

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Моделирование формы отраженного импульса радиоальтиметраК. В. Показеев^{1,a}, А. С. Запевалов¹, В. В. Пустовойтенко^{2,b}¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*² *Черноморский филиал МГУ имени М. В. Ломоносова. Украина, 99001, Севастополь, ул. Героев Севастополя, д. 7.**E-mail: ^a sea@phys.msu.ru, ^b v2pust@mail.ru*

Статья поступила 20.02.2013, подписана в печать 07.06.2013.

Анализируются возможности и ограничения использования распределения Грама–Шарлье возвышений взволнованной морской поверхности для описания формы отраженного радиоимпульса при вертикальном зондировании. Показано, что для характерных значений асимметрии и эксцесса распределения возвышений морской поверхности расчеты на основе распределения Грама–Шарлье приводят к искажениям формы радиоимпульса, в том числе могут приводить к появлению отрицательных значений. Предложен новый подход, основанный на использовании комбинированной модели распределения возвышения морской поверхности, свободный от недостатков, связанных с распределением Грама–Шарлье.

Ключевые слова: космический аппарат, радиоальтиметр, морская поверхность, модель Брауна, форма отраженного импульса, распределение Грама–Шарлье.

УДК: 537.877+532.5.013. PACS: 41.20.Jb, 47.35.Bb.

Введение

При вертикальном радиозондировании с космическим аппаратом (КА) всю информацию об уровне морской поверхности вдоль его трассы и о ее локальных параметрах несет передний фронт отраженного радиоимпульса [1]. В настоящее время наряду с измерениями уровня моря [2] по данным альтиметрических измерений определяются еще два параметра морской поверхности: значимая высота волн [3] и уровень шероховатости морской поверхности, по которому рассчитывается скорость приводного ветра [4]. Исследуется возможность дистанционного определения асимметрии распределения возвышений взволнованной морской поверхности [5].

Установленные на КА радиоальтиметры работают на длинах волн от 2 до 6 см. Они имеют узкую диаграмму направленности, ширина которой не превышает 3.4° (исключением является альтиметр, установленный на КА «Envisat», с шириной диаграммы направленности 5.25°). Зондирование осуществляется импульсами длительностью порядка одной наносекунды [2].

При вертикальном зондировании морской поверхности отраженный радиосигнал формируется в результате зеркального отражения (этот физический механизм является основным при углах падения до 20° [6]). Форма отраженного импульса альтиметра описывается сверткой трех функций (модель Брауна [7]). Две функции определяются характеристиками альтиметра, установленного на космическом аппарате, третья функция определяется плотностью вероятностей возвышений морской поверхности [8]. Зависимость формы отраженного радиоимпульса от распределения возвышений морской поверхности позволяет решать обратную

задачу, восстанавливать параметры этого распределения [9].

Основной моделью, описывающей распределение возвышений морской поверхности в приложениях, связанных с дистанционным зондированием, является модель, построенная на основе рядов Грама–Шарлье [10, 11]. Ее достоинством является то, что коэффициенты ряда рассчитываются по статистическим моментам изучаемого параметра. Недостаток заключается в том, что в натуральных экспериментах, как правило, определяются статистические моменты не старше четвертого порядка. В результате при построении модели плотности вероятностей могут быть использованы только первые пять (включая нулевой) членов ряда Грама–Шарлье, что приводит к искажениям на «крыльях» распределения, в том числе к появлениям отрицательных значений [12, 13].

Некорректное описание распределений возвышений морской поверхности в свою очередь приводит к искажениям расчетной формы отраженного радиоимпульса. Соответственно появляются ошибки в измерении расстояния от космического аппарата до морской поверхности и в определении ее характеристик [14]. В настоящей работе предложен новый подход к описанию формы отраженного радиоимпульса, основанный на использовании комбинированной модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности.

1. Модель Брауна

При квазивертикальном зондировании средняя форма отраженного от морской поверхности радиоимпульса описывается моделью Брауна [7]

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

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 была 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 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 Доплера можно пренебречь.

