

УДК 537.877+532.5.013

К РАСЧЕТУ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА РАДИОАЛЬТИМЕТРА, ОТРАЖЕННОГО ОТ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. С. Запевалов

Морской гидрофизический институт РАН

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2016 г.

Аннотация. Анализируется влияние выбора модели морской поверхности на расчетную форму отраженного радиоимпульса альтиметра. Форма импульса рассчитывалась для трех типов моделей морской поверхности: модели Гаусса, модели Грама-Шарлье и комбинированной модели с симметричным и асимметричным фильтром. Показано, что в зависимости от выбора модели морской поверхности оценки ее среднего уровня при значимой высоте волн 5 м могут различаться на 4.5-6 см.

Ключевые слова: радиоальтиметр, отраженный импульс, морская поверхность, поверхностные волны, распределение возвышений морской поверхности, асимметрия, эксцесс.

Abstract. The influence of the choice of the sea surface model on the calculated shape of the altimeter return waveform is analyzed. Errors of determination of the level of the sea surface caused by the deviation of the distribution of wave elevations from the Gaussian distribution are estimated. The analysis is performed by numerical simulation. It is assumed that the signal of the altimeter determines the mechanism of specular reflection of radio waves from the sea surface. The altimeter pulse shape calculated for the three types of models of the sea surface: Gaussian model; model of the Gram-Charlier series and combined model with symmetrical and asymmetrical filter. Combined model in the region of small and intermediate values of surface elevations is close to the distribution of Gram-Charlier, it approaches the Gaussian distribution outside this region. The capabilities and limitations of these models for describing the sea surface are considered. It is shown that the accuracy of determining the level of the sea surface depends on the

significant height of the surface waves. It is shown that depending on the choice of the sea surface model, when a significant wave height is about 5 m its average level can vary by 4.5-6 cm. The main factor that determines the accuracy level of the sea surface is the nonlinearity of wind waves and swell.

Key words: radar altimeter, return waveform, sea surface, distribution of sea-surface elevations, skewness, kurtosis.

Введение

При альтиметрических измерениях с помощью радиолокаторов, установленных на космических аппаратах, всю информацию о топографической структуре морской поверхности несет передний фронт отраженного от морской поверхности радиоимпульса. По данным радиоальтиметрических измерений определяются пространственные вариации уровня морской поверхности [1], по которым далее рассчитываются скорости геострофических течений [2], скорость приводного ветра [3], значимая высота волн [4].

Радиоокеанографические измерения с космических аппаратов относятся к классу косвенных измерений. Для их корректной интерпретации необходимо детально знать физические механизмы, формирующие отраженный сигнал, и свойства отражающей поверхности [5-7]. В частности, необходимо знать закон распределения возвышений морской поверхности, создаваемых ветровыми волнами и зыбью [8].

Целью настоящей работы является анализ влияния выбора модели, описывающей распределение возвышений морской поверхности на форму отраженного импульса радиоальтиметра.

Формирования радиоимпульса, отраженного от морской поверхности

При вертикальном зондировании форма отраженного импульса описывается моделью Брауна [9], являющейся сверткой трех функций, две из которых определяются характеристиками установленного на космическом

аппарате радара и условиями измерений, третья функция связана с распределением по высоте точек зеркального отражения [6].

$$V(t) = \chi(t) * s(t) * q(t), \quad (1)$$

где $\chi(t)$ – форма импульса, отраженного от плоской поверхности; $s(t)$ – форма зондирующего импульса; $q(t)$ – функция, связанная с плотностью вероятностей высот точек зеркального отражения; символ $*$ – означает свертку; t – время. Модель Брауна построена в рамках предположения, что точки зеркального отражения равномерно распределены вдоль профиля длинной волны

Пусть зондирование проводится при нулевом угле падения, и диаграмма направленности описывается функцией Гаусса, тогда форма отраженного от плоской поверхности импульса [6]

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

где a – амплитуда; c – скорость света; θ – ширина луча антенны, определенная по уровню половинной мощности; h – высота орбиты КА; $H(t)$ – единичная функция Хевисайда.

