



УДК 621.396+551.466.3

В. В. Леонтьев, А. А. Пименов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Обоснование выбора математической модели морской поверхности при решении задачи радиолокационного экологического мониторинга

Представлены оценки точности математического моделирования морской поверхности. Рассмотрены линейные модели со спектрами Пирсона–Московица и Эльфохейли, а также нелинейная модель CWM, обеспечивающие устойчивость вычислительного процесса и низкую трудоемкость. В качестве критерия качества модели использованы точности воспроизведения дисперсий волновой ординаты и угла волнового склона. Показано, что для коротких поверхностей с размерами, близкими к разрешающей способности РЛС, наибольшую точность обеспечивает нелинейная модель CWM.

### Радиолокация, моделирование, рассеяние радиоволн, морская поверхность

Для решения задач экологического мониторинга поверхности моря с целью контроля ее загрязненности нефтепродуктами используют различные радиоэлектронные средства (радиолокационные станции (РЛС), радиометры, лазеры, телевизионные системы и т. д. [1]). В отличие от других средств, РЛС, облучающие море при малых углах скольжения, позволяют обнаруживать пленки нефти в любое время суток (и днем, и ночью) и практически при любых погодных условиях (при ярком солнце, в туман, дождь или снег). РЛС обеспечивают высокую разрешающую способность по координатам и высокий темп обзора больших площадей, позволяя вести непрерывный контроль. На работу РЛС не влияют температурные градиенты поверхности моря, наличие в воде фито- и зоопланктона.

Современные эвристические подходы к решению задач экологического мониторинга поверхности моря с помощью РЛС, облучающих море при скользких углах облучения, направлены только на обнаружение разливов нефти, при которых образуются толстые пленки. Они базируются на использовании штатных судовых навигационных РЛС или береговых РЛС управления транспортными потоками. В этих подходах РЛС является источником сигнала, отраженного от морской поверхности, а дополнительно к ней подключается специальная система обнаружения

разливов нефти (oil spill detection (OSD) system). Названия OSD-систем, разработавших их фирм и стран размещения приведены в табл. 1.

OSD-система получает и обрабатывает видеосигнал с выхода приемника РЛС. Все приведенные в табл. 1 системы подключаются к РЛС X-диапазона (9410 МГц). Кроме того, OSD-системы Argus и Selesmar Selux ST 250/340 допускают подключение к РЛС S-диапазона (3050 МГц).

Для РЛС, облучающих море при малых углах скольжения, дальности обнаружения сигнала, отраженного от его чистой поверхности, малы [2]. Появление загрязнения ведет к сглаживанию морской поверхности, уменьшению ее удельной эффективной площади рассеяния и, соответственно, к еще большему уменьшению дальности обнаружения отражений от загрязненного моря.

Таблица 1

OSD-система	Фирма-разработчик	Страна
FOIL-200	Furuno	Япония
Sigma S6	Rutter	Канада
SeaDarQ	Nortek	Нидерланды
Miros	Miros	Норвегия
Selesmar Selux ST 250/340	Consilium	Транснациональная компания с филиалами в Северной Америке, Европе, Азии и Океании
Argus	Simrad	США, Нидерланды, Новая Зеландия

Использование для контроля за морской поверхностью штатных судовых навигационных РЛС или береговых РЛС управления транспортными потоками не позволяет решить многие задачи экологического мониторинга. Их применение обусловлено чисто экономическими причинами и было оправдано при высокой стоимости тем, что РЛС имели высокую стоимость.

В настоящее время в связи с бурным развитием радиоэлектроники цены на РЛС снижаются, а требования к средствам мониторинга окружающей среды увеличиваются. В этих условиях необходима разработка специализированных РЛС, базирующихся на оптимальных методах построения и способных обеспечить решение задач экологического мониторинга поверхности моря в широком диапазоне изменения параметров нефтяного загрязнения (например, различных толщинах пленок, различных видах нефтепродуктов и т. д.) с заданными вероятностями на достаточно больших расстояниях. Особую сложность вызывает обнаружение тонких (мономолекулярных) пленок нефтепродуктов.

Для создания такой РЛС требуется априорная информация о характеристиках радиолокационного рассеяния как чистой, так и загрязненной морской поверхности. Большое число параметров, оказывающих влияние на характеристики рассеяния моря, ведет к тому, что практически единственный путь их получения – математическое моделирование.