Физический процесс формирования формы отраженного от морской поверхности короткого (наносекундного) импульса рассматривался в ряде работ (см., например, [1, 2, 15]). Из этих работ, в частности, следует, что влиянием боковых лепестков в диаграмме направленности антенны альтиметра на формирование переднего фронта короткого (наносекундного) отраженного импульса, можно пренебречь.

Следует также отметить, что зеркальное отражение имеет место при выполнении условия, что длина поверхностной волны много больше длины радиоволны. Мелкомасштабная рябь, не удовлетворяющая этому условию, вызывает диффузное рассеяние, которое приводит к уменьшению мощности квазизеркального отраженного радиолокационного сигнала. Для того, чтобы учесть диффузное рассеяние коэффициент Френеля заменяют эффективным коэффициентом отражения [16]. Согласно [17] эффективный коэффициент отражения меняется в пределах от 0.45 до 0.50 при изменении скорости ветра от 1.5 до 15 м/с.

Будем рассматривать случай, когда форма зондирующего радиопульса является гауссовой:

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

где параметр D_r определяет ширину радиопульса. Будем также полагать, что зондирование осуществляется при нулевом угле падения, и что диаграмма направленности описывается функцией Гаусса. В этом случае форма отраженного от плоской поверхности импульса имеет вид [8]

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

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

Если форма зондирующего импульса $s(t)$ и форма отраженного от плоской поверхности импульса $\chi(t)$ описываются соответственно выражениями (2) и (3), их свертка

$$I(t) = \chi(t) * s(t) =$$

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

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.

Учитывая (1) и (4), получаем, свертку двух функций, где первая функция определяется характеристиками альтиметра, вторая — характеристиками морской поверхности

$$V(t) = I(t) * q(t).$$

Функция $q(t)$ рассчитывается путем преобразования плотности вероятностей возвышений морской поверхности $P(\eta)$ с помощью соотношения, связывающего возвышение поверхности η и время t [8]:

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

Поскольку преобразование (5) является линейным, асимметрия и эксцесс распределений $q(t)$ и $P(\eta)$ численно равны между собой. Отметим, что понижение уровня морской поверхности приводит к увеличению времени возврата радиопульса альтиметра. Следовательно, нечетные статистические моменты распределения $q(t)$ должны иметь противоположный знак, чем моменты возвышения морской поверхности, положительно направленного вверх.

Далее при численном моделировании формы отраженного радиопульса будем полагать, что параметры функций (2)–(4) соответствуют значениям параметров альтиметра, установленного на КА «Seasat»-1: $\theta_w = 1.6^\circ$, $\sqrt{D_r} = 1.327$ нс и $h = 8 \cdot 10^5$ м [2].

2. Модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности

Первоначально форма отраженного радиопульса рассчитывалась в рамках предположения, что распределение возвышений морской поверхности описывается распределением Гаусса. В настоящее время основной моделью плотности вероятностей возвышений морской поверхности, используемой при анализе данных альтиметрических измерений, является модель, построенная на основе рядов Грама–Шарлье [5, 9, 10]. Данная модель позволяет учитывать нелинейные эффекты в поле морских поверхностных волн, приводящие к отклонению распределения возвышений поверхности от распределения Гаусса.

Как правило, при моделировании плотности вероятностей возвышений морской поверхности используется эджвортова форма типа А рядов Грама–Шарлье [18]

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

где H_n — ортогональные полиномы Чебышева–Эрмита n -го порядка; a_n — коэффициенты ряда (6). Предполагается, что среднее значение возвышения $\bar{\eta} = 0$.

На практике расчеты плотности вероятностей возвышений морской поверхности ограничивают первыми членами ряда Грама–Шарлье. При анализе данных альтиметрических измерений используются несколько

форм модели $P_{GC}(\eta)$, которые после введения нормировки $\tilde{\eta} = \eta/\sqrt{\eta^2}$ можно записать в виде

$$P_{GC}^{(1)}(\eta) = \frac{\exp\left(-\frac{\tilde{\eta}^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi\tilde{\eta}^2}} (\tilde{\eta}) \left[1 + \frac{A}{6}H_3(\tilde{\eta})\right], \quad (7)$$

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

$$P_{GC}^{(3)}(\eta) = \frac{\exp\left(-\frac{\tilde{\eta}^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi\tilde{\eta}^2}} \left[1 + \frac{A}{6}H_3(\tilde{\eta}) + \frac{E}{24}H_4(\tilde{\eta}) + \frac{A^2}{72}H_6(\tilde{\eta})\right], \quad (9)$$

где A и E — асимметрия и эксцесс распределения возвышений морской поверхности. Модель (9) была получена в рамках анализа нелинейных эффектов в поле поверхностных волн, обусловленных слабыми межволновыми взаимодействиями [18].