Будем рассматривать случай, когда форма зондирующего радиоимпульса является гауссовой

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_r}} \exp\left(-\frac{t^2}{2D_r}\right), \quad (3)$$

где D_r – параметр, определяющий ширину радиоимпульса. В этом случае свертка функций (2) и (3)

$$I(t) = \chi(t) * s(t) = \frac{a}{2} \exp \left[\delta^2 \frac{D_r}{2} - \delta t \right] \left[1 - \operatorname{erf} \left(\left(\delta - \frac{t}{D_r} \right) \sqrt{\frac{D_r}{2}} \right) \right], \quad (4)$$

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.

Функция $q(t)$ описывает плотность вероятностей появления точек зеркального отражения во временной области. Между собой пространственная и временная переменные связаны соотношением $t = \eta/(c/2)$. Соответственно получаем

$$q(t) = \frac{d\eta}{dt} P_\eta(\eta(t)). \quad (5)$$

где $P_\eta(\eta)$ – плотность вероятностей возвышений морской поверхности.

Переменные t и η связаны линейным отношением, поэтому асимметрия и эксцесс распределений $q(t)$ и $P_\eta(\eta)$ численно равны между собой. Понижение уровня морской поверхности приводит к увеличению расстояния между ней и космическим аппаратом, т.е. приводит к увеличению времени возврата радиоимпульса альтиметра. Следовательно, нечетные статистические моменты распределения $q(t)$ должны иметь противоположный знак по сравнению с моментами возвышения морской поверхности, положительно направленного вверх.

Распределение возвышений, создаваемых поверхностными волнами

До сравнительно недавнего времени в радиоокеанографии использовалась модель, представляющая морскую поверхность в виде суперпозиции большого числа невзаимодействующих между собой линейных волн. Предполагалось, что фазы этих волн распределены равномерно на

интервале $0, 2\pi$. Этой модели соответствует гауссово распределение возвышений поверхности [10].

Многочисленные волнографические измерения свидетельствуют о том, что реальное распределение возвышений отличается от распределения Гаусса. По данным измерений, выполненных в Северном море на платформе Экофиск (Ekofisk), в условиях, когда значимая высота волн H_s была более 4.5 м, асимметрия A и эксцесса E распределения возвышений морской поверхности меняются соответственно в пределах: $-0.05 < A < 0.4$ и $-0.4 < E < 0.4$ [11]. При сильных штормах ($H_s > 10$ м), когда наблюдались аномальные волны, (волны, высота которых более чем в два раза превышала значимую высоту), наблюдались изменения статистических моментов в пределах $0.20 < A < 0.51$, $0.23 < E < 1.53$ [12].

В настоящее время, как правило, при описании морской поверхности при вертикальном зондировании в задачах отражения радиоволн используются модели плотности вероятностей возвышений $P_\eta(\eta)$, построенные на основе рядов Грама-Шарлье [5-7].

$$P_\eta(\eta) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n H_n(\eta) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\eta}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_\eta^2}\eta^2\right), \quad (6)$$

где a_n – коэффициенты ряда; H_n – ортогональные полигоны Чебышева-Эрмита; σ_η^2 – дисперсия возвышений поверхности. Коэффициенты a_n

определяются выражением $a_n = (n!)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} P_\eta(\eta) H_n(\eta) d\eta$.

Коэффициенты ряда Грама-Шарлье для квазигауссовой случайной величины x определяются через ее статистические моменты

$$\mu_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n P_x(x) dx; \quad (7)$$

или через ее кумулянты. Здесь $P_x(x)$ – плотность вероятностей случайной величины x .

В натуральных экспериментах, как правило, определяют статистические моменты не старше четвертого порядка. Поэтому при описании морской поверхности используются модели, построенные на основе усеченных рядов Грама-Шарлье

$$P_{GC}(\eta) = \frac{\exp\left(-\frac{\tilde{\eta}^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi\mu_2}} \left\{ 1 + \left[\frac{a_3}{6} H_3(\tilde{\eta}) + \frac{a_4}{24} H_4(\tilde{\eta}) \right] \right\}, \quad (8)$$

где $\tilde{\eta} = \eta/\sqrt{\mu_2}$. Слагаемое в квадратных скобках описывает отклонения модели $P_{GC}(\eta)$ от распределения Гаусса.

