

А.С.Запевалов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ
СРЕДСТВАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ,
РАБОТАЮЩИМИ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ**

Анализируются модели уклонов морской поверхности, параметры которых определены по данным оптических измерений. Показаны возможности и ограничения их применения для анализа оптических изображений морской поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *морская поверхность, распределения уклонов морской поверхности, нелинейность морских волн.*

Введение. Решение задач космической океанологии требует детального представления о процессах, формирующих сигнал, регистрируемый на космических аппаратах [1]. Изменчивость тонкой топографической структуры морской поверхности, определяющей рассеяние электромагнитных волн радио и оптического диапазонов длительное время является объектом интенсивных исследований [2 – 5]. Нелинейные эффекты в поле поверхностных волн приводят к отклонениям распределений характеристик морской поверхности от распределения Гаусса, оказывая существенное влияние на формирование рассеянного поля электромагнитного излучения [6, 7].

Корректность интерпретации оптических изображений морской поверхности во многом определяется корректностью построения двунаправленной функции распределения отражений [8], основной вклад в которую дают уклоны, создаваемые короткими поверхностными волнами. До настоящего времени практически во всех приложениях, связанных с рассеянием электромагнитных волн на морской поверхности используется предложенная в 1954 г. модель уклонов Кокса-Манка [3].

Целью настоящей работы является анализ существующих моделей уклонов морской поверхности, параметры которых определены с помощью оптических средств дистанционного зондирования.

Функция плотности вероятностей уклонов морской поверхности, методы и оптические средства определения ее параметров. Двумерная плотность вероятностей квазинормального случайного процесса, обычно, описывается распределением Грама-Шарлье. Введем обозначение ξ_u и ξ_c – ортогональные компоненты уклонов. Индексы u и c здесь и далее обозначают, что данная характеристика получена для направления вдоль или поперек направления ветра соответственно

$$P_{G-C}(\xi_c, \xi_u) = P_G(\xi_c, \xi_u) \left[1 + \sum_{i,j=1}^{\infty} c_{i,j} H_i(\xi_c) H_j(\xi_u) \right], \quad (1)$$

где $c_{i,j}$ – коэффициенты; H_i и H_j – ортогональные полиномы Чебышева-Эрмита порядка i и j соответственно. Учитывая, что в [3] определялись ста-

статистические моменты уклонов до четвертого порядка включительно, после введения нормированных переменных $\tilde{\xi}_c = \xi_c / \sigma_c$ и $\tilde{\xi}_u = \xi_u / \sigma_u$ получаем

$$P_{G-C}(\xi_c, \xi_u) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u} \exp\left(-\frac{\tilde{\xi}_c^2 + \tilde{\xi}_u^2}{2}\right) \left[1 - \frac{1}{2} C_{21} H_2(\tilde{\xi}_c) H_1(\tilde{\xi}_u) - \frac{1}{6} C_{03} H_3(\tilde{\xi}_u) + \right. \\ \left. + \frac{1}{24} C_{40} H_4(\tilde{\xi}_c) + \frac{1}{4} C_{22} H_2(\tilde{\xi}_c) H_2(\tilde{\xi}_u) + \frac{1}{24} C_{04} H_4(\tilde{\xi}_u) \right]. \quad (2)$$

При выводе (2) принято, $C_{30} = C_{12} = C_{13} = C_{31} = 0$, что следует из предположения о симметрии распределения уклонов в поперечном направлении.

Первыми значительными экспериментальными исследованиями в области изучения уклонов взволнованной морской поверхности явились работы Кокса и Манка [3]. С помощью аэрофотосъемки солнечных бликов была определена двумерная статистика продольных и поперечных относительно направления ветра компонент уклонов. В основе процедуры определения уклонов морской поверхности лежал предложенный в 1924 г. академиком В.В.Шулейкиным способ определения их величин по распределению яркости бликов в солнечных или лунных «дорожках» [2].

Результаты следующих натурных измерений статистики уклонов ряби были опубликованы спустя почти двадцать лет. Измерения проводились с помощью двумерных лазерных уклономеров, в которых уклоны определялись по рефракции луча на взволнованной границе вода-воздух. В работе [9] представлены результаты измерений уклонов с борта медленно движущегося судна. Следующий эксперимент был проведен в 1989 – 1990 гг. Измерения велись с установленного на дне моря основания [10].

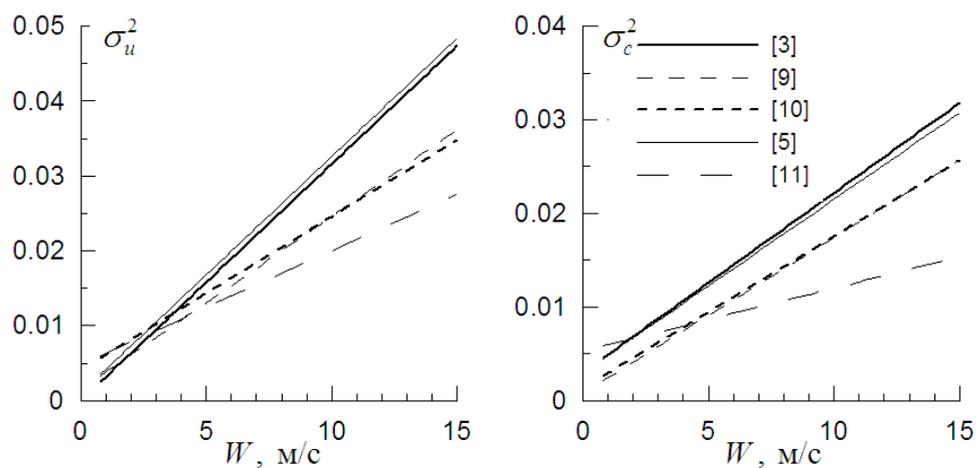
В последнее десятилетие для изучения уклонов морской поверхности используются ее оптические изображения, полученные с космических аппаратов. В работе [11] расчет уклонов осуществлялся по данным геостационарных метеорологических спутников, скорость приводного ветра определялась по данным скаттерометрических измерений. Позднее, аналогичные измерения были выполнены с борта космического аппарата ADEOS-1 [5].

Зависимости статистических характеристик уклонов морской поверхности от скорости ветра. Результаты определения статистических характеристик уклонов морской поверхности, полученных в указанных выше экспериментах, представлены в сводной табл.1, а также на рис.1. Дисперсии уклонов, полученные разными методами, несколько отличаются между собой, в тоже время, полученные одним и тем же методом – близки. Исключением являются данные приведенные в работе [11].

Данные лазерных измерений дают более низкие значения σ_u^2 и σ_c^2 , чем полученные по оптическим изображениям морской поверхности. Это обусловлено сглаживанием величин уклонов, вызванным осреднением в пределах лазерного пятна на морской поверхности, а также не достаточно высокой частотой измерений. Следует добавить, что все контактные методы измерения уклонов дают существенно заниженную оценку их дисперсий по сравнению со значениями, приведенными в табл.1.

Т а б л и ц а 1 . Статистических характеристик уклонов морской поверхности.

аэрофотографии [3]	лазерный уклономер [9]
$\sigma_u^2 = 0,000 + 0,00316W \pm 0,004$	$\sigma_u^2 = 0,0015 + 0,00231W \pm 0,002$
$\sigma_c^2 = 0,003 + 0,00192W \pm 0,002$	$\sigma_c^2 = 0,0008 + 0,00166W \pm 0,002$
$C_{21} = 0,01 - 0,0086 W \pm 0,03$	$C_{21} = 0,0086 \pm 0,003$
$C_{03} = 0,04 - 0,033 W \pm 0,12$	$C_{03} = 0,224 - 0,039W \pm 0,06$
$C_{40} = 0,40 \pm 0,23$	$C_{40} = 0,33 \pm 0,43$
$C_{22} = 0,12 \pm 0,06$	$C_{22} = 0,17 \pm 0,27$
$C_{04} = 0,23 \pm 0,41$	$C_{04} = 0,43 \pm 0,46$
лазерный уклономер [10]	спутниковые изображения [5]
$\sigma_u^2 = 0,00410 + 0,00205W \pm 0,005$	$\sigma_u^2 = 0,001 + 0,00316W \pm 0,0005$
$\sigma_c^2 = 0,00136 + 0,00162W \pm 0,004$	$\sigma_c^2 = 0,003 + 0,00185W \pm 0,0005$
$C_{21} = 0,0005 \pm 0,09$	$C_{21} = -0,0009W^2 \pm 0,01$
$C_{03} = 0,106 - 0,032W \pm 0,23$	$C_{03} = -0,45 [1 + \exp(7 - W)]^{-1} \pm 10^{-2}$
$C_{40} = 0,33 \pm 0,43$	$C_{40} = 0,3 \pm 0,05$
$C_{22} = 0,17 \pm 0,27$	$C_{22} = 0,12 \pm 0,03$
$C_{04} = 0,43 \pm 0,46$	$C_{04} = 0,4 \pm 0,1$
спутниковые изображения [11]	
$\sigma_u^2 = 0,0048 + 0,00152W$	$\sigma_c^2 = 0,0053 + 0,00671W$



Р и с . 1 . Зависимости дисперсий компонент уклонов от скорости ветра.