Известным недостатком моделей Грама–Шарлье является то, что они позволяют описать плотность вероятностей только в ограниченной области изменения исследуемого параметра [13]. Для возвышений морской поверхности область, где возможно применение моде-

лей (7)–(9), удовлетворяет условию

$$|\tilde{\eta}| < 2.5. \quad (10)$$

Следствием искажения моделью Грама–Шарлье распределения возвышений морской поверхности за пределами области (10) является искажение рассчитанной с ее помощью формы отраженного радиоимпульса $V_{GC}^{(i)}(t)$ ($i = 1, 2, 3$). При некоторых значениях асимметрии A и эксцесса E в моделях $V_{GC}^{(i)}(t)$, как видно из рис. 1, появляются отрицательные значения. В верхней части рис. 1 показаны общая форма отраженного импульса, рассчитанная по моделям $P_{GC}^{(i)}(\eta)$, а также сами модели $P_{GC}^{(i)}(\tilde{\eta})$. В нижней части рис. 1 приведены фрагменты функций $V_{GC}^{(i)}(t)$ и $P_{GC}^{(i)}(\tilde{\eta})$ в областях, где имеют место отрицательные значения. Приведенные графики наглядно показывают ограничения возможности использовать модели Грама–Шарлье для описания плотности вероятностей возвышений морской поверхности при моделировании отраженного радиоимпульса.

Проблема ограничения области изменения исследуемого параметра, в которой возможно применение моделей Грама–Шарлье, существует также при описании других характеристик поля поверхностных волн, в частности при описании распределения уклонов морской поверхности [19]. Для ее решения в работе [20] предложено использовать комбинированную модель. В об-

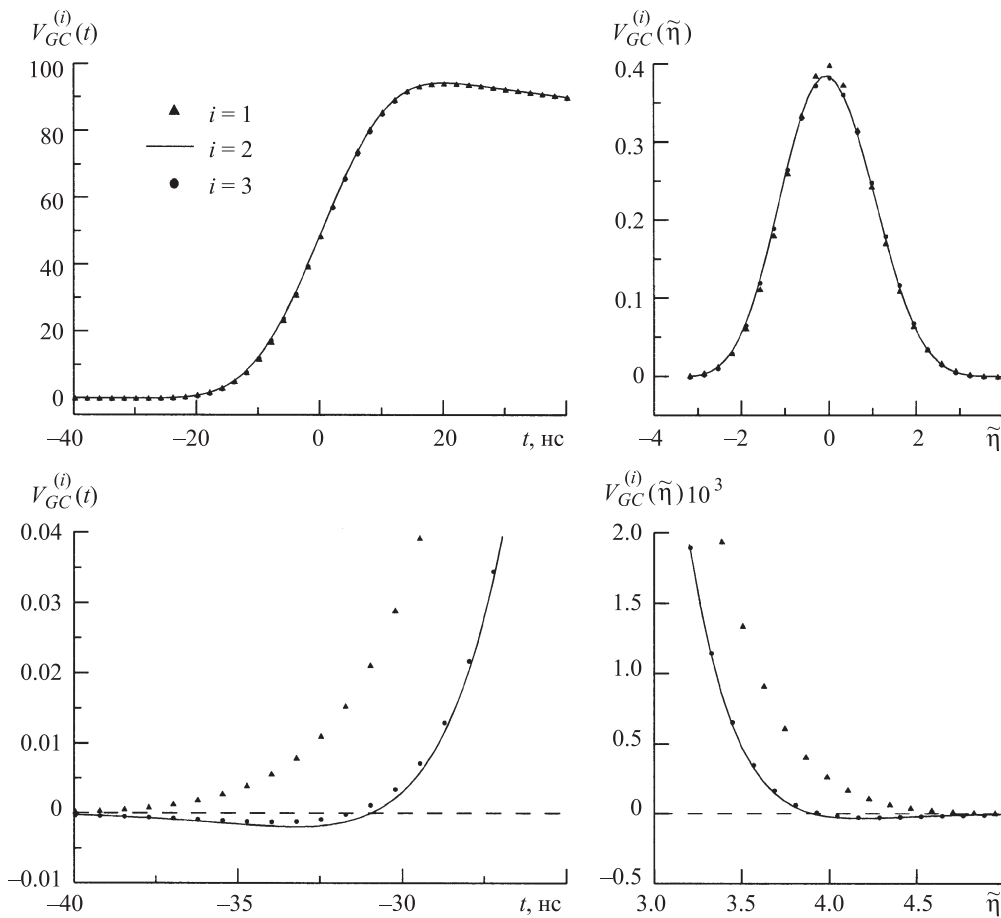


Рис. 1. Формы радиоимпульсов $V_{GC}^{(i)}(t)$, отраженных от морской поверхности, рассчитанные по модели Грама–Шарлье $P_{GC}^{(i)}(\tilde{\eta})$: Расчеты проведены для поля поверхностных волн, имеющего следующие характеристики: $H_s = 5$ м, $A = 0.3$ и $E = -0.3$

ласти (10) комбинированная модель близка к модели Грама–Шарлье, за ее пределами приближается к распределению Гаусса.

В общем виде комбинированную модель можно представить как

$$P_C(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\eta^2}} \exp\left(-\frac{\tilde{\eta}^2}{2}\right) \left\{ 1 + F(\tilde{\eta}) \sum_{n=3}^m a_n H_n(\tilde{\eta}) \right\},$$

где F — фильтр. Фильтр F должен быть близок к единице в области (10) и стремиться к нулю за пределами этой области. В качестве фильтра используется двухпараметрическая функция

$$F(\tilde{\eta}) = \exp\left[-\left(\frac{|\tilde{\eta}|}{d}\right)^n\right], \quad (11)$$

где параметр d определяет область, внутри которой $F(\tilde{\eta}) \approx 1$, параметр n определяет скорость, с которой функция F стремится к нулю за пределами этой области. При моделировании распределений характеристик морской поверхности оптимальным является выбор $n = 3.5$ [21].

Как было отмечено выше, в некоторых ситуациях в модели Грама–Шарлье появляются отрицательные значения при относительно небольших величинах $|\tilde{\eta}|$. Так, например, при $A = 0.17$ и $E = -0.18$ отрицательные значения в модели Грама–Шарлье появляются в области $\tilde{\eta} < -3.1$ (рис. 2). Отметим, что комбинированная модель может также иметь отрицательные значения, если неправильно выбран параметр d . В частности, при указанных значениях асимметрии и эксцесса в модели $P_C(\tilde{\eta})$ появляются отрицательные значения, если $d = 4.5$ и $d = 4$. При уменьшении d отрицательные значения в комбинированной модели не появляются. При $d \leq 3$ в области $|\tilde{\eta}| > 3$ комбинированная модель везде положительна.

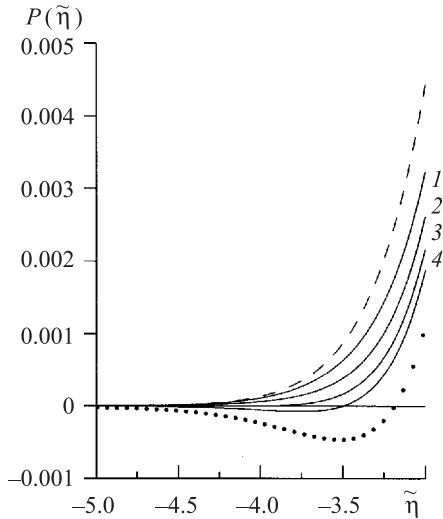


Рис. 2. Плотности вероятностей возвышений взволнованной поверхности $P(\tilde{\eta})$: сплошные кривые — комбинированная модель (1 — $d = 3$, 2 — $d = 3.5$, 3 — $d = 4$, 4 — $d = 4.5$); пунктир — модель Грама–Шарлье; штриховая линия — распределение Гаусса. Расчет при $A = 0.17$ и $E = -0.18$

Введем параметр $\tilde{\eta}_F$, соответствующий частоте среза в частотных фильтрах. Аналогично принятому в ра-

диотехнике для частотных фильтров условие его можно определить из соотношения $F(\tilde{\eta} = \tilde{\eta}_F) = 0.707$. При $n = 3.5$ связь параметров $\tilde{\eta}_F$ и d можно аппроксимировать выражением $\tilde{\eta}_F = 0.74d$. Поскольку модель Грама–Шарлье справедлива только в пределах области (10), значение параметра d естественно принять равным 3, что соответствует $\tilde{\eta}_F \approx 2.5$.

Комбинированная модель должна удовлетворять условию $P_C(\tilde{\eta}) > 0$ при всех наблюдаемых для распределения возвышений морской поверхности значениях асимметрии и эксцесса. По измерениям в натуральных условиях получены следующие результаты. При значимой высоте волн $H_s < 4$ м по данным измерений, выполненных на Черном море, оценки асимметрии A и эксцесса E меняются соответственно в диапазонах $-0.2 < A < 0.4$, $-0.4 < E < 0.9$ [3]. При значимой высоте волн $H_s > 4.5$ м, по данным измерений, выполненных в Северном море, оценки асимметрии A и эксцесса E меняются соответственно в диапазонах $-0.05 < A < 0.4$ и $-0.4 < E < 0.4$ [22]. При сильных штормах ($H_s > 10$ м) в ситуациях, когда наблюдались аномальные волны, т. е. волны, высота которых более чем в два раза превышала значимую высоту, изменения статистических моментов наблюдались в пределах $0.20 < A < 0.51$, $0.23 < E < 1.53$ [23].

Расчеты показывают, что условие $P_C(\tilde{\eta}) > 0$ выполняется при любых значениях асимметрии и эксцесса, лежащих внутри наблюдаемых в натуральных условиях диапазонов их изменений.

3. Расчет формы отраженного радиоимпульса на основе комбинированной модели $P_C(\eta)$

Если плотность вероятностей возвышений морской поверхности $P(\eta)$ и соответственно функция $q(t)$ описаны некорректно в области, соответствующей высоким гребням волн, то возникают искажения переднего фронта отраженного радиоимпульса. В частности, если имеют место отрицательные значения $P(\eta)$ при $\eta > 0$, то могут иметь место отрицательные значения в модели $V(t)$.

Некорректное описание $P(\eta)$ в области впадин волн практически не влияет на модель переднего фронта отраженного радиоимпульса. Связано это с тем, что когда передний фронт зондирующего радиоимпульса достигает впадин, основной вклад в отраженный сигнал дают участки поверхности, для которых выполняется условие (10). На этой стадии изменение интенсивности отраженного радиосигнала определяется изменением площади облучаемой поверхности [24].

Рассмотрим ситуацию, когда распределение возвышений морской поверхности описывается комбинированной моделью $P_C(\eta)$. Функция $q_C(t)$ имеет вид

$$q_C(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp\left(-\frac{t^2}{2D}\right) \times \left\{ 1 + F\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) \sum_{n=3}^m (-1)^n a_n H_n\left(\frac{t}{\sqrt{D}}\right) \right\},$$

где $D = (4/c^2)\tilde{\eta}^2$. Индекс C показывает, что данная характеристика рассчитана для комбинированной модели.

Формы отраженных радиоимпульсов, построенных с помощью комбинированной модели, представлены на

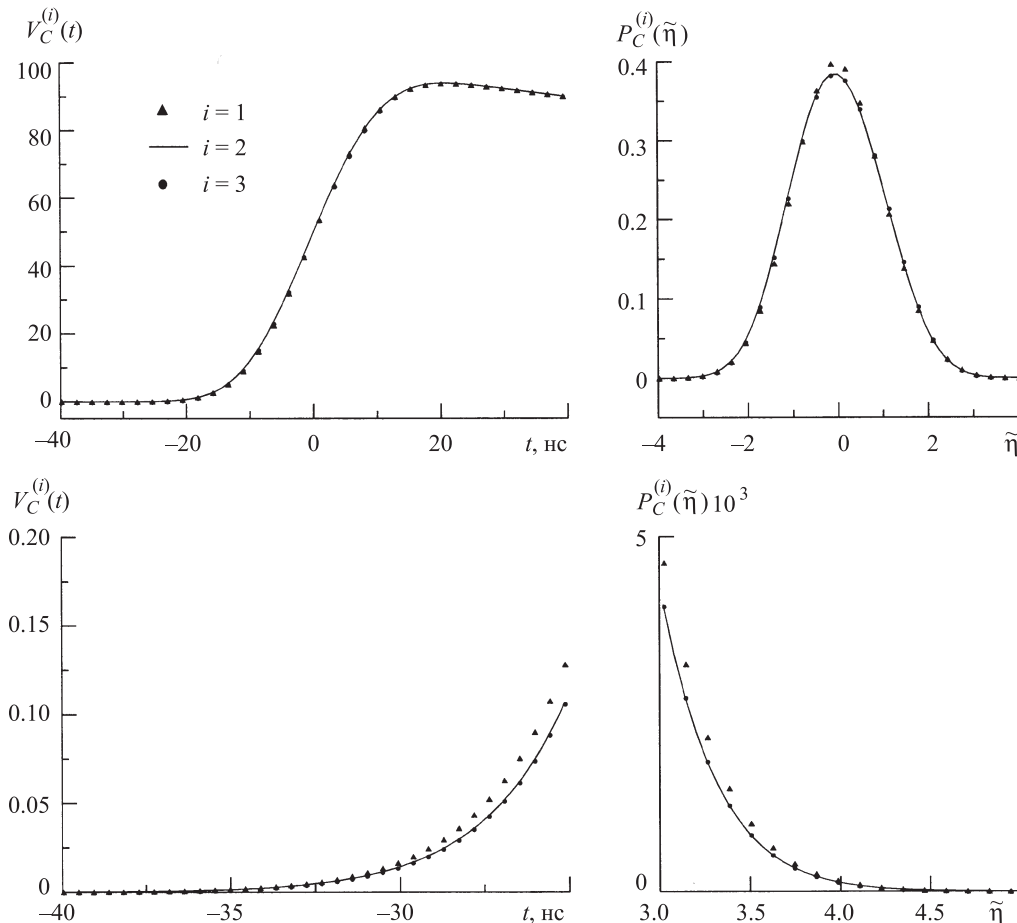


Рис. 3. Формы радиоимпульсов $V_C^{(i)}(t)$, отраженных от морской поверхности, рассчитанные по комбинированной модели $P_C^{(i)}(\tilde{\eta})$: Расчеты проведены для поля поверхностных волн, имеющего следующие характеристики: $H_s = 5$ м, $A = 0.3$ и $E = -0.3$

рис. 3. Расчеты выполнены при тех же значениях асимметрии A и эксцесса E , при которых рассчитывались формы отраженных радиоимпульсов по моделям Грама–Шарлье, представленные на рис. 1. Сравнение рис. 1 и 3 показывает, что в области, где при расчетах по моделям Грама–Шарлье имели место отрицательные значения интенсивности отраженного радиоимпульса, при расчетах по комбинированным моделям они отсутствуют.

Заключение

Проведен анализ возможностей использования распределения Грама–Шарлье возвышений взволнованной морской поверхности для описания формы отраженного радиоимпульса при вертикальном зондировании. Показано, что ограничение области возвышений морской поверхности, в пределах которой справедливы модели Грама–Шарлье $P_{GC}^{(n)}(\eta)$ ($n = 1, 2, 3$), приводит к искажениям формы отраженного радиоимпульса. Наглядным проявлением этих искажений является появление отрицательных значений в расчетной форме отраженного радиоимпульса.

Предложен новый подход, основанный на использовании комбинированной модели распределения возвышения морской поверхности. В области (10) комбинированная модель близка к модели Грама–Шарлье, за ее

пределами приближается к распределению Гаусса. 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.

Список литературы

1. Callahan P.S., Rodriguez E. // Marine Geodesy. 2004. **27**. P. 391.
2. Пустовойтенко В.В., Запезалов А.С. Оперативная океанография. Спутниковая альтиметрия: современное состояние, перспективы и проблемы. Севастополь, 2012.
3. Queffelec P. // Marine Geodesy. 2004. **27**. P. 495.
4. Cheng Y., Xu Q., Liu Y. et al. // Intern. J. Remote Sensing. 2008. **29**, N 19. P. 5699.
5. Запезалов А.С., Пустовойтенко В.В. // Исследования Земли из космоса. 2012. № 5. С. 12.
6. Valenzuela G. // Boundary Layer Meteorology. 1978. **13**, N 1–4. P. 61.
7. Brown G.S. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1977. **AP-25**. P. 67.
8. Hayne G.S. // IEEE Trans Antennas Propagat. 1980. **AP-28**. P. 687.
9. Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G. // J. Atmos. Ocean. Technol. 2007. **24**. P. 1102.
10. Rodriguez E., Chapman B. // J. Geoph. Res. 1989 **94**, N C7, P. 9761.

11. *Gómez-Enri J., Srokosz M.A., Gommenginger C.P. et al. // Marine Geodesy. 2007. 30. P. 217.*
12. *Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Теория распределений. М., 1966.*
13. *Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е. // Океанология. 2011. 51, № 3. С. 432.*
14. *Запевалов А.С. // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2012. 48, № 2. С. 224.*
15. *Mailhes C., Tourneret J.-Y., Severini J., Thibaut P. // Eur. Signal and Image Processing Conference (EUSIPCO 2008). Lausanne (Switzerland), 2008.*
16. *Wu S.T., Fung A.K. // J. Geophys. Res. 1972. 77, N 30. P. 5917.*
17. *Freilich M.H., Vanhoff B.A. // J. Atmos. Ocean. Technol. 2003. 20, N 4. P. 549.*
18. *Huang N.E., Long S.R. // J. Fluid Mech. 1980. 101, N 1. P. 179.*
19. *Cox C., Munk W. // J. Mar. Res. 1954. 13, N 2. P. 198.*
20. *Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. 53, № 2. С. 110.*
21. *Запевалов А.С. Статистические модели взволнованной морской поверхности для задач дистанционного зондирования. Saarbrücken, 2012.*
22. *Jha A.K., Winterstein S.R. // Proc. 19th Intern. Offshore Mech. Arctic Eng. Symp. ASME. Paper No. OMAE 00-6125.*
23. *Guedes Soares C., Cherneva Z., Antão E.M. // Applied Ocean Res. 2003. 25. P. 337.*
24. *Barrick, D.E., Lipa B.J. // Satellite Oceanic Remote Sensing. Adv. in Geophys. 1985. 27. P. 61.*

Simulation radar altimeter return waveform

K. V. Pokazeev^{1,a}, A. S. Zapevalov¹, V. V. Pustovoytenko^{2,b}

¹*Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

²*Black Sea Branch, M. V. Lomonosov Moscow State University. Sevastopol 99001, Ukraine.*

E-mail: ^asea@phys.msu.ru, ^bv2pust@mail.ru.

The possibilities and limits of the Gram–Charlier distribution rough sea surface elevations to describe the shape of the return waveform at vertical sounding. It is shown that for typical values of skewness and kurtosis distribution of sea surface elevation calculations based on the distribution of the Gram–Charlier distort the return waveform, including the appearance negative values. A new approach based on the use of a combined model of distribution of elevation of the sea surface that is free of the disadvantages associated with the Gram–Charlier distribution.

Keywords: satellite, radioaltimetr, sea surface, model of Brown, the Gram–Charlier distribution, return waveform.

PACS: 41.20.Jb, 47.35.Bb.

Received 7 June 2013.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2013).

Сведения об авторах

1. Показеев Константин Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-16-77; e-mail: sea@phys.msu.ru.
2. Запевалов Александр Сергеевич - доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (0692) 41-05-73, e-mail: sevzepter@mail.ru.
3. Пустовойтенко Владимир Владимирович - канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (0692) 24-01-83, e-mail: v2pust@mail.ru.