Цель настоящей статьи – обоснование выбора математической модели морской поверхности, позволяющей исследовать ее характеристики радиолокационного рассеяния при характерных для условий морской радиолокации скользких углах облучения, требующих учета эффектов переотражения и затенения. В отличие от прикладных задач динамики судов на волнении такая модель должна обеспечивать более точное воспроизведение волновых ординат. Особо жесткие требования предъявляются к точности моделирования углов волнового склона  $\gamma$ , оказывающих существенное влияние на амплитуду сигнала, отраженного обратно к РЛС. Кроме того, реализация модели должна быть не очень трудоемкой, а также должна позволять избежать трудностей, связанных с численной неустойчивостью вычислительного процесса.

Для описания процесса ветрового волнения в настоящее время получили распространение линейная и нелинейные модели [3], [4]. Из них остановимся только на устойчивых моделях с

трудоемкостью вида  $O(N \lg N)$ , где  $N$  – количество точек, в которых осуществляется моделирование поверхности. Модели, для которых может иметь место неустойчивость решений, а также с трудоемкостью  $O(N^2)$  рассматривать не будем.

Линейная модель представляет изменяющуюся во времени и пространстве взволнованную поверхность в виде суперпозиции большого числа регулярных волн, каждая из которых обладает свойствами прогрессивных волн заданных амплитуд, рассчитанных исходя из формы спектра морского волнения. Тогда изменения ординаты у морского волнения по координатам  $x, z$  и времени  $t$  определяются в следующем виде:

$$y(\mathbf{r}, t) = \operatorname{Re} \sum_{\mathbf{K}_B} A(\mathbf{K}_B, t) \exp(i \mathbf{K}_B \mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{r} = x \mathbf{x}^0 + z \mathbf{z}^0$ ;  $\mathbf{K}_B = K_{xB} \mathbf{x}^0 + K_{zB} \mathbf{z}^0$ ;  $A(\mathbf{K}_B, t)$  – амплитуды волн, причем  $\mathbf{x}^0$  и  $\mathbf{z}^0$  – орт-векторы соответствующих осей координат;  $K_{xB}$  и  $K_{zB}$  – проекции вектора  $\mathbf{K}_B$  на указанные оси координат.

Часто для суммирования регулярных волн используют преобразование Фурье [5]. В этом случае ординаты  $y$  волнения определяются как реальная часть обратного преобразования Фурье:

$$y(\mathbf{r}, t) = \operatorname{Re} \int A(\mathbf{K}_B, t) \exp(i \mathbf{K}_B \mathbf{r}) dK_B. \quad (2)$$

Входящие в (1) и (2) амплитуды волн имеют вид

$$A(\mathbf{K}_B, t) = a(\mathbf{K}_B) \sqrt{2 \Pi(\mathbf{K}_B) \delta K_x \delta K_z} \exp(-i \omega_B t),$$

где  $a(\mathbf{K}_B) = a_1(\mathbf{K}_B) + i a_2(\mathbf{K}_B)$ ;  $\Pi(\mathbf{K}_B)$  – энергетический спектр морского волнения;  $\delta K_x$  и  $\delta K_z$  – шаги между отсчетами в спектре  $\Pi(\mathbf{K}_B)$ ;  $\omega_B$  – круговая частота морских волн; причем  $a_1(\mathbf{K}_B)$  и  $a_2(\mathbf{K}_B)$  – независимые гауссовские случайные величины с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Круговая частота  $\omega_B$  связана с волновым числом  $K_B = |\mathbf{K}_B|$  простым соотношением

$$\omega_B = \sqrt{g K_B},$$

где  $g = 9.807 \text{ м/с}^2$  – гравитационная постоянная.

При получении волновых ординат с помощью линейной модели в качестве спектра морского волнения принято использовать спектр Пирсо-

на–Московица [5]. К сожалению, указанный спектр плохо представляет волнение в области капиллярных волн, играющих важную роль в процессе обратного рассеяния электромагнитной энергии. Капиллярные волны лучше описывает спектр Эльфохейли [6]. Для оценки эффективности линейных моделей, использующих спектры Пирсона–Московица и Эльфохейли, выполнено моделирование двумерных (2D) поверхностей моря по формуле (1).

