

Определение старших кумулянтов уклонов морской поверхности по данным квазивертикального радиозондирования

К. В. Показеев,^{1, а} А. С. Запечалов^{2, б}

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 Морской гидрофизический институт РАН. Россия, 299011, Севастополь, Капитанская ул., д. 2.

Поступила в редакцию 27.04.2018, после доработки 12.07.2018, принята к публикации 16.08.2018.

Проведен анализ возможностей и ограничений определения асимметрии и эксцесса уклонов по данным радиозондирования на углах, где рассеянный назад сигнал определяется механизмом квазизеркального отражения. Показано, что прямое восстановление асимметрии и эксцесса на основе зависимости нормированного сечения обратного рассеяния от угла падения приводит к значительным ошибкам. Определение этих параметров путем минимизации расхождений между эмпирической плотностью вероятностей и заданного *a priori* усеченного ряда Грамма–Шарлье существенно зависит от выбора данной модели.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, уклоны морской поверхности, квазизеркальное отражение.

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

ВВЕДЕНИЕ

При радиозондировании морской поверхности под малыми углами падения регистрируемый локатором сигнал определяет механизм квазизеркального отражения. В приближении Кирхгофа амплитуда рассеянного назад сигнала пропорциональна плотности вероятностей уклонов морской поверхности [1], что позволяет решать обратную задачу, восстанавливать распределение уклонов по данным радиозондирования [2–4].

Морское волнение является слабо нелинейным процессом. Нелинейность определяют несколько физических механизмов, роль которых различна на разных длинах поверхностных волн. Такими механизмами являются межволновое взаимодействие [5, 6], кинематическая нелинейность профиля волн конечной амплитуды [7], динамическое воздействие длинных волн на более короткие [8], модуляционная неустойчивость Бенджамин–Фейра [9] и ряд других. Вследствие слабой нелинейности морских волн распределения их характеристик (уклонов и возвышений) являются квазигaussianными [10, 11].

Расчет старших статистических кумулянтов распределения уклонов морской поверхности (асимметрии и эксцесса) по данным квазивертикального зондирования осуществляется путем минимизации расхождений между эмпирическими плотностями вероятностей и усеченным распределением Грама–Шарлье. Эта процедура реализуется при зондировании в радиодиапазоне [3], когда рассеянный назад сигнал формируют поверхностные волны, длина которых много больше длины зондирующей радиоволны. Эта же процедура используется при расчетах старших кумулянтов при зондировании в оптическом диапазоне [12–14]. Принципиальное различие заключается в том, что в отличие от оптического зондирования при радиозондировании механизм квазизеркального отражения преобладает только при малых углах падения [15]. Таким образом, при радиозондировании можно получить информацию только об уклонах, соответствующих этим углам.

В настоящей работе анализируются возможности и ограничения определения асимметрии распределения уклонов морской поверхности по данным квазивертикального радиозондирования. Рассмотрены два фактора. Первый фактор — ограниченный диапазон уклонов, информация о которых может быть получена при радиозондировании. Второй фактор — соответствие усеченного распределения Грама–Шарлье реальному распределению уклонов морской поверхности.

1. КВАЗИЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

При зондировании морской поверхности под малыми углами падения регистрируемый сигнал формирует механизм квазизеркального отражения [1, 16]. Зеркальное отражение, описываемое в рамках приближения геометрической оптики, создает поверхностные волны, длина которых λ много больше длины радиоволн Λ (далее эти волны будем называть длинными). Поверхностные волны, длина которых сравнима или меньше длины радиоволны, создают диффузное рассеяние.

Регистрируемый радиолокатором сигнал описывается выражением

$$\sigma = \pi \sec^4 \theta |R_{\text{eff}}|^2 P(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp}) \Big|_{\xi_{\uparrow} = \text{tg } \theta, \xi_{\perp} = 0}, \quad (1)$$

где σ — нормированное сечение обратного рассеяния, R_{eff} — эффективный коэффициент отражения, P — двумерная функция плотности вероятностей уклонов, ξ_{\uparrow} — уклон морской поверхности в плоскости зондирования, ξ_{\perp} — уклон морской поверхности в ортогональной плоскости. Функция $P(\xi_{\uparrow}, \xi_{\perp})$ описывает распределение уклонов, создаваемых волнами, для которых выполняется условие $\lambda \gg \Lambda$. Введение коэффициента R_{eff} обусловлено тем, что присутствие поверхностных волн, длина которых сравнима или меньше Λ приводит к диффузному рассеянию [18].

Основной объем информации об уклонах морских волн получен оптическими методами [12, 13, 17], которые позволяют определить дисперсию, создаваемую волнами всех масштабов [19]. Для выделения части дисперсии уклонов s_L^2 , обусловленной длинными волнами, в работе предложена полуэмпирическая модель [20]

^а E-mail: sea@phys.msu.ru

^б E-mail: sevzepter@mail.ru

$$s_L^2(f) = \begin{cases} (0.3 + 0.02f) s_o^2 & \text{при } f < 35 \text{ ГГц,} \\ s_o^2 & \text{при } f \geq 35 \text{ ГГц,} \end{cases}$$

где f — частота радиоволны, s_o^2 — дисперсия уклонов, полученная оптическими методами. Для расчетов $s_L^2(f)$ используются регрессионные зависимости Кокса—Манка [12]

$$s_{ou}^2 = 0.001 + 0.00316 W, \quad (2)$$

$$s_{oc}^2 = 0.003 + 0.00185 W, \quad (3)$$

где s_{ou}^2 и s_{oc}^2 — дисперсии продольной и поперечной компонент уклонов, W — скорость ветра.

Механизм квазизеркального отражения преобладает при зондировании под малыми углами падения, при больших углах падения преобладает резонансный механизм рассеяния. Границей между областями, где доминируют разные механизмы, является угол падения θ_0 , значения которого находятся в диапазоне от 10° до 20° [21]. Значение θ_0 меняется с изменением скорости приводного ветра. С увеличением скорости ветра уровень шероховатости рассеивающей поверхности растет и угол падения θ_0 смещается в сторону меньших значений.

Большинство установленных на космических аппаратах радиолокаторов работают на сантиметровых или дециметровых длинах волн. Диапазоны длин волн (или частот), принятые при радиозондировании Земли из космоса, приведены в таблице.

Возможности восстановления статистических моментов уклонов морской поверхности определяются тем, в каком диапазоне уклонов можно определить их плотность вероятностей по данным дистанционного зондирования. Границы этого диапазона определяются или техническими характеристиками радиолокатора (максимальный угол сканирования θ_{\max}), или физической характеристикой θ_0 , соответствующей границе между областями в которой доминируют механизмы квазизеркального отражения и резонансного рассеяния. Примем, что значение параметра θ_R является наименьшим из двух указанных параметров

$$\theta_R = \begin{cases} \theta_{\max}, & \text{если } \theta_{\max} \leq \theta_0, \\ \theta_0, & \text{если } \theta_{\max} > \theta_0. \end{cases}$$

Введем зависящий от скорости ветра безразмерный параметр $R(W) = \nu \theta_R / s_L(W)$. Здесь ν является коэффициентом пересчета углов, измеренных в градусах, в радианы. Введение параметра $R(W)$ соответствует замене переменной функции плотности вероятностей уклонов $P(x)$ на $x/s_L(W)$. Результаты расчетов параметра R представлены на рис. 1. Расчеты для зондирования вдоль и поперек направления ветра проводились для средних значений частот, указанных

Таблица. Диапазоны частот и длин волн радиолокаторов

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см
<i>L</i>	1–2	30–15
<i>S</i>	2–4	15–7.5
<i>C</i>	4–8	7.5–3.75
<i>X</i>	8–12	3.75–2.5
<i>Ku</i>	12–18	2.5–1.67

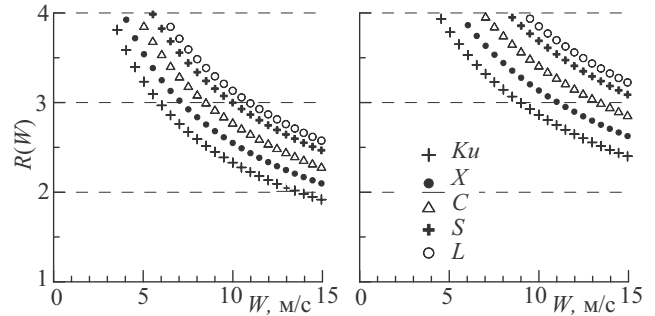


Рис. 1. Зависимости параметра $R(W) = \theta_{\max} / s_L(W)$ от скорости ветра W . Левый фрагмент — зондирование вдоль направления ветра; правый — зондирование поперек направления ветра

в таблице радиодиапазонов, при $\theta = 18^\circ$. Увеличение или уменьшение параметра θ_R приведет соответственно к расширению или сужению диапазона, в котором при заданной скорости ветра определяется случайная величина $x/s_L(W)$.

Таким образом, если оценивать статистические моменты уклонов по данным квазизеркального зондирования, то полученные оценки будут соответствовать оценкам усеченного распределения.

2. ЭФФЕКТ ОГРАНИЧЕННОГО ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЯЕМЫХ УКЛОНОВ

Морское волнение является слабо нелинейным процессом. Распределения характеристик подобных процессов, как правило, описываются распределением Грама—Шарлье, основанном на разложении в ряд по производным функции $PN(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-x^2/2)$ [22]. Обычно при моделировании морской поверхности используется эджвортова форма типа А рядов Грама—Шарлье, коэффициенты которых выражены через кумулянты λ_n случайной величины x (возвышение или уклон).

Измерение старших кумулянтов морской поверхности λ_n ($n > 4$) является сложной технической задачей. Поэтому при аппроксимации функции плотности вероятностей параметров морской поверхности, как правило, используется усеченное распределение Грама—Шарлье. Распределение случайной величины x с дисперсией, равной единице, имеет вид

$$P_1(x) = PN(x) \left[1 + \frac{\lambda_3}{6} H_3(x) + \frac{\lambda_4}{24} H_4(x) \right], \quad (4)$$

где λ_3 и λ_4 — асимметрия и эксцесс.

Известным недостатком усеченного распределения Грама—Шарлье является то, что они позволяют описать функцию плотности вероятностей только в ограниченной области изменения случайной величины x [23]. Для уклонов морских волн эта область задана соотношением $|x| \leq 2.5$ [12]. Поэтому для дальнейшего анализа будем также использовать аналитическую модель плотности вероятностей $P_A(x)$, которая не имеет указанного ограничения [24]. Модель состоит из двух имеющих разный вес составляющих, каждая из которых соответствует нормальному закону

$$P_A(x) = \frac{\alpha}{s_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - m_1)^2}{2s_1^2} \right] + \frac{1 - \alpha}{s_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - m_2)^2}{2s_2^2} \right], \quad (5)$$

где m_j и s_j — параметры j -го слагаемого ($j = 1, 2$), α — безразмерный параметр. Параметры модели определяются из условия равенства первых четырех статистических моментов заданным значениям. Модель $P_A(x)$ протестирована на данных прямых измерений уклонов, полученных с помощью лазерного уклономера [17].

Для анализа рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности, как правило, используются данные об изменчивости кумулянтов уклонов, полученные по аэрофотографиям морской поверхности [12]. При скорости ветра до 14 м/с значения асимметрии продольной (вдоль направления ветра) компоненты уклонов в основном лежат в пределах от 0 до -0.4 . Эксцесс продольной и поперечной компонент не зависит от скорости ветра и, соответственно, равен 0.23 ± 0.41 и 0.40 ± 0.23 . Асимметрия поперечной компоненты предполагается равной нулю. Дисперсии компонент уклонов описываются выражениями (2) и (3). Близкие значения кумулянтов уклонов были недавно получены с помощью установленных на спутниках оптических сканеров [13].

Функции плотности вероятностей, построенные по моделям (4) и (5), представлены на рис. 2. Расчеты проведены для кумулянтов, соответствующих средним значениям продольной компоненты уклонов. Предполагается, что среднее значение случайной величины x равно нулю, дисперсия равна единице.