Ограничения модели Кокса-Манка. Модель (2) справедлива только в достаточно узком диапазоне уклонов [12]:

$$-2,5 < \tilde{\xi}_u, \tilde{\xi}_c < 2,5. \quad (3)$$

Условие (3) существенно ограничивает область применения данной модели для анализа оптических изображений. В частности, при скорости ветра 4 м/с условие (3) соответствует углам уклонов $|\alpha_u| < 16^\circ$ и $|\alpha_c| < 15^\circ$ (уклон и угол уклона связаны соотношением $\xi = \operatorname{tg}\alpha$).

Подход, позволяющий более корректно описать плотности вероятностей уклонов при больших значениях $\tilde{\xi}_u$ и $\tilde{\xi}_c$, был предложен в работе [13]. Построена комбинированная модель, которая в области (3) близка к распределению (2), а за ее пределами приближается к распределению Гаусса.

Заключение. Эффекты, обусловленные нелинейностью поля поверхностных волн, оказывают значительное влияние на рассеяние электромагнитного излучения морской поверхностью. До настоящего времени основной моделью, описывающей распределение уклонов морской поверхности, остается модель Кокса-Манка, построенная на основе ряда Грама-Шарлье, коэффициенты которого постоянно уточняются. Модель справедлива в узком диапазоне уклонов (3), что ограничивает возможности ее применение при анализе оптических изображений. Одним из решений этой проблемы является использование комбинированной модели, которая в области (3) близка к распределению Грама-Шарлье, а за ее пределами приближается к распределению Гаусса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пустовойтенко В.В., Терехин Ю.В., Коротаев Г.К., Цымбал В.Н., Ефимов В.Б., Курекин А.С., Драновский В.И., Кавелин С.С., Салтыков Ю.Д., Ермолов П.П.* Этапы и результаты развития технологии дистанционного зондирования морских акваторий (к 30-летию отечественной спутниковой океанологии) // Международ. крым. микроволновая конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007). – Севастополь: Вебер, 2007. – т.1. – С.15-25.
2. *Шулейкин В.В.* Оптический метод изучения морских волн // Записки по гидрографии. – 1924. – т.5, № 9. – С.49-56.
3. *Cox C., Munk W.* Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. America. – 1954. – v.44, № 11. – P.838-850.
4. *Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М.* Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физических наук. – 1975. – т.116. – С.741-743.
5. *Breon F.M., Henriot N.* Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geoph. Res. – 2006. – v.111, C06005. doi:10.1029/2005JC003343.
6. *Пустовойтенко В.В., Запезалов А.С.* Оперативная океанография: Спутниковая альтиметрия – Современное состояние, перспективы и проблемы. / Серия «Современные проблемы океанологии». – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – вып.11. – 218 с.

7. *Запєвалов А.С., Ратнер Ю.Б.* Эффекты квазигауссового характера распределения уклонов морской поверхности при лазерном зондировании // Оптика атмосферы и океана.– 2002.– т.15, № 10.– С.958-928.
8. *Sayer A.M., Thomas G.E., Grainger R.G.* A sea surface reflectance model for (A)ATSR, and application to aerosol retrievals // Atmos. Meas. Tech. Discuss.– 2010.– v.3.– P.1023-1098.
9. *Hughes B.A., Grant H.L., Chappell R.W.A.* A fast response surface-wave slope meter and measured wind-wave components // Deep-Sea Res.– 1977.– v.24, № 12.– P.1211-1223.
10. *Христофоров Г.Н., Запєвалов А.С., Бабий М.В.* Статистические характеристики уклонов морской поверхности при разных скоростях ветра // Океанология.– 1992.– т.32, вып.3.– С.452-459.
11. *Ebuchi N., Kizu S.* Probability distribution of surface slope derived using Sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers // J. Oceanogr.– 2002.– v.58.– P.477-486.
12. *Запєвалов А.С.* Изменчивость характеристик локальных уклонов морской поверхности // Прикладная гидромеханика.– 2005.– т.7(79), № 1.– С.17-21.
13. *Запєвалов А.С., Пустовойтенко В.В.* Моделирование плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // Изв. ВУЗов. Радиофизика.– 2010.– т.53, № 2.– С.110-121.

Материал поступил в редакцию 12.06.2013 г.

АНОТАЦІЯ Аналізуються моделі ухилів морської поверхні, параметри яких визначивши за даними оптичних вимірювань. Показані можливості та обмеження їх застосування для аналізу оптичних зображень морської поверхні.

ABSTRACT Analyzes the model sea surface slopes, the parameters of which are defined on the basis of optical measurements. The possibilities and limitations of their application for the analysis of optical images of the sea surface showing.