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что линейная модель, использующая спектр Эльфохейли, лучше представляет морскую поверхность. Об этом свидетельствует тот факт, что дисперсии ординат  $D_y$  морских поверхностей, полученных с помощью линейной модели со спектром Эльфохейли, практически совпадают с теоретическими значениями, в то время как для линейной модели со спектром Пирсона–Московица они занижены.

Дисперсии  $D_\gamma$  углов волнового склона для поверхностей, полученных с помощью линейной модели со спектром Эльфохейли, больше аналогичных дисперсий для поверхностей, сформированных с помощью линейной модели со спектром Пирсона–Московица. Но в обоих случаях они меньше дисперсии, полученной на основе экспериментальных измерений [7].

На рис. 1 и 2 представлены выборочные результаты моделирования, иллюстрирующие про-

хождение морской волны через элемент разрешения РЛС длиной  $L = 5$  м. Рис. 1 соответствует моменту времени  $t_0 = 0$  с, принятому за начало отсчета, рис. 2 – моменту времени  $t = t_0 + \Delta t = 1$  с. Сплошными линиями на рис. 1 и 2 изображены волновые ординаты, полученные с помощью линейной модели со спектром Пирсона–Московица, штриховыми – со спектром Эльфохейли. Моделирование выполнено при следующих условиях: скорость ветра  $v_B = 5$  м/с, длина волны РЛС  $\lambda = 0.03$  м, количество отсчетов  $N = 1024$ . Число отсчетов выбрано из тех соображений, чтобы при заданной длине элемента разрешения  $L = 5$  м шаг между отсчетами по оси  $x$  на рис. 1 и 2  $\Delta x = L/N = 0.00488$  м был меньше  $\lambda/6$ . Выполнение условия  $\Delta x < \lambda/6$  позволяет обеспечить приемлемую точность электродинамических расчетов при оценке характеристик радиолокационного рассеяния морской поверхности [8].

На рис. 3 и 4 представлены плотности распределения вероятности (ПРВ) углов волнового склона поверхностей, изображенных на рис. 1 и 2 соответственно. Обозначения линий на рис. 3 и 4 аналогичны обозначениям линий на рис. 1 и 2. Из анализа ПРВ следует, что для поверхности, полученной по модели со спектром Эльфохейли, вероятность появления больших углов волнового склона возрастает относительно вероятности получения таких же углов волнового склона по мо-