Выше было отмечено, что по данным сканирования установленным на спутнике радиолокатором, используя выражение (1), можно восстановить функцию плотности вероятностей морской поверхности только в некотором ограниченном диапазоне уклонов. Рассмотрим, как меняются расчетные значения кумулянтов, полученные по статистическим моментам

$$\mu_n = \int_{-\theta_R}^{\theta_R} x^n P(x) dx, \quad (6)$$

в зависимости от пределов усеченного распределения θ_R . Результаты расчетов дисперсии $\lambda_2(\theta_R)$, асимметрии $\lambda_3(\theta_R)$ и эксцесса $\lambda_4(\theta_R)$ приведены на рис. 3. Расчеты для трех скоростей ветра проведены для тех же функций плотности вероятностей $P_{G-C}(x)$ и $P_A(x)$, которые представлены на рис. 2. Левые фрагменты рис. 3 соответствует зондированию в Ku -диапазоне,

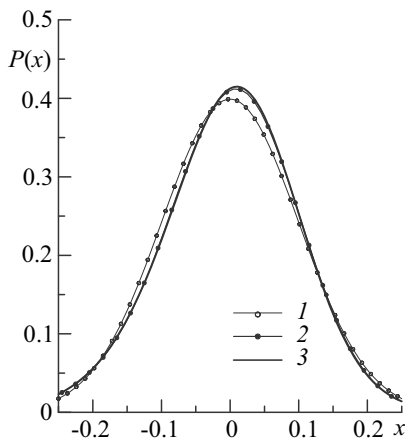


Рис. 2. Модели функций плотности вероятностей $P(x)$. Кривая 1 — распределение Гаусса; кривая 2 — $P_{G-C}(x)$; кривая 3 — $P_A(x)$

правые соответствует зондированию в L -диапазоне. Для удобства сравнения дисперсии даны в нормированном виде $\tilde{\lambda}_2 = \lambda_2/s_L$. Расчеты проведены для ситуации, когда истинные значения асимметрии и эксцесса, полученные при интегрировании плотности вероятностей по всей области изменения случайной величины x , соответственно равны -0.2 и 0.4 .

Результаты расчетов, представленные на рис. 3, показывают, что при зондировании в обоих радиодиапазонах близкие к истинным значениям оценки асимметрии и эксцесса могут быть получены только при слабых ветрах и углах θ_R приближающихся к 20° .

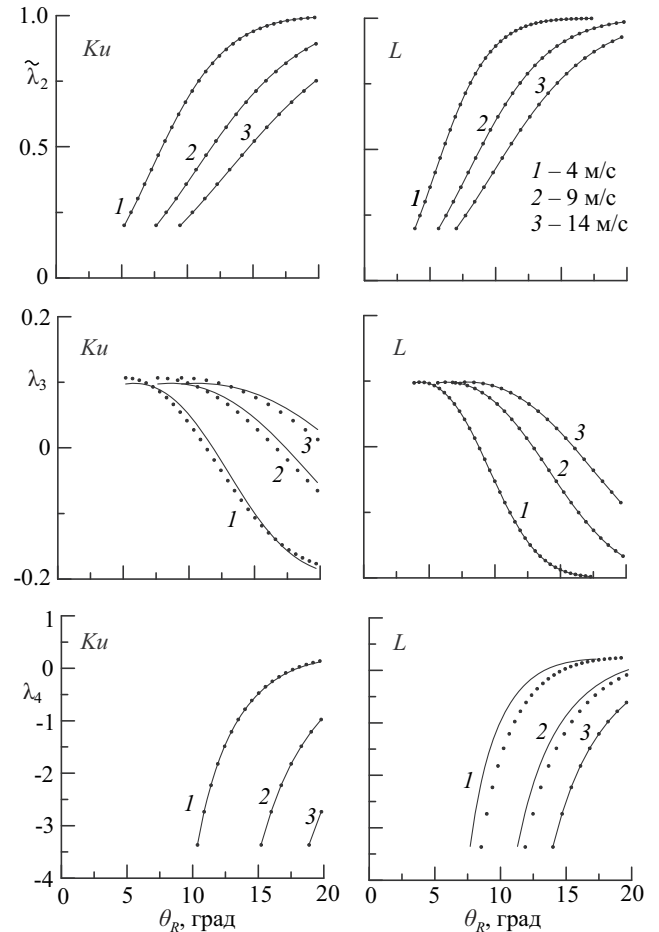


Рис. 3. Зависимости значений дисперсии $\tilde{\lambda}_2$, асимметрии λ_3 и эксцесса λ_4 от пределов θ_R , в которых определены функции плотности вероятностей $P_{G-C}(x)$ (сплошные линии) и $P_A(x)$ (пунктирные линии)

