

Спектральная модель морской поверхности. Особенности реализации и результаты моделирования

© Н.В. Верденская, М.Т. Кобилов

АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца»

Рассмотрена спектральная модель взволнованной морской поверхности, которая описана однородным гауссовским случайным полем возвышений относительно среднего уровня $\omega(x, y, t)$, однозначно задаваемым спектральной мерой. Такая модель рассматривает случайный волновой процесс как суперпозицию бесконечного числа элементарных волн с различными амплитудами, частотами, направлениями распространения и случайными фазами, равномерно распределенными в интервале $[0, 2\pi]$. Эмпирически подобраны аппроксимации частотного и углового спектров с соответствующей параметризацией. Предложенная модель расширена до пространственной, а затем и пространственно-временной модели. Представлены результаты моделирования, включающие непрерывную трансформацию морской поверхности.

Ключевые слова: морская поверхность, случайное поле, спектральная модель, модель авторегрессии скользящего среднего, частотный спектр, угловой спектр.

Введение. Нерешенной, но очень актуальной в разных приложениях является задача обнаружения и распознавания объекта на фоне подстилающей поверхности, в данном случае — поверхности моря. Поскольку морская поверхность является сложной, нерегулярной текстурой, к тому же быстро изменяющейся во времени, а проведение натурных экспериментов — сложной и дорогой процедурой, создание математической модели подстилающей поверхности и объектов на ней, а также модели отражения сигнала (электромагнитной волны) от такой поверхности является практически необходимым условием для разработки эффективных алгоритмов обнаружения и распознавания объектов на поверхности.

Выбор модели поверхности. Поскольку морская поверхность с точки зрения крупномасштабной структуры является плоской, а ее средне- и мелкомасштабная структура описывается типом волнения, которое является изменчивым и носит в основном случайный характер (за исключением гравитационных волн), для ее описания используют различные модели случайных полей. К ним относятся марковские случайные поля, линейные модели авторегрессии и скользящего среднего (АРСС), диффузионные модели (расширение на плоскость понятия диффузионного процесса) и др. Наиболее простыми и удобными являются модели авторегрессии и скользящего среднего.

Линейные модели рассматривают случайный волновой процесс как суперпозицию бесконечного числа элементарных волн с разными амплитудами, частотами, направлениями распространения и случайными фазами, равномерно распределенными на интервале $[0, 2\pi]$.

Наиболее простой моделью, формула которой выводится в рамках линейной теории волн, является модель Лонге — Хиггинса (ЛХ) [1]. Модель ЛХ представляет взволнованную морскую поверхность в виде суперпозиции элементарных гармонических волн случайных амплитуд c_n и фаз ε_n , равномерно распределенных на интервале $[0, 2\pi]$. Подъем (координата z) поверхности определяется формулой

$$\zeta(x, y, t) = \sum_n c_n \cos(u_n x + v_n y - \omega_n t + \varepsilon_n). \quad (1)$$

Здесь волновые числа (u_n, v_n) непрерывно распределены на плоскости (u, v) , т. е. площадка $du \times dv$ содержит бесконечно большое количество волновых чисел. Частота связана с волновыми числами дисперсионным соотношением $\omega_n = \omega(u_n, v_n)$.

Функция $\zeta(x, y, t)$ является трехмерным эргодическим стационарным однородным гауссовым процессом, определяемым соотношением

$$2E_\zeta(u, v)dudv = \sum_n c_n^2,$$

где $E_\zeta(u, v)$ — двухмерная спектральная плотность энергии волн. Коэффициенты c_n определяются из энергетического спектра волнения $S(\omega)$ по формуле

$$c_n = \sqrt{\int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} S(\omega)d\omega}.$$

Проще говоря, модель Лонге — Хиггинса предполагает, что случайные амплитуды элементарных гармонических волн суммарно несут энергию, определяемую спектром волнения.