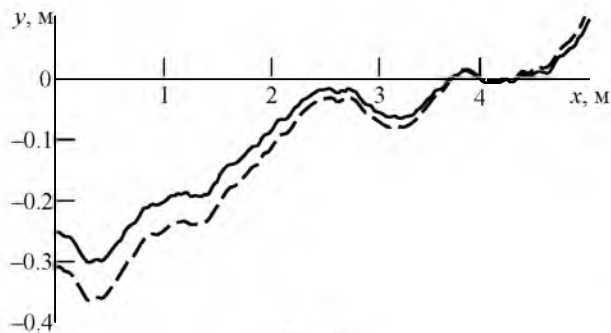


Рис. 1

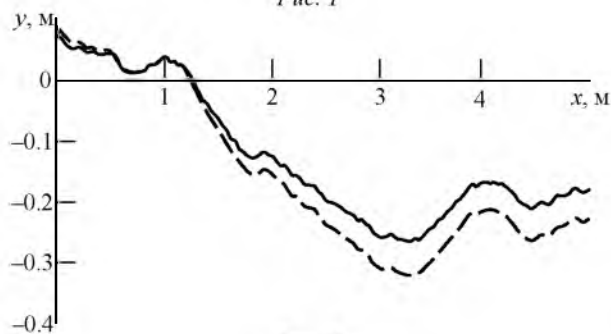


Рис. 2

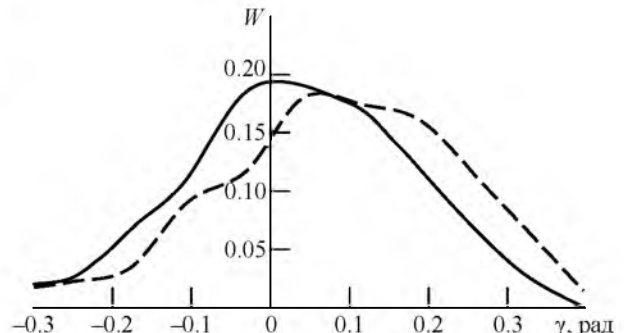


Рис. 3

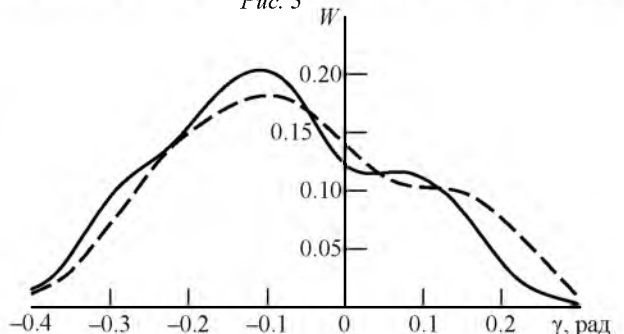


Рис. 4

Таблица 2

t, с	Параметр	Линейная модель со спектром	
		Пирсона–Московица	Эльфохейли
0	$D_y, \text{м}^2$	0.011	0.017
	$D_\gamma, \text{рад}^2$	0.020	0.022
	$\alpha_{3\gamma}$	-0.255	-0.338
1	$D_y, \text{м}^2$	0.012	0.017
	$D_\gamma, \text{рад}^2$	0.022	0.024
	$\alpha_{3\gamma}$	0.077	0.126

дели со спектром Пирсона–Московица. Распределение становится более асимметричным, о чем свидетельствует изменение меры косости  $\alpha_{3\gamma}$ .

Следовательно, улучшается качество моделирования более крутых участков морской волны.

Параметры флуктуаций волновых ординат сведены в табл. 2.

При скорости ветра  $v_B = 5 \text{ м/с}$  теоретическая дисперсия ординат морской поверхности  $D_y = 0.018 \text{ м}^2$ , дисперсия углов волнового склона, полученная на основе экспериментальных измерений,  $D_\gamma = (0.029 \pm 0.004) \text{ рад}^2$  [7].

В нелинейной CWM-модели [4] осуществляют горизонтальную деформацию волнового профиля, полученного с помощью линейной модели. Главная цель такой деформации – усилить заострение гребней и обеспечить большую (по сравнению с линейной моделью) их косость или асимметрию.

Указанное преобразование имеет вид

$$y_1[\mathbf{r} + \mathbf{C}(\mathbf{r}, t), t] = y(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

где  $\mathbf{C}(\mathbf{r}, t)$  – смещение точек в горизонтальной плоскости.

Соотношение (3) означает, что ордината морской поверхности для новой абсциссы

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{r} + (\mathbf{r}, t)$$

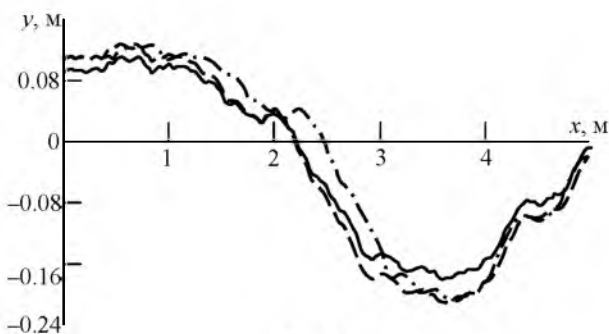


Рис. 5

остается той же, что и для абсциссы  $\mathbf{r}$ , полученной с помощью линейной модели.

Смещение точек определяет следующая формула:

$$\mathbf{C}(\mathbf{r}, t) = \text{Re} \int \left[ -i \frac{\mathbf{K}_B}{K_B} A(\mathbf{K}_B, t) \exp(i \mathbf{K}_B \mathbf{r}) \right] d\mathbf{K}_B.$$

На рис. 5 представлены реализации поверхностей для момента времени  $t = t_0 + 2\Delta t = 2 \text{ с}$ . Реализации получены с помощью линейной модели (1) со спектрами Пирсона–Московица (сплошная линия) и Эльфохейли (штриховая линия), а также нелинейной модели CWