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2012 том 48, № 2. С. 224–231.
14. Kinsman B. Wind waves; their generation and propagation on the ocean surface // Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall Inc., 1965. 661 p.

15. Huang N.E., Shen Z., Long S.R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1999. Vol. 31 P. 417–457.
16. Бабанин А.В., Полников В.Г. О негауссовости ветровых волн // *Морской гидрофизический журнал.* 1994. № 3. С. 79-82.
17. Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смоллов В.Е. Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама-Шарлье // *Океанология,* 2011. Т. 51, № 3. С. 432–439.
18. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений: Пер. с англ. М.: Наука, 1966 . 587 с.
19. Jha A.K. Winterstein S.R. Nonlinear random ocean waves: prediction and comparison with data // *Proc., 19th Intl. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp., ASME,* Paper No. OMAE 00–6125. 2000.
20. Запевалов А.С. Старшие кумулянты возвышений морской поверхности // *"Метеорология и гидрология"* 2011, № 9. С 78-85.
21. Huang N.E., Long S. R. An experimental investigation of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves // *J. Fluid Mech.* 1980. Vol. 101, № 1. P. 179-200.
22. Показеев К.В., Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. Моделирование формы отраженного импульса радиоальтиметра // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия.* 2013. № 5. С. 80-85.
23. Mac-Arthur J.L. SEASAT-A radar altimeter design description // *Applied Physics Lab., Laurel, MD, SDO-5232,* Nov. 1978.
24. Guedes Soares C, Cherneva Z., Antão E.M. Characteristics of abnormal waves in North Sea storm sea states // *Applied Ocean Research.* 2003. Vol. 25. P. 337-344.

Для цитирования:

И. П. Шумейко, М. И. Ожиганова. Моделирование морской поверхности при описании формы отраженного импульса альтиметра. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].* 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/12/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.12