Недостатком моделей, построенных по усеченным рядам Грама-Шарлье, является появление отрицательных значений на “крыльях” распределения [13]. Ограничение области возвышений морской поверхности, в пределах которой справедливы модели Грама-Шарлье $P_{GC}(\eta)$, приводит к искажениям рассчитанной в соответствии с моделью Брауна формы отраженного радиоимпульса. Проявлением этих искажений является появление отрицательных значений в расчетной форме отраженного радиоимпульса [5]. Сравнения с данными волнографических измерений показали, что модель $P_{GC}(\eta)$ справедлива в ограниченной области [8]

$$-3 < \tilde{\eta} < 3. \quad (9)$$

Чтобы избежать нефизического эффекта (появления отрицательных значений в функции, описывающей форму отраженного импульса), в работе [5] предложено использовать комбинированную модель распределения возвышения морской поверхности. В области (9) комбинированная модель

близка к модели Грама-Шарлье, за её пределами приближается к распределению Гаусса [14]

$$P_C(\eta) = \frac{\exp\left(-\frac{\tilde{\eta}^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi\mu_2}} \left\{ 1 + \left[\frac{a_3}{6} H_3(\tilde{\eta}) + \frac{a_4}{24} H_4(\tilde{\eta}) \right] F(\tilde{\eta}) \right\}, \quad (10)$$

где двухпараметрическая функция $F(\tilde{\eta})$ выполняет роль фильтра

$$F(\tilde{\eta}) = \exp\left[-(|\tilde{\eta}|/d)^m\right]. \quad (11)$$

где m и d – параметры фильтра.

Модели плотности вероятностей $P_{GC}(\tilde{\eta})$ и $P_C(\tilde{\eta})$, построенные при разных значениях коэффициентов a_3 и a_4 , представлены на рис. 1. Для сравнения там приводится распределение Гаусса. Вертикальные линии на графиках $P_{GC}(\tilde{\eta})$ соответствуют границе области, где $P_{GC}(\tilde{\eta}) < 0$.

Статистические моменты поверхностных волн

Расчеты с помощью комбинированной модели позволяют корректно описать отраженный радиоимпульс во всем диапазоне величин асимметрии и эксцесса распределения возвышений морской поверхности, наблюдающихся в натуральных условиях. Ограничения в использовании комбинированной модели связаны с тем, что асимметрия и эксцесс, рассчитанные согласно (7), не равны соответственно коэффициентам a_3 и a_4 , как это должно быть в случае использования большего числа членов ряда Грама-Шарлье. В частности, эта модель не позволяет решать обратную задачу – восстановление асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным вертикального радиозондирования с космических аппаратов [7].