Можно показать, что модель (1) представляет собой частный случай известной статистической модели случайных полей на решетке — модели авторегрессии и скользящего среднего. При таком подходе для определения коэффициентов (c_n, ε_n) применяется решение стандартной системы уравнений Юла — Уокера, при этом можно показать, что ее

спектр является спектром Пирсона — Московича. В работе [2] для построения модели морской поверхности предлагается рассмотреть более широкий класс моделей APCC, разнообразие которых достигается за счет выбора автокорреляционных функций разного вида. Стоит заметить, что автокорреляционная функция однозначно связана со спектром (если он конечен) известной теоремой Бохнера — Хинчина.

Второй подход, выбранный авторами в качестве основного, базируется основан на построении модели типа (1) с заданным спектром. В работе [3] предполагается, что морская поверхность может быть описана однородным гауссовским случайным полем возвышений относительно среднего уровня $\omega(x, y, t)$, которое однозначно задается спектральной мерой

$$F(d\lambda, d\nu, d\mu) = f(\lambda, \nu, \mu) d\lambda d\nu d\mu$$

с плотностью $f(\lambda, \nu, \mu)$ и корреляционной функцией

$$R(x, y, t) = \int_{R^3} \cos(\lambda x + \nu y + \mu t) f(\lambda, \nu, \mu) d\lambda d\nu d\mu.$$

Плотность $f(\lambda, \nu, \mu)$ является обобщенной и сосредоточена на некоторой поверхности.

Рассмотрим поверхность морского волнения $\omega(x, y, t)$ в фиксированный момент времени t_0 :

$$u(x, y) = \omega(x, y, t) \lambda_{t=t_0}. \quad (2)$$

Тогда $u(x, y)$ — однородное гауссовское случайное поле со спектральной плотностью

$$f_{\lambda\nu}(\lambda, \nu) = \int_R f(\lambda, \nu, \mu) d\mu \quad (3)$$

и корреляционной функцией

$$R_{xy}(x, y) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \cos(\lambda x + \nu y) f_{\lambda\nu}(\lambda, \nu) d\nu d\lambda.$$

Наряду с параметрами λ и ν часто удобно рассматривать полярные координаты

$$\rho^2 = \lambda^2 + \nu^2, \quad \varphi = \arg(\lambda + i\nu), \quad \lambda = \rho \sin \varphi, \quad \nu = \rho \cos \varphi. \quad (4)$$

При этом спектральные плотности связаны следующими соотношениями [4]:

$$f_{\lambda\nu}(\lambda, \nu) = \frac{f_{\rho\varphi}(\rho, \varphi)}{\rho},$$

$$f_{\rho\varphi}(\rho, \varphi) = \rho f_{\lambda\nu}(\lambda, \nu).$$

Спектральную плотность поля $u(x, y)$ можно представить следующим образом:

$$f_{\lambda\nu}(\lambda, \nu) = \frac{f_{\rho\varphi}(\rho, \varphi)}{\rho} = \frac{1}{2\rho} \sqrt{\frac{g}{\rho}} S(\mu) Q(\varphi, \mu), \quad \mu = \sqrt{g\rho}, \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения; ρ и φ определяются выражениями (4); $S(\mu)$ — частотный спектр волнения; $Q(\varphi, \mu)$ — угловой спектр волнения.

Если считать, что $Q(\varphi, \mu) = Q(\mu)$, то говорят, что спектр

$$f_{\lambda\nu}(\lambda, \nu) = \frac{f_{\rho\varphi}(\rho, \varphi)}{\rho} = \frac{1}{2\rho} \sqrt{\frac{g}{\rho}} S(\mu) Q(\varphi)$$

факторизуется, т. е. $S(\omega, \theta) = S(\omega) Q(\theta)$, где $S(\omega)$ — частотный спектр; $Q(\theta)$ — угловой спектр. Чаще всего для частотного спектра используют модель Пирсона — Московица, а для углового спектра — модель Дарбишайра.

Спектр Пирсона — Московица:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left(-\beta \left(\frac{\omega_{\max}}{\omega}\right)^4\right), \quad (6)$$

где $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0,74$ — параметры аппроксимации, рассчитанные экспериментально; g — ускорение свободного падения; $\omega_{\max}$ — частота составляющей спектра с максимальной амплитудой, которая при известной скорости ветра V равна $\omega_{\max} = \frac{g}{V}$.

Угловой спектр Дарбишайра:

$$Q(\varphi) = \frac{2,96}{\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-(\varphi - \varphi_0)}{0,114\pi^2}\right), \quad (7)$$

где φ_0 — угол между направлением зондирования и направлением ветра.

Для аппроксимации частотных и угловых спектров морского волнения используют разные выражения, однако задача получения, а также

оценки точности аппроксимации спектров этими выражениями по реальным данным остается отдельной задачей.

В данной работе будем использовать аппроксимацию *частотного спектра*, рассмотренную в диссертации Греневои [5]:

$$S(\mu) = \begin{cases} 6m_0 \left(\frac{\mu_{\max}}{\mu} \right)^5 \mu^{-1} \exp \left\{ -1, 2 \left[\left(\frac{\mu_{\max}}{\mu} \right)^5 - \left(\frac{\mu_{\max}}{\mu_1} \right)^5 \right] \right\}, & \mu \in (0, \mu_1]; \\ S(\mu_1) + (S(\mu_2) - S(\mu_1)) \frac{\mu - \mu_1}{\mu_2 - \mu_1}, & \mu \in (\mu_1, \mu_2); \\ 0,0078g^2\mu^{-5}, & \mu \in [\mu_2, \mu_3), \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\mu_1 = 1,8\mu_{\max}\tilde{\mu}^{-0,7}, \quad \mu_2 = 2\mu_{\max}\tilde{\mu}^{-0,7}, \quad \mu_3 = 30c^{-1}; \\ m_0 = 0,00127g^{-2}\nu^4\tilde{\mu}^{-3,19}, \quad \tilde{\mu} = \nu\mu_{\max}g^{-1}.$$

Здесь ν — скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря; $\mu_{\max}$ — частота спектрального максимума спектра.

Будем также рассматривать аппроксимацию *углового спектра*, представленную в работе [6], которая предполагает независимость углового распределения энергии от частоты μ :

$$Q(\varphi) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \varphi, \quad \varphi \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]. \quad (9)$$

В приведенных выше формулах предполагается, что направление ветра совпадает с осью OX .

Рассмотрим пространственную спектральную модель поля $u(x, y)$, имеющую следующий вид:

$$u_{mn}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} \left[\xi_{ij} \cos(\lambda_{ij}x + \nu_{ij}y) + \eta_{ij} \sin(\lambda_{ij}x + \nu_{ij}y) \right], \quad (10)$$

где ξ_{ij}, η_{ij} — независимые стандартные нормальные случайные величины; a_{ij} определяется конкретным численным алгоритмом построения спектральной модели.

Предположим, что спектральная плотность поля $u(x, y)$ сосредоточена в области $\Lambda = (0, A) \times (-B, B)$. В качестве спектральной области

модели $u_{nm}(x, y)$ рассмотрим прямоугольную область $\Lambda^{mn} = (0, A_{mn}) \times (-B_{mn}, B_{mn}) \subseteq \Lambda$.

Пространственную спектральную модель вида (10) со спектральной областью Λ^{mn} будем называть *пространственной моделью* — спектральной моделью морской поверхности (СММП) (рис. 1).