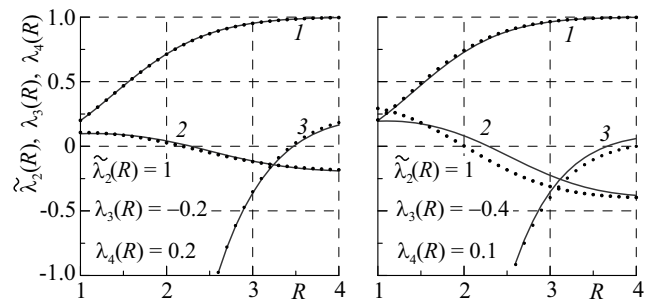


Рис. 4. Зависимости значений дисперсии $\tilde{\lambda}_2$ (кривая 1), асимметрии λ_3 (кривая 2) и эксцесса λ_4 (кривая 3) от параметра R . Сплошные линии — расчет по модели $P_{G-C}(\tilde{x})$; пунктирные линии — расчет по модели $P_A(\tilde{x})$

Перейдем к нормированным значениям уклонов и проведем замену переменных в функциях плотности вероятностей $P_{G-C}(x)$ и $P_A(x)$. Эта процедура позволяет построить обобщенные графики зависимости расчетных значений дисперсии, асимметрии и эксцесса как функций безразмерного параметра R . Результаты представлены на рис. 4. Чем выше порядок кумулянта, тем сильнее проявляется эффект ограниченного диапазона изменения случайной величины. Значения асимметрии при $R \approx 3-4$ заметно занижены, при $R \approx 2-2.5$ асимметрия меняет знак на противоположный.

Отметим, что в целом результаты расчетов по двум моделям плотности вероятностей уклонов морской поверхности (4) и (5) близки.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАМА—ШАРЛЬЕ

В предыдущем разделе было показано, что прямое восстановление асимметрии и эксцесса компонент уклонов морской поверхности, создаваемых длинными волнами, по зависимости нормированного сечения обратного рассеяния радиоволн от угла падения приводит к значительным ошибкам. Существует альтернативный подход, в котором кумулянты рассчитываются путем минимизации расхождений между *a priori* заданной функцией плотности вероятностей и эмпирической функцией плотности вероятностей, определенной согласно (1).

Указанный подход был использован при расчете дисперсий уклонов длинных волн по данным измерений, проведенных с помощью установленного на спутнике сканирующего радиолокатора [25]. Предполагалось, что уклоны распределены по закону Гаусса. Для расчетов использовались данные дождевого радиолокатора (precipitation radar), предназначенного для изучения атмосферных осадков, технические возможности которого позволили также проводить исследования структуры морской поверхности. Дождевой радиолокатор работает в *Ku*-диапазоне, сканирование осуществляется в пределах $\pm 18^\circ$ [26].

Этот же подход был использован для определения асимметрии и эксцесса компонент уклонов морской поверхности по данным измерений дождевого радиолокатора [3, 4]. Предполагалось, что распределение уклонов описывается усеченным распределением Грама—Шарлье и что коэффициенты при старших членах ряда (выше четвертого порядка) равны нулю. Проанализируем, насколько критичен выбор априорной модели функции плотности вероятностей. Для этого сравним эмпирическую плотность вероятностей уклонов морской поверхности P_E (гистограмму) с моделями, построенными на основе усеченных рядов Грама—Шарлье.

В общем случае распределение Грама—Шарлье имеет вид

$$P_{G-C}(x) = PN(x) \left[1 + \frac{\lambda_3}{6} H_3(x) + \frac{\lambda_4}{24} H_4(x) + \frac{\lambda_5}{120} H_5(x) + \frac{\lambda_6 + 10 \lambda_3^2}{720} H_6(x) + \frac{\lambda_7 + 35 \lambda_4 \lambda_3}{5040} H_7(x) + \frac{\lambda_8 + 56 \lambda_5 \lambda_3 + 35 \lambda_4^2}{40320} H_8(x) + \dots \right].$$

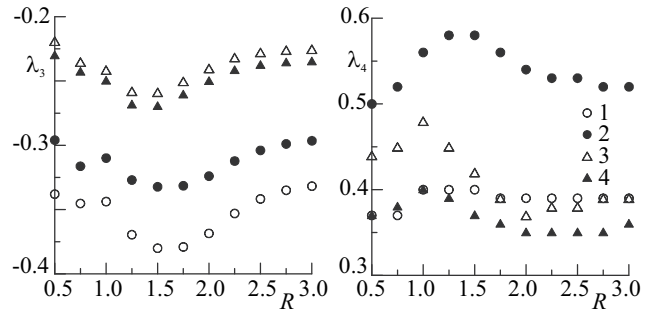


Рис. 5. Влияние выбора априорной модели функции плотности вероятностей $P_j(x)$ ($j = 1, \dots, 4$) на расчетные значения асимметрии λ_3 и эксцесса λ_4

Рассмотрим четыре модели, построенные на основе распределения Грама—Шарлье: модель (4), а также следующие модели:

$$P_2(x) = PN(x) \left[1 + \frac{\lambda_3}{6} H_3(x) + \frac{\lambda_4}{24} H_4(x) + \frac{\lambda_3^2}{72} H_6(x) \right];$$

$$P_3(x) = PN(x) \left[1 + \frac{\lambda_3}{6} H_3(x) + \frac{\lambda_4}{24} H_4(x) + \frac{\lambda_3^2}{72} H_6(x) + \frac{\lambda_4 \lambda_3}{144} H_7(x) \right];$$

$$P_4(x) = PN(x) \left[1 + \frac{\lambda_3}{6} H_3(x) + \frac{\lambda_4}{24} H_4(x) + \frac{\lambda_3^2}{72} H_6(x) + \frac{\lambda_4 \lambda_3}{144} H_7(x) + \frac{\lambda_4^2}{72} H_8(x) \right].$$

В качестве эталонной функции будем использовать гистограмму продольной компоненты уклонов, построенную по данным прямых измерений уклонов, на океанографической платформе, расположенной в Черном море. Гистограмма получена при скорости ветра 6–7 м/с, с параметрами $\lambda_3 = -0.152$, $\lambda_4 = 0.386$. Аппаратура и условия измерений описаны в работе [17].

Результаты расчетов представлены на рис. 5. Здесь параметр R обозначает диапазон уклонов, в котором гистограмма P_E аппроксимируется функциями $P_i(x)$ ($i = 1 \dots 4$). Видно, что полученные значения λ_3 и λ_4 существенно зависят как от выбора функции $P_i(x)$, так и от параметра R . Разброс расчетных значений асимметрии и эксцесса может достигать 50%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ восстановления характеристик уклонов, создаваемых длинными (по сравнению с длиной радиоволны) поверхностными волнами по данным радиозондирования с космических аппаратов. Данные радиозондирования с космических аппаратов при малых углах падения позволяют определить плотность вероятностей уклонов морской поверхности в ограниченном диапазоне.

Существуют два пути восстановления асимметрии и эксцесса уклонов. Первый — прямой расчет с помощью выражения (6). В этом случае эффект ограниченного диапазона уклонов, в котором определена функция плотности вероятностей, приводит к существенным ошибкам, которые зависят от длины зондирующей волны и скорости ветра. Ошибки настолько велики, что при зондировании в *Ku*- и *X*-диапазонах при больших

скоростях ветра расчетное значение асимметрии может иметь знак, противоположный истинному значению. Изменение расчетного знака эксцесса происходит при скоростях ветра 5–7 м/с.

Второй путь восстановления асимметрии и эксцесса уклонов — подгонка определенной по данным радиозондирования плотности вероятностей уклонов под *a priori* заданную модель. В качестве такой модели в настоящее время используется усеченное распределение Грама—Шарлье. Показано, что в зависимости от выбора членов усеченного ряда, расчетные значения асимметрии и эксцесса могут существенно различаться.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0003 (шифр «Океанологические процессы»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басс Ф. Г., Фуке И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука. 1972.
2. Караев В. Ю., Каневский М. Б. // Исследование Земли из космоса. 1999. № 4. С. 14.
3. Chu X., He Y., Chen G. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2012. **50**. P. 4014.
4. Chen P., Yin Q., Huang P. // Chinese J. Oceanology and Limnology. 2015. **33**, N 5. P. 1142.
5. Phillips O. M. // J. Fluid Mech. 1961. **11**, N 1. P. 143.
6. Longuet-Higgins M. S. // J. Fluid Mech. 1963. **17**, N 3. P. 459.
7. Stokes G. G. // Trans. Cambridge Philos. Soc. 1849. **8**. P. 197.
8. Longuet-Higgins M. S. // J. Phys. Oceanogr. 1982. **12**. P. 1283.
9. Zakharov V. E. // Journal of European Mechanics B-fluids. 1999. **18**, N 3. P. 327.
10. Пустовойтенко В. В., Лебедев Н. Е. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. **12**, № 1. С. 102.
11. Лебедев Н. Е., Алескерова А. А., Плотников Е. М. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. **13**, № 3. С. 136.
12. Cox C., Munk W. // J. Optical. Soc. America. 1954. **44**, N 11. P. 838.
13. Brèon F. M., Henriot N. // J. Geoph. Res. 2006. **111**, N 6. C06005.
14. Запезалов А. С. // Оптика атмосферы и океана. 2017. **30**, № 9. С. 789.
15. Valenzuela G. // Boundary Layer Meteorology. 1978. **13**, № 1–4. P. 61.
16. Бреховских Л. М. // ЖЭТФ. 1952. **23**, № 3. С. 275.
17. Запезалов А. С. // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 1. С. 51.
18. Wu S. T., Fung A. K. J. // Geophys. Res. 1972. **77**. N 30. P. 5917.
19. Данилычев М. В., Николаев А. Н., Кутуза Б. Г. // Радиотехника и электроника. 2009. **54**, № 8. С. 915.
20. Wilheit T. T. // IEEE Trans. 1979. **GE-17**, N 4. P. 244.
21. Plant W. J. // J. Geophys. Res. 2002. **107**, N C9. P. 3120.
22. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Теория распределений // М.: Наука, 1966.
23. Запезалов А. С., Пустовойтенко В. В. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. **53**, N 2. P. 100.
24. Запезалов А. С., Ратнер Ю. Б. // Морской гидрофизический журнал. 2003. № 1. С. 3.
25. Караев В. Ю., Панфилова М. А., Баландина Г. Н., Чу К. // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 62.
26. Cecil D. J., Goodman S. J., Voccipio D. J. et al. // Month. Weather Rev. 2005. **133**, № 3. P. 543.

Determining Higher-Order Cumulants of Sea-Surface Slopes by Quasi-Vertical Radio Sounding Data

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

¹Department of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences. Sevastopol 299001, Russia.
E-mail: ^asea@phys.msu.ru, ^bsevzepter@mail.ru.

This paper analyzes the possibilities and constraints in determining the skewness and kurtosis of slopes by radio sounding data at angles at which the backscattered signal is determined by quasi-specular reflection. It is shown that direct recovery of skewness and kurtosis based on the dependence of the normalized backscattering cross section on the incidence angle leads to significant errors. The determination of these parameters by minimizing the discrepancies between the empirical probability density and the truncated Gram—Charlier series given a priori depends significantly on the choice of this model.

Keywords: remote sensing, sea-surface slopes, quasi-specular reflection.

PACS: 41.20.Jb, 47.35.Bb.

Received 27 April 2018.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 2.

Сведения об авторах

1. Показеев Константин Васильевич — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой; профессор; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: sea@phys.msu.ru.
2. Запезалов Александр Сергеевич — доктор физ.-мат. наук; ст. науч. сотрудник; вед. науч. сотрудник; e-mail: sevzepter@mail.ru.