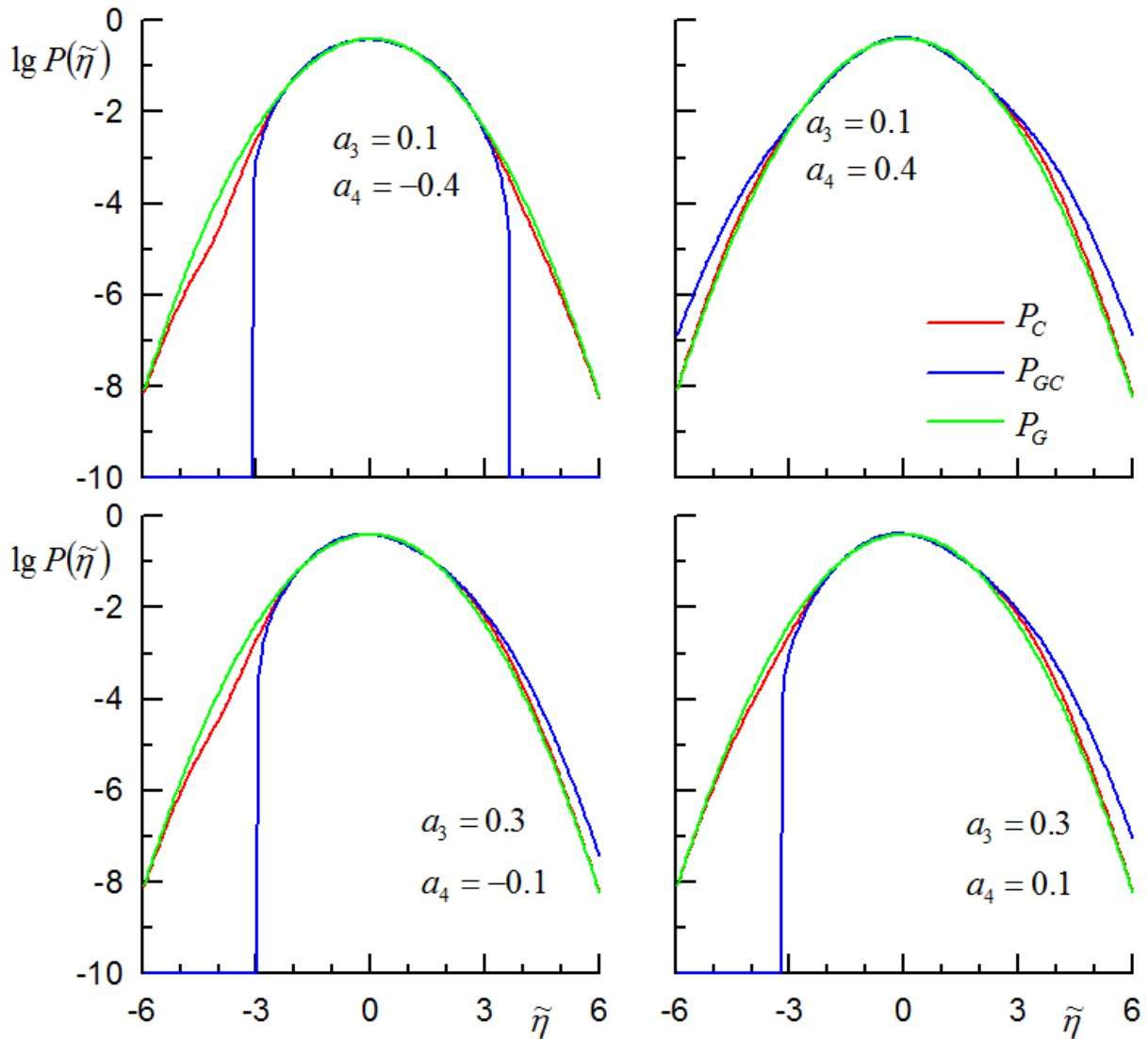


Рис. 1. Модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности

Соотношения между третьим и четвертым статистическими моментами и параметрами модели (10) (a_3 и a_4) показаны на рис. 2. Видно, что эти соотношения описываются линейными функциями, для которых $\mu_3/a_3 = 0.34$ и $\mu_4/(a_4 + 3) = 0.68$. Расчеты проведены для параметров фильтра F , значения которых $m = 3.5$ и $d = 3$. Отметим, что изменения значений параметра a_4 не влияют на отношение μ_3/a_3 , изменения значений a_3 не влияют на отношение $\mu_4/(a_4 + 3)$.

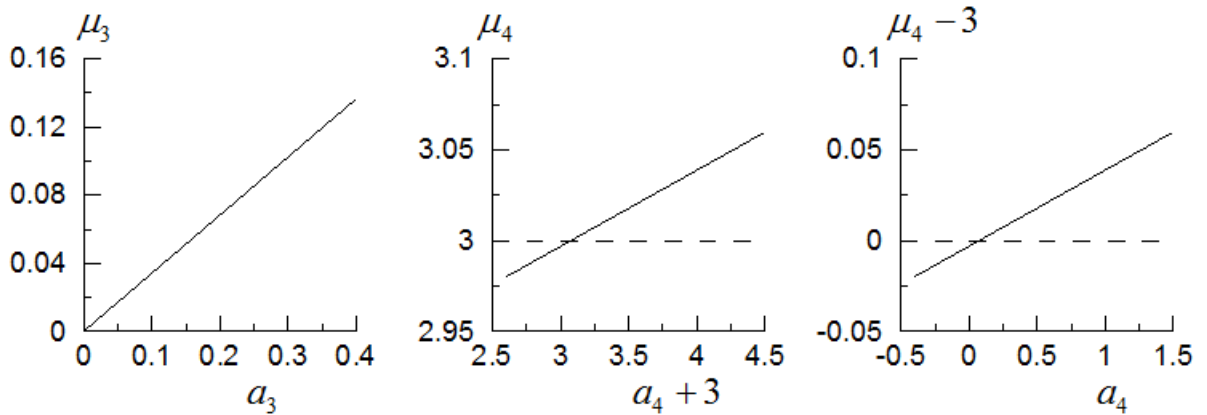


Рис. 2. Зависимости статистических моментов μ_3 и μ_4 модели (10) от ее параметров a_3 и a_4 .

В качестве одного из параметров, характеризующих отклонение распределения $P_C(\tilde{\eta})$ от распределения Гаусса, используется эксцесс. Полученные значения эксцесса $\mu_4 - 3$, характеризующие отклонение распределения $P_C(\tilde{\eta})$ от распределения Гаусса, сильно отличаются от значений параметра a_4 .

Варьируя параметры фильтра (11), можно лишь незначительно увеличить отношения μ_3/a_3 и $\mu_4/(a_4 + 3)$. Ограничения, наложенные на параметры фильтра, указаны в работе [14]. В частности, если принять $d = 3.5$, в модели (10) могут появиться отрицательные значения.

Комплексная модель с асимметричным фильтром

В большинстве случаев ситуации, когда $P_{GC}(\tilde{\eta}) < 0$, имеют место или в отрицательной, или в положительной области значений $\tilde{\eta}$. Для этих ситуаций можно использовать асимметричный фильтр в форме

$$F_A(\tilde{\eta}) = \begin{cases} \exp[-(|\tilde{\eta}|/d_1)^{m_1}] & \text{при } \tilde{\eta}_u < 0 \\ \exp[-(\tilde{\eta}/d_2)^{m_2}] & \text{при } \tilde{\eta}_u \geq 0 \end{cases} . \quad (12)$$

Далее для определенности будем рассматривать ситуацию, когда отрицательные значения функции $P_{GC}(\tilde{\eta})$ имеют место только в области $\tilde{\eta} < 0$. Соответственно фильтр в области положительных значений $\tilde{\eta}$ должен спадать медленнее, чем в области отрицательных значений.

Представленные на рис. 3 четыре модели $P_A^{(i)}(\tilde{\eta})$, (где $i=1, 2, 3, 4$) соответствуют четырем наборам параметров фильтра (12). Модель $P_A^{(4)}(\tilde{\eta})$ показывает, как неправильный выбор параметров фильтра приводит к появлению отрицательных значений. Для моделей $P_A^{(i)}(\tilde{\eta})$ (где $i=1, 2, 3$) при $a_3 = 0.3$ и $a_4 + 3 = 3.1$ соответственно получено $\mu_3 = 0.17, 0.23, 0.24$ и $\mu_4 = 3.35, 3.20, 3.17$.

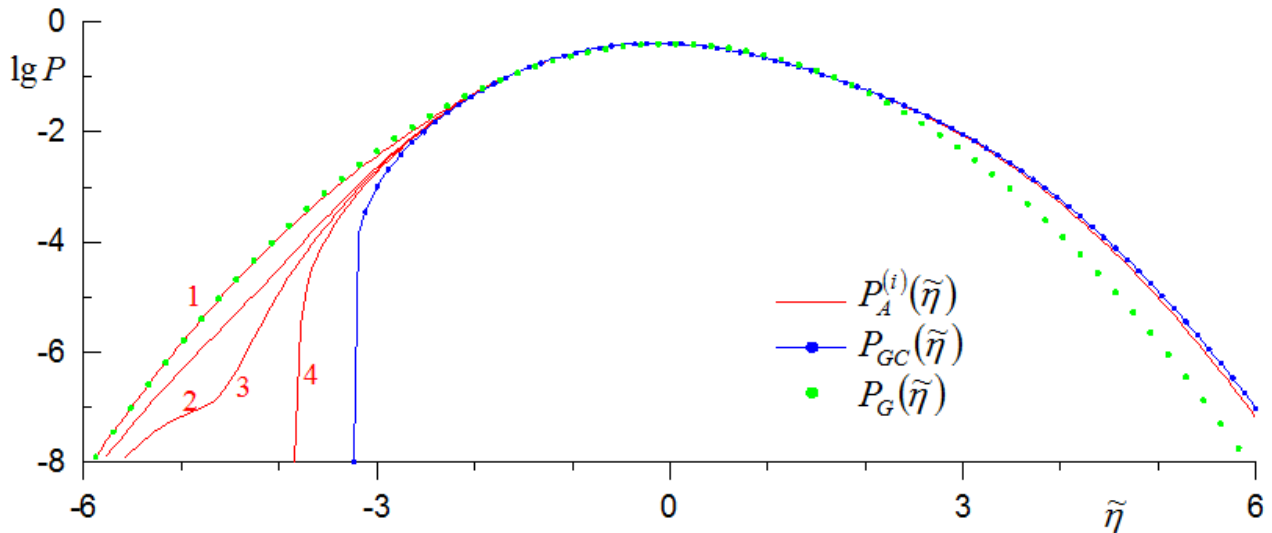


Рис. 3. Комплексные модели с асимметричным фильтром $P_A^{(i)}(\tilde{\eta}) P_A^{(i)}(\tilde{\eta})$, построенные на основе модели Грама-Шарлье $P_{GC}(\tilde{\eta})$ и модель Гаусса $P_G(\tilde{\eta})$

По сравнению с моделью $P_C(\tilde{\eta})$, модель $P_A(\tilde{\eta})$ позволяет приблизить отношения μ_3/a_3 и $\mu_4/(a_4 + 3)$ к единице, однако полного совпадения обоих параметров достичь не удастся. Это указывает на необходимость дальнейшего развития моделей, описывающих распределение возвышений морской поверхности для задач дистанционного зондирования океана.

Форма отраженного импульса радиоальтиметра

Форма отраженного импульса при вертикальном зондировании в случае, когда функции $\chi(t)$ и $s(t)$ описываются выражениями (2) и (3) соответственно, определяется сверткой двух функций

$$V(t) = I(t) * q(t). \quad (13)$$

Изменения переднего фронта отраженного радиоимпульса при расчете с помощью разных моделей морской поверхности показаны на рис. 4. Расчеты выполнены для значимой высоты поверхностных волн, равной 5 м. Для наглядности фрагменты переднего фронта в окрестности точки $t = 0$ представлены укрупненно.

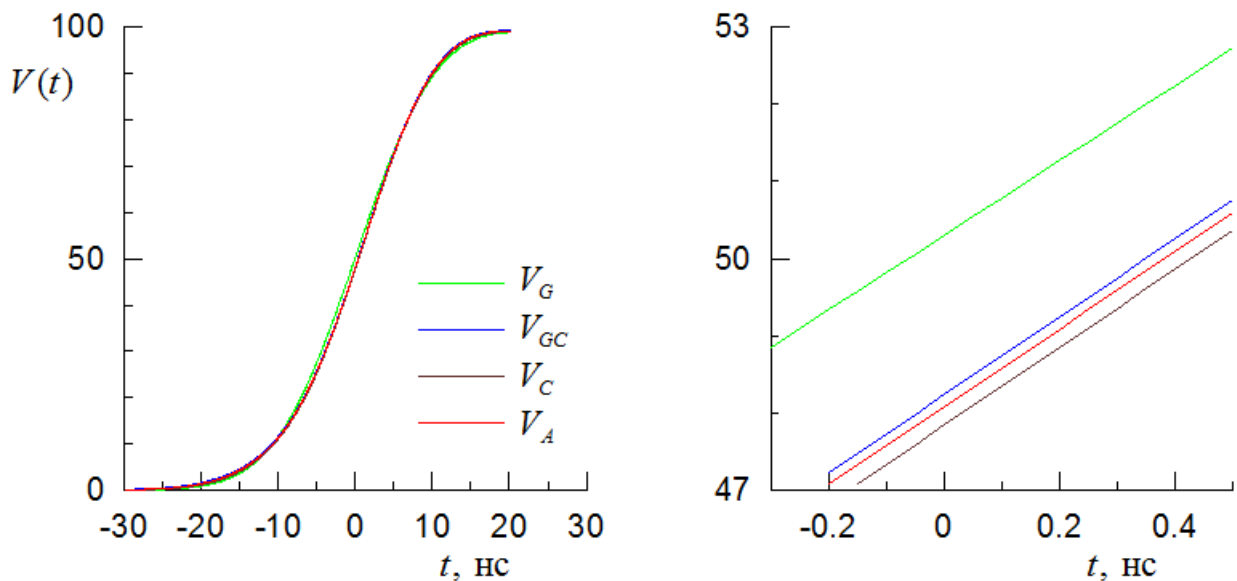


Рис. 4. Передний фронт отраженного импульса радиоальтиметра

Асимметрия распределения возвышений морской поверхности приводит к задержке переднего фронта отраженного импульса. Положение фронта, рассчитанное для моделей, учитывающих асимметрию, смещено относительно положения, рассчитанного для модели Гаусса $P_G(\tilde{\eta})$, на 0.3-0.4 нс. Задержка импульса на такое время соответствует изменению расстояния от космического аппарата до морской поверхности на 4.5-6 см. Расхождения в положении

переднего фронта для рассмотренных здесь моделей, учитывающих асимметрию, не превышают 0.1 нс (1.5 см).

Таким образом, основным фактором, определяющим изменение положения переднего фронта отраженного импульса альтиметра, является нелинейность поверхностных волн. Нелинейность приводит к изменению профиля длинных волн. При расчете воздействия волн на суда этот эффект не играет существенной роли, но при альтиметрическом определении уровня морской поверхности он может являться источником ошибок.

Расхождения в положении переднего фронта линейной модели и группы нелинейных моделей соответствует ошибке определения уровня поверхности 4.5-6 см. Разброс внутри группы нелинейных моделей не превышает 1.5 см. Выбор той или иной модели распределения возвышений морской поверхности должен быть осуществлен на основе данных прямых волнографических измерений.

Заключение

В настоящее время основным фактором, снижающим точность определения уровня морской поверхности, является изменение ее состояния. Распределение возвышений морской поверхности относится к квазигауссовым распределениям, у которых математическое ожидание и медиана не совпадают. Изменение асимметрии распределения возвышений морской поверхности, которая априори неизвестна, приводят к трансформации переднего фронта отраженного импульса радиоальтиметра, что, в свою очередь, приводит к ошибкам определения уровня поверхности. Все это накладывает жесткие требования на модели морской поверхности.

Рассмотрены четыре типа моделей распределения возвышений морской поверхности: модель Гаусса, модель, построенная на основе усеченного ряда Грама-Шарлье, комбинированная модель с симметричным фильтром, а также предложенная в настоящей работе комбинированная модель с асимметричным фильтром. Показано, что в зависимости от выбора модели морской

поверхности, оценки ее среднего уровня при значимой высоте волн 5 м могут различаться на 4.5-6 см.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 “Исследования закономерностей изменения состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий”.

Литература

1. Пустовойтенко В.В., Запевалов А.С. Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия – Современное состояние, перспективы и проблемы // Серия. Современные проблемы океанологии, Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”. 2012. Вып. № 11. 218 с.
2. Kubryakov A.A., Stanichny S.V. Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data // *Oceanology*. 2015. Vol. 55, No. 1. P. 56–67.
3. Moore R. K., Pierson W.J. Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite // *Proc. Inter. Symp. Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites Miami Beach, FL*. 1966. Nov. 22-24. P. R1-R28.
4. Queffeulou P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters // *Marine Geodesy*. 2004. Vol. 27. P. 495-510.
5. 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.
6. 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.
7. Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G. Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*. - 2007. - Vol. 24. - P. 1102-1116.

8. 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.
9. 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.
10. Лонге-Хиггинс М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности // Пер. с англ: В кн.: Ветровые волны, М.: Иностранная литература. 1962. С. 125- 218.
11. 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.
12. 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.
13. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений: Пер. с англ. М.: Наука. 1966 . 587 с.
14. Zapevalov A.S., Pustovoitenko V.V. Modeling of the probability distribution function of sea surface slopes in problems of radio wave scattering // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 2. P. 100-110. DOI: 10.1007/s11141-010-9206-z.