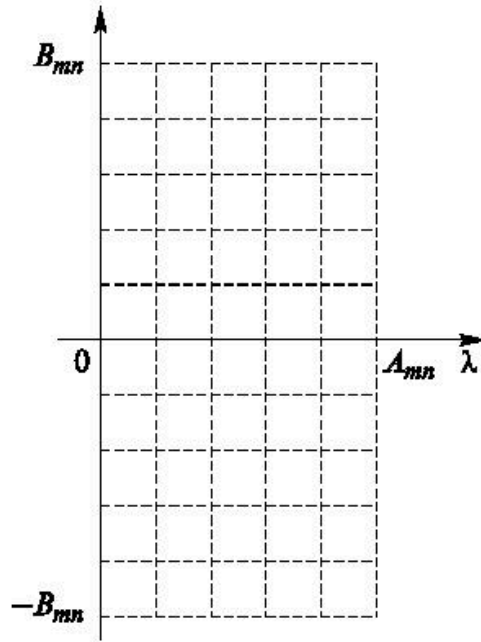


Рис. 1. Спектральная область $\Lambda^{mn} = (0, A_{mn}) \times (-B_{mn}, B_{mn})$ модели (10) поля $u(x, y)$ и ее разбиение на подобласти

Если при построении СММП используется принцип разбиения спектрального пространства, то область Λ^{mn} будем разбивать на подобласти Λ_{ij}^{mn} размером $\frac{A_{mn}}{n} \times \frac{2B_{mn}}{m}$, где $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; m — четное число; $n \times m = N$ — число гармоник (см. рис. 1).

Точность моделей СММП зависит от размеров спектральной области A_{mn} , B_{mn} и от количества используемых гармоник N . Отметим, что выбор оптимальных параметров модели определяется как структурой моделируемого случайного поля, так и задачей, которую нужно решить.

Теперь задача состоит в переходе от пространственной модели к *пространственно-временной*, т. е. изменяющейся во времени. Оказывается, что в случае глубокой воды это сделать достаточно просто.

Для морского волнения выполняется соотношение, называемое дисперсионным, см., например, [7]:

$$\mu^2 = g\sqrt{\lambda^2 + v^2} \operatorname{th}\left(H\sqrt{\lambda^2 + v^2}\right), \quad (11)$$

где $\mu, (\lambda, v)$ — временная частота и пространственные частоты монохроматической морской волны; g — ускорение свободного падения; H — глубина водоема.

Из дисперсионного соотношения следует, что спектральная мера поля $u(x, y, t)$ сосредоточена на поверхности, описываемой уравнением

$$g\sqrt{\lambda^2 + v^2} \operatorname{th}\left(H\sqrt{\lambda^2 + v^2}\right) = 0. \quad (12)$$

Физический смысл соотношения (12) состоит в следующем: волна длиной $L = \frac{2\pi}{\sqrt{\lambda^2 + v^2}}$ на водной поверхности распространяется с фиксированной скоростью

$$V = \sqrt{\frac{gL \operatorname{th}\left(H\sqrt{\lambda^2 + v^2}\right)}{2\pi}}.$$

В случае глубокой воды, т. е. $H\sqrt{\lambda^2 + v^2} \gg 1$, дисперсионное соотношение (11) упрощается, принимая вид [7]

$$\mu^2 = g\sqrt{\lambda^2 + v^2} \quad (13)$$

и спектральная мера поля $u(x, y, t)$ сосредоточена на поверхности

$$g\sqrt{\lambda^2 + v^2} - \mu^2 = 0. \quad (14)$$

В случае глубокой воды волна длиной $L = \frac{2\pi}{\sqrt{\lambda^2 + v^2}}$ на водной поверхности бежит с фиксированной скоростью $V = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$.

Предположим для простоты, что поверхность моделируется на достаточном отдалении от берега, поэтому можно пользоваться упрощенной моделью для глубокой воды.

Дисперсионное соотношение обеспечивает относительно простой переход от пространственной спектральной модели к пространственно-временной, поскольку λ, v и μ связаны соотношением (13). Пространственно-временная модель морской поверхности, соответствующая пространственной модели (10), принимает вид

$$u_{mn}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} [\xi_{ij} \cos(\lambda_{ij}x + v_{ij}y + \mu_{ij}t) + \eta_{ij} \sin(\lambda_{ij}x + v_{ij}y + \mu_{ij}t)];$$

$$\mu_{ij}^2 = g\sqrt{\lambda_{ij}^2 + v_{ij}^2}, \quad (15)$$

где ξ_{ij}, η_{ij} — независимые стандартные нормальные случайные величины.

Корреляционную функцию поля $w(x, y, t)$ в случае глубокой воды можно представить в виде

$$R(x, y, t) = \int_{R^2} \cos(\lambda x + v y + \mu t) f_{\lambda v}(\lambda, v) d\lambda dv, \quad (16)$$

где

$$f_{\lambda v}(\lambda, v) = \frac{1}{2\sqrt{\lambda^2 + v^2}} \sqrt{\frac{g}{\sqrt{\lambda^2 + v^2}}} S(\mu) Q(\varphi), \quad \mu = \sqrt{g\sqrt{\lambda^2 + v^2}}; \quad (17)$$

g — ускорение свободного падения; $S(\mu)$, $Q(\varphi)$ — частотный и угловой спектры морского волнения.

Таким образом, для описания пространственно-временной СММП, также как и для пространственных моделей, достаточно задать частотный $S(\mu)$ и угловой $Q(\varphi)$ спектры.

Задача моделирования реальной шероховатой поверхности. Задача моделирования состоит не просто в выборе математического аппарата, позволяющего получить поверхность «близкую» к «наблюдаемой», но и приобретении умения параметризовать модель таким образом, чтобы поверхность требуемой структуры получалась при вариации «косвенных» параметров, измерить которые гораздо проще, чем непосредственно поверхность. Частично такая параметризация уже реализована при задании спектров по частоте (8) и углу (9), по крайней мере там учтены наибольшая и наименьшая частоты колебаний и скорость ветра. Однако понятно (см. [8]), что этого недостаточно — осуществить более «тонкую» настройку модели можно только на базе экспериментальных данных. Следует также заметить, что понятие «близости» для реализаций случайных полей означает, что близки характеристики самих полей, а не конкретные их реализации. На языке наблюдателя это означает, что реализации близки по своим статистическим характеристикам (средняя высота волн, удельная энергия, частота колебаний и т. д.) и обладают схожей текстурой. Под текстурой понимается характерный случайный рисунок поверхности.

Описание программы. Для расчета пространственной модели (10) морской поверхности необходимо предварительно задать скорость ветра, частоту спектрального максимума спектра, а также прямоугольник в координатах x, y , для которых рассчитывается пространственная модель. После этого необходимо рассчитать все величины, зависящие исключительно от входных данных. Согласно формулам (8)–(10), для построения пространственной модели необходимо будет рассчитать двойной интеграл. Расчет данного интеграла будем проводить методом прямоугольников. Таким образом, для каждого элемента разбиения необходимо будет вычислить интеграл. Следует сделать $n \times m$ таких вычислений, где n и m — величины, задающие «мелкость» разбиения спектрально пространства $\Lambda = (0, A) \times (-B, B)$. Это большой объем вычислений, требующий большого количества времени при исполнении в один поток. Для ускорения вычислений создадим серию процессов по числу ядер машины, выполняющих параллельные вычисления, и очередь, в которую поместим индексы строк вычисляемой матрицы. Каждый процесс будет брать из очереди индекс и считать для строки с данным индексом значения методом прямоугольников и помещать их в матрицу. По окончании вычислений для 1-й строки процесс будет проверять наличие индексов в очереди. При нахождении индекса он будет делать вычисления для строки, а при его отсутствии — останавливаться и терминироваться. Данный подход приемлем, так как размер матрицы заранее известен и поступление новых индексов в очередь в процессе вычисления невозможно.

После того как были вычислены все интегралы можно было бы приступить к вычислению спектра, однако предварительно необходимо рассчитать центры клеток спектрального пространства $\Lambda^{mn} = (0, A_{mn}) \times (-B_{mn}, B_{mn})$. Помимо этого, согласно [5], необходимо задать ξ_{ij}, η_{ij} — независимые случайные величины для каждого i, j . Генерацию случайных величин будем производить с использованием генератора PCG-64 бит.

Теперь все величины, необходимые для вычисления поверхности модели, подсчитаны, и можно по формуле (10) рассчитать для каждой точки заданного прямоугольника из пространства x, y значения.

Таким образом, пространственная модель морской поверхности для заданных точек из пространства x, y будет построена.

Для построения пространственно-временной модели, как уже было показано в (15), необходимо учитывать еще и время. Сделав небольшую модификацию функции, вычисляющей выражение под знаками суммы согласно (15), можно вновь использовать алгоритм вычисления

пространственной функции. Необходимо лишь предварительно рассчитать для каждого центра клетки в спектральном пространстве. Затем для каждого t из заданного периода времени рассчитать пространственную модель по формуле (15).

Результаты моделирования. Для пространственно-временной модели была взята акватория в глубокой воде размером 100×100 м при скорости ветра 5 м/с и с частотой спектрального максимума, равной $0,5 \text{ с}^{-1}$. Результаты построения пространственно-временной модели представлены на рис. 2–7.

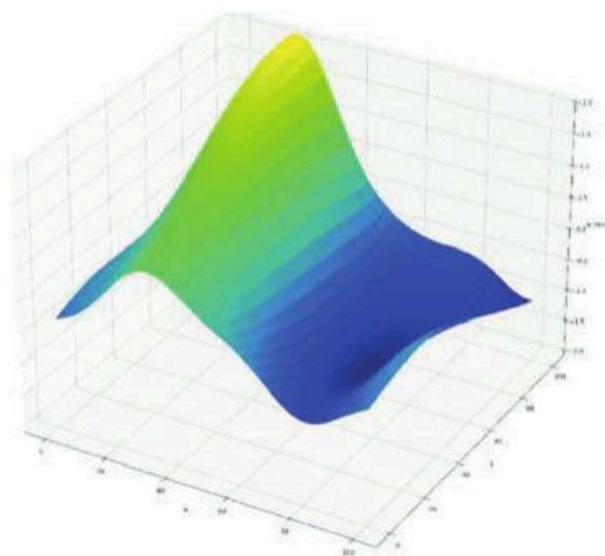


Рис. 2. Морская поверхность при скорости 5 м/с, секунда 0

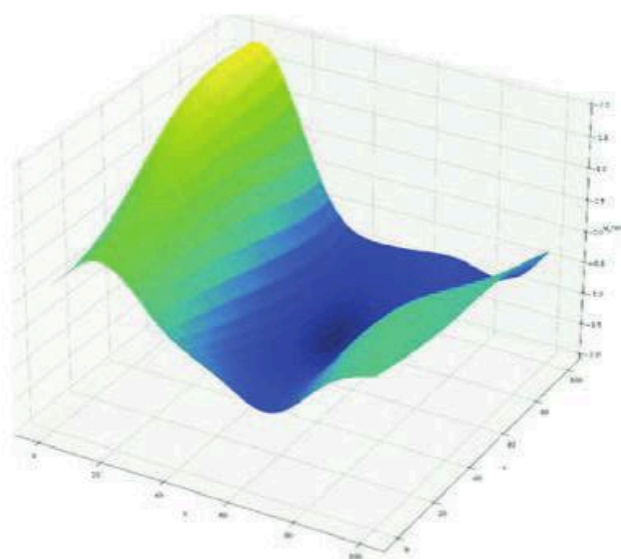


Рис. 3. Морская поверхность при скорости 5 м/с, секунда 2

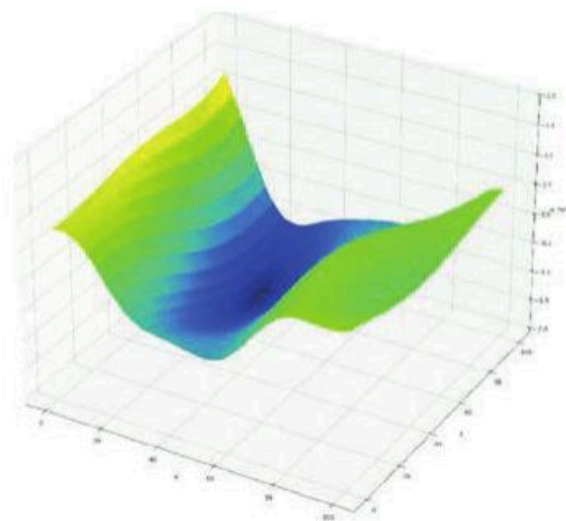


Рис. 4. Морская поверхность при скорости 5 м/с, секунда 4

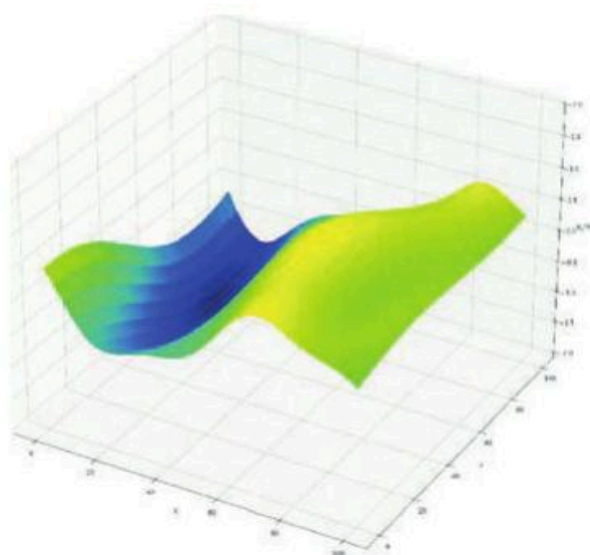


Рис. 5. Морская поверхность при скорости 5 м/с, секунда 6

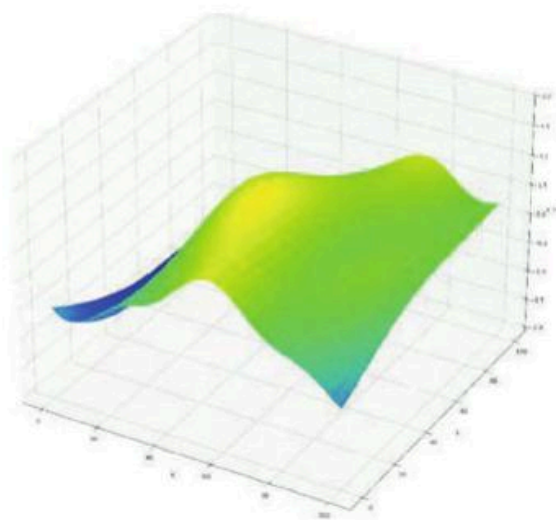


Рис. 6. Морская поверхность при скорости 5 м/с, секунда 8

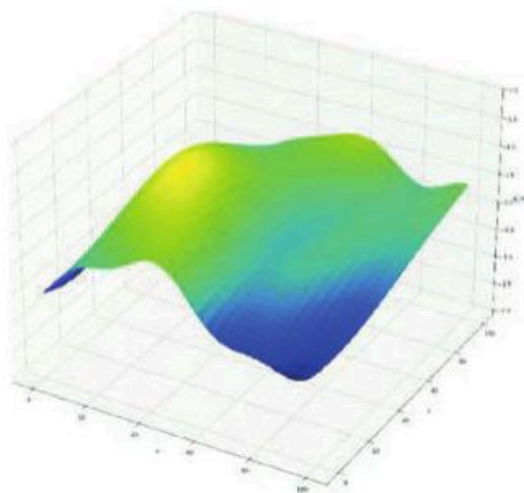


Рис. 7. Морская поверхность при скорости 5 м/с, секунда 10

Важно отметить, что поверхность на рис. 2–7 трансформируется непрерывно с изменением времени.

Заключение. Рассмотренная модель морской поверхности отвечает основным требованиям моделирования такого сложного, динамически изменяющегося объекта, как морская поверхность. Морская поверхность описана однородным гауссовским случайным полем возвышений относительно среднего уровня, которое однозначно задается спектральной мерой. Спектральная мера предполагается факторизуемой и описана угловым и частотным спектрами, модели которых хорошо соответствуют наблюдениям. Модели хорошо параметризованы, что позволяет управлять состоянием поверхности при моделировании. В работе предложена структура программы, реализующей модель морской поверхности. Полученные результаты соответствуют виду и непрерывному изменению состояния морской поверхности, однако представляется необходимым добавить к существующей модели высокочастотную составляющую, что и будет сделано в дальнейшем.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gankevich I., Tipikin Y., Degtyarev A. Novel Approaches for Distributing Workload on Commodity Computer Systems. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2015*. Gervasi O., Murgante B., Misra S., ed. Springer International Publishing. 2015, vol. 9158 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 259–271. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-21410-8_20.
- [2] Ганкевич И.Г. *Имитационное моделирование нерегулярного волнения для программ динамики морских объектов*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 2017, 275 с.

- [3] Anvarov S.R., Prigarin S.M. Numerical simulation of the spatio-temporal structure of the sea swell surface in optical problems. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 1994, vol. 7, no. 5, pp. 361–364.
- [4] Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 2005.
- [5] Гренева К.В. Численные стохастические модели поверхности морского волнения и гигантских океанических волн. Дис. ... кан. физ.-мат. наук. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт вычислительной математики и математической геофизики сибирского отделения российской академии наук. Новосибирск, 2020, 102 с.
- [6] Пирсон В., Нейман Г., Джеймс Р. Развитие и прогноз ветровых волн. *Ветровые волны*. Москва, Изд-во иностр. лит-ры, 1962, с. 42–124.
- [7] Кантер Р.Р., Пригарин С.М. Численное моделирование морского ветрового волнения для исследования поля отраженного оптического излучения. Препринт. АН СССР. Сибирское отделение, ВЦ; N 829. Новосибирск, 1989, 25 с.
- [8] Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне. Москва, Физматлит. 2015, 448 с.

Верденская Наталья Владимировна — канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: n_verden@mail.ru

Кобилев Марат Тимурович — аспирант АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: kobilovm@gmail.com

Spectral model of the sea surface.

Features of implementation and results of modeling

© N.V. Verdenskaya, M.T. Kobilov

Long-Range Radar, JSC

The paper considers a spectral model of a rough sea surface. The sea surface is described by a homogeneous Gaussian random field of elevations relative to the mean level $\omega(x, y, t)$, which is uniquely defined by a spectral measure. Such a model considers a random wave process as a superposition of an infinite number of elementary waves with different amplitudes, frequencies, directions of propagation and random phases uniformly distributed in the interval $[0, 2\pi]$. Approximations of the frequency spectra and angular spectra are empirically selected and these models are well parameterized. The proposed model is expanded to the spatial model and then is expanded to the spatio-temporal model. The modeling results, including continuous transformation of the sea surface are presented.

Keywords: sea surface, random field, spectral model, autoregressive moving average model, frequency spectrum, angular spectrum.

Verdenskaya N.V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of laboratory at Long-Range Radar, JSC. e-mail: n_verden@mail.ru

Kobilov M.T., Postgraduate student of the Long-Range Radar, JSC. e-mail: kobilovm@gmail.com