

А.С.Запевалов, В.В.Пустовойтенко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**ИСКАЖЕНИЕ ОЦЕНОК АСИММЕТРИИ ВОЗВЫШЕНИЙ
МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ
ПО ДАННЫМ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Анализируются особенности методики расчета асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным измерений альтиметром, установленным на космическом аппарате. Показано, что расчет асимметрии по форме отраженного импульса, построенного в рамках модели Брауна, с использованием распределения Грама-Шарлье для точек зеркального отражения, приводит к занижению ее значения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *альтиметрические измерения, форма отраженного радиоимпульса, асимметрия распределения возвышений морской поверхности.*

Морские поверхностные волны относятся к классу слабо нелинейных процессов, а распределение возвышений поверхности является квазигауссовым [1 – 3]. При альтиметрических измерениях форма отраженного от морской поверхности радиоимпульса зависит от распределения возвышений морской поверхности [4], что создает принципиальную возможность для дистанционного определения асимметрии этого распределения. Информация об асимметрии необходима для коррекции данных измерений рельефа морской поверхности вдоль трассы космического аппарата [5 – 7]. Погрешность, обусловленная отклонением распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса, в определении расстояния от спутника до уровня невозмущенной поверхности может достигать величин порядка 10 см [8].

Недавно проведенный анализ информации, полученной с установленных на космических аппаратах альтиметров *Jason-1* и *Envisat RA-2*, подтвердил возможность определения асимметрии распределения возвышений морской поверхности по форме отраженного радиоимпульса [9, 10]. Однако, при расчетах был получен большой процент отрицательных значений асимметрии, что не соответствует данным прямых волнографических измерений [11].

Несоответствие расчетных и измеренных значений асимметрии послужило побудительным мотивом для более подробного анализа корректности процедуры расчета. В [12] были рассмотрены эффекты, связанные с обработкой информации (использованием фильтра Хэмминга), а также эффекты, связанные с отклонением луча антенны альтиметра от вертикали. Было показано, что использование фильтра Хэмминга не может быть причиной большого процента отрицательных значений асимметрии. Моделирование формы отраженного импульса при разных углах падения показало, что отрицательные значения асимметрии появляются только при значительном отклонении луча антенны от вертикали и небольших значениях истинной асимметрии.

Целью настоящей работы является анализ возможных факторов, приводящих к искажению оценок асимметрии распределения возвышений мор-

ской поверхности, рассчитанных по данным альтиметрических измерений.

Формирование отраженного радиоимпульса при вертикальном зондировании морской поверхности. При вертикальном зондировании с космических аппаратов средняя форма отраженного от морской поверхности радиоимпульса описывается модель Брауна [13], представляющей свертку трех функций

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

где $\chi(t)$ – форма радиоимпульса, отраженного от плоской поверхности; $s(t)$ – форма зондирующего радиоимпульса; $q(t)$ – функция, связанная с плотностью вероятностей высот точек зеркального отражения; символ «*» – означает свертку; t – время.

Модель Брауна построена в рамках следующих предположений:

- отражающая поверхность содержит достаточно большое число независимых отражающих элементов;
- статистики возвышений поверхности являются постоянными в пределах освещаемой радаром поверхности;
- отражение является скалярным процессом без эффектов поляризации;
- нормированное сечение обратного рассеяния является постоянным для всей освещаемой площади, т.е. в пределах диаграммы направленности не зависит от угла падения;
- эффектом Допплера можно пренебречь.

Рассмотрим случай, когда форма зондирующего радиоимпульса задана выражением [4]

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

и форма отраженного от плоской поверхности радиоимпульса

$$\chi(t) = a \exp\left[-\frac{\ln 4c}{\cos^2(\theta/2)h} t\right] H(t). \quad (3)$$

В рамках принятых предположений свертка функций $\chi(t)$ и $s(t)$ имеет вид [14]

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

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; a – амплитуда; параметр D_r – параметр, определяющий ширину зондирующего радиоимпульса; c – скорость света; θ – ширина луча антенны, определенная по уровню половинной мощности; h – высота орбиты космического аппарата; $H(t)$ – единичная функция Хевисайда. Таким образом, форму отраженного радиоимпульса можно представить как свертку двух функций

$$V(t) = I(t) * q(t), \quad (5)$$

где первая функция определяется характеристиками альтиметра, вторая функция определяется характеристиками морской поверхности.

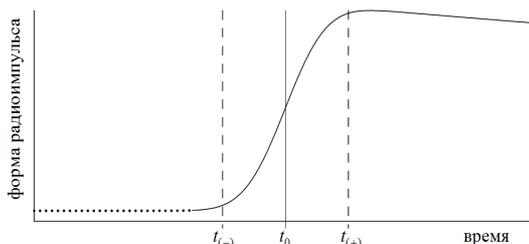
Функция $q(t)$ строится в рамках предположения, что отражающие элементы поверхности равномерно распределены вдоль профиля длинной волны, т.е. их плотность вероятностей определяется плотностью вероятностей возвышений морской поверхности [4]. В рамках этого предположения функция $q(t)$ рассчитывается путем преобразования плотности вероятностей возвышений морской поверхности $P(\eta)$ с помощью соотношения, связывающего возвышение поверхности η и время t

$$t = \eta/(c/2). \quad (6)$$

Переход от плотности вероятностей $P(\eta)$ к функции $q(t)$ осуществляется с помощью стандартной процедуры замены переменных

$$q(t) = \frac{d\eta}{dt} P(\eta(t)). \quad (7)$$

Схематично форма отраженного от морской поверхности импульса представлена на рис.1. Пунктиром показан уровень температурных шумов. Сплошная вертикальная линия соответствует центральной точке переднего фронта импульса t_0 (*tracking point*). Точка t_0 определяет время прохождения радиоимпульса до уровня невозмущенной морской поверхности и обратно. Штриховые линии ограничивают участок, по наклону которого определяется значимая высота волн. Верхняя и нижняя границы указанного участка обозначены как $t_{(-)}$ и $t_{(+)}$ соответственно. Асимметрия распределения возвышений морской поверхности приводит к тому, что наклон переднего фронта импульса в областях $(t_{(-)}, t_0)$ и $(t_0, t_{(+)})$ оказывается различен [5].



Р и с . 1 . Форма импульса радиоальтиметра, отраженного от морской поверхности при вертикальном зондировании.

Моделирование формы отраженного радиоимпульса при отражении от квазигассовой поверхности. Для описания распределения возвышений морской поверхности в приложениях, связанных с альтиметрическими измерениями, как правило, используются модели, построенные на основе Эджвортовой формы типа А рядов Грама-Шарлье [3, 7]. При определении асимметрии λ распределения возвышений морской поверхности используется модель в форме [8, 10]

$$P(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{\eta^2}{2\sigma_s^2}\right] \left\{ 1 + \frac{\lambda}{6} H_3\left(\frac{\eta}{\sigma_s}\right) \right\}, \quad (8)$$

где σ_s^2 — дисперсия возвышений морской поверхности; $H_3(x) = x^3 - 3x$ — ортогональный полином Чебышева-Эрмита третьего порядка. Модели (8) соответствует функция

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_c^2}\right] \left\{ 1 - \frac{\lambda}{6} H_3\left(\frac{(t-t_0)}{\sigma_c}\right) \right\}, \quad (9)$$

где $t_0 = 2h/c$; $\sigma_c = (2/c)\sigma_s$.

Понижение уровня морской поверхности приводит к увеличению времени возврата радиоимпульса альтиметра, поэтому нечетные статистические моменты распределения $q(t)$, в частности асимметрия, должны иметь противоположный знак, чем моменты возвышений морской поверхности, положительно направленного вверх. Это учтено введением разных знаков перед параметром λ в выражениях (8) и (9).

В работе [14] было показано, что основной вклад в формирование переднего фронта отраженного радиоимпульса при зондировании гауссовой поверхности дают возвышения, удовлетворяющие условию

$$|\eta|/\sigma_s < 2,5. \quad (10)$$

Как известно [16], модели плотности вероятностей, построенные по небольшому числу членов ряда Грама-Шарлье приводят к искажениям на «крыльях» распределения. В данном случае условие (10) соответствует области изменения параметра η , внутри которой можно использовать модель плотности вероятностей в форме (8) [17, 18].

Из условия (10) следует, что отраженный радиоимпульс несет информацию не о полном, а об усеченном распределении возвышений морской поверхности. Это означает, что, решая обратную задачу, т.е. восстанавливая распределение возвышений морской поверхности по данным альтиметрических измерений, мы восстанавливаем параметры усеченного распределения. При этом из рассмотрения исключаются области вблизи гребней высоких волн, дающие значительный вклад в асимметрию полного распределения возвышений.

В общем виде модель плотности вероятностей возвышений морской поверхности при описании формы отраженного радиоимпульса представим как

$$P^{(b)}(\eta) = \begin{cases} 0 & \text{при } \eta \leq b_1 \sigma_s; \\ N_b P(\eta) & \text{при } b_1 \sigma_s < \eta < b_2 \sigma_s; \\ 0 & \text{при } \eta \geq b_2 \sigma_s; \end{cases} \quad (11)$$

где безразмерные параметры b_1 и b_2 определяют область значений возвышений поверхности, формирующих отраженный импульс; N_b – нормирующий множитель. При дальнейших расчетах будем полагать, что $b_1 = b_2 = b$. Форму отраженного радиоимпульса, рассчитанную по усеченному распределению возвышений поверхности, будем обозначать как $V^b(t)$.

Функций $V^b(t)$, полученные при разных значениях параметра b в ситуации, когда возвышение морской поверхности описывается распределением Гаусса, представлены на рис.2. Предполагалось, что температурным шумом можно пренебречь. Расчеты проводились при следующих значениях параметров, определяющих форму отраженного импульса: $\theta = 1,6^\circ$, $\sqrt{D_r} = 1,327$ нс, $h = 8 \cdot 10^5$ м. Указанные значения соответствуют параметрам альтиметра, установленного на космическом аппарате SEASAT-1 [19]. Амплитудный множитель a в выражении (4) принят равным 100.

Вертикальными линиями на рис.2 показаны области, где функция $V(t)$ меняется в пределах $0,1 \max(V) \leq V(t) \leq 0,9 \max(V)$ – сплошная линия; в пределах $0,15 \max(V) \leq V(t) \leq 0,85 \max(V)$ – штриховая линия.

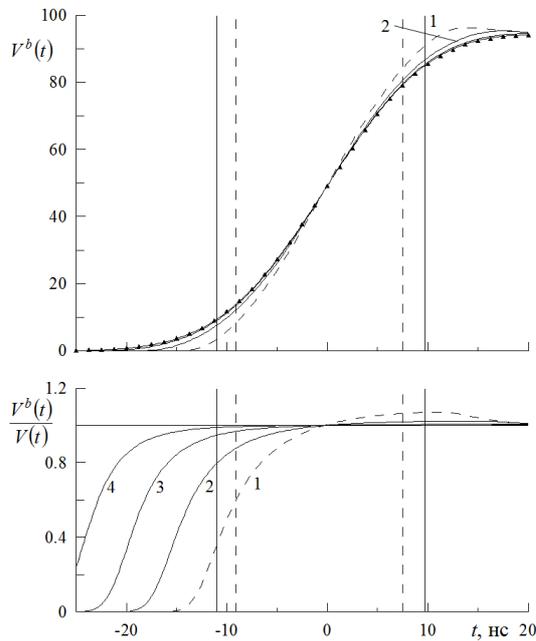


Рис. 2. Идеализированные формы отраженных морской поверхностью импульсов $V^b(t)$, построенные при разных значениях параметра b : кривая 1 – $b = 1,5$; кривая 2 – $b = 2$; кривая 3 – $b = 2,5$; кривая 4 – $b = 3$; \blacktriangle – $b = \infty$. Расчет при значимой высоте волн 5 м.

была построена в [4]. Следует отметить, что в данной работе, как и в последующих работах (см., например, [5]), отклонения от распределения Гаусса распределений возвышений морской поверхности описывались с помощью рядов Грама-Шарлье. При этом особенности моделирования распределения возвышений морской поверхности, указанные в [16 – 18], не учитывались.

Функции $V_{GC}^b(t)/V_{GC}(t)$ и $V_G^b(t)/V_G(t)$ представлены на рис.3. Видно, что форма отраженного радиоимпульса оказывается более критична к выбору значений параметра b при зондировании нелинейного волнового поля, чем при зондировании гауссовой поверхности.

Максимальное значение параметра b , которое можно использовать при расчете формы отраженного импульса равняется 2,5. Обусловлено это тем, что отмеченные выше ограничения, в использовании моделей распределений, построенных на основе ряда Грама-Шарлье с небольшим числом членов ряда, приводят к искажениям расчетной формы

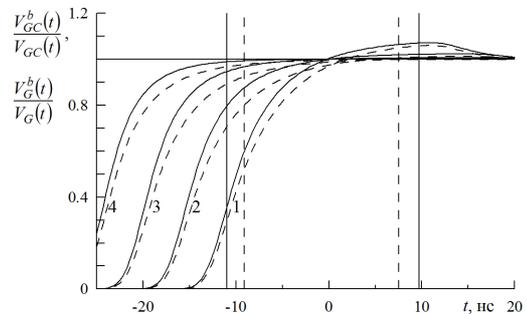


Рис. 3. Функции $V_{GC}^b(t)/V_{GC}(t)$ (---) и $V_G^b(t)/V_G(t)$ (—). Вертикальные линии соответствуют линиям на рис.2.

В пределах выделенных областей при $b \geq 2,5$ функции $V^b(t)$ и $V(t)$ практически совпадают. Это хорошо видно на нижнем фрагменте рис.2, где представлено отношение функций $V^b(t)/V(t)$, рассчитанных по усеченным и полному распределениям возвышений поверхности.

Проанализируем, какие участки морской поверхности дают основной вклад в формирование переднего фронта отраженного от квазигауссовой поверхности радиоимпульса. Для того чтобы разделить функции, описывающие формы отраженного радиоимпульса, рассчитанные для распределений Гаусса и Грама-Шарлье будем использовать нижние индексы «G» и «GC» соответственно.

Впервые аналитическая модель формы отраженного радиоимпульса при зондировании квазигауссовой поверхности

отраженного импульса. В некоторых случаях это проявляется в виде нефизического эффекта, который выражается в появлении отрицательных значений функции $V_{GC}(t)$ [6].

При использовании усеченной модели (8) из рассмотрения исключаются гребни наиболее высоких волн, дающие значительный вклад в асимметрию распределения возвышений морской поверхности. Соответственно расчет асимметрии по отраженному радиоимпульсу, построенному с использованием усеченной модели (8), приводит к занижению ее оценок по сравнению с их реальными значениями.

Решение обратной задачи, т.е. восстановление асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным альтиметрических измерений ограничено адекватностью используемой модели распределения реальным морским волнам. Проблема состоит в том, что в настоящее время отсутствует модель распределения возвышений морской поверхности для диапазона более широкого, чем диапазон, заданный выражением (10) [11].

Закключение. Проведен анализ особенностей методики расчета асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным измерений радиоальтиметром, установленным на космическом аппарате. В основе методики расчета лежит модель Брауна [13], связывающая форму отраженного импульса с распределением возвышений морской поверхности. Для описания отклонений распределения возвышений от распределения Гаусса используются ряды Грама-Шарлье.

При описании морской поверхности модель Грама-Шарлье в форме (8) имеет принципиальное ограничение, она позволяет описывать распределение возвышений только в ограниченном диапазоне (10). Фактически это соответствует тому, что расчеты формы отраженного радиоимпульса ведутся по усеченному распределению. При этом из расчетов исключаются области, соответствующие гребням наиболее высоких волн, дающие значительный вклад в асимметрию распределения возвышений морской поверхности. Соответственно оценки асимметрии, полученные по данным альтиметрических измерений, оказываются занижены по сравнению с ее реальными значениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Longuet-Higgins M.S.* The effect of non-linearities on statistical distribution in the theory of sea waves // *J. Fluid Mech.*– 1963.– v.17, № 3.– P.459-480.
2. *Phillips O.M.* On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part 2. // *J. Fluid Mech.*– 1961.– v.11.– P.143-155.
3. *Huang N.E., Long S.R., Tung C.C., Yuan Y., Bliven L.F.* A non-Gaussian joint statistical model for surface elevation of nonlinear random wave fields // *J. Geophys Res.*– 1983.– v.88.– P.7597-7606.
4. *Hayne G.S.* Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*– 1980.– v.AP-28, № 5.– P.687-692.
5. *Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Challenor P.G., Srokosz M.A., Drinkwater M.R.* ENVISAT radar altimeter tracker bias // *Marine Geodesy.*– 2006.– v.29.– P.19-38, DOI: 10.1080/01490410600582296
6. *Запелов А.С.* Влияние асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности на точность альтиметрических измерений ее

- уровня // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2012.– т.48, № 2.– С.224-231.
7. *Пустовойтенко В.В., Запелов А.С.* Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия – Современное состояние, перспективы и проблемы / Серия «Современные проблемы океанологии».– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып. 11.– 218 с.
 8. *Rodriguez E.* Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters // *J. Geophys. Res.*– 1988.– v.93, № C11.– P.14107-14120.
 9. *Callahan P.S., Rodriguez E.* Retracking of Jason-1 Data // *Marine Geodesy.*– 2004.– v.27.– P.391-407. DOI:10.1080/01490410490902098.
 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. of Atmospheric and Oceanic Technology.*– 2007.– v.24.– P.1102-1116.
 11. *Запелов А.С.* Статистические модели взволнованной морской поверхности. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.– 69 с.
 12. *Gomez-Enri J., Srokosz M.A., Gommenginger C.P., Challenor P.G. Milagro-Pérez M.P.* On the impact of mispointing error and hamming filtering on altimeter waveform retracking and skewness retrieval // *Marine Geodesy.*– 2007.– v.30.– P.217-233, DOI: 10.1080/01490410701438166
 13. *Brown G.S.* The average impulse response of a rough surface and its applications // *IEEE Trans. Antennas Propagat.*– 1977.– v.AP-25, issue 1.– P.67-74.
 14. *Запелов А.С., Пустовойтенко В.В.* К вопросу определения асимметрии распределения возвышений морской поверхности по данным альтиметрических измерений // *Исследования Земли из космоса.*– 2012.– № 5.– С.12-21.
 15. *Challenor P.G., Greco B., Srokosz M.A.* The effect of a non-Gaussian point target response function on radar altimeter returns from the sea surface // *International J. Remote Sensing.*– 1987.– v.8, № 3.– P.309-313. DOI: 10.1080/01431168708948643
 16. *Кендалл М.Дж., Стьюарт А.* Теория распределений / Пер. с англ.– М.: Наука, 1966.– 587 с.
 17. *Запелов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е.* Моделирование плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью рядов Грама-Шарлье // *Океанология.*– 2011.– v.51, № 3.– С.432-439.
 18. *Запелов А.С.* Старшие кумулянты возвышений морской поверхности // *Метеорология и гидрология.*– 2011.– № 9.– С.78-85.
 19. *Mac-Arthur J.L.* SEASAT-A radar altimeter design description // *Applied Physics Lab., Laurel, MD, SDO-5232, Nov.*– 1978.

Материал поступил в редакцию 10.10.2012 г.

АНОТАЦІЯ. Аналізуються особливості методики розрахунку асиметрії розподілу підвищень морської поверхні за даними вимірів альтиметром, встановленим на космічному апараті. Показано, що розрахунок асиметрії за формою відбитого імпульсу, побудованого в рамках моделі Брауна, використанням розподілу Грама-Шарльє для точок дзеркального відображення, призводить до заниження її значення.

ABSTRACT. The features of methods for calculating the skewness of the distribution of sea surface elevations based on measurements altimeter placed on the spacecraft. It is shown that the calculation of the skewness from the shape of the return pulse, which was built at the model of Brown, with the distribution of the Gram-Charlier for the specular points, leads to an underestimation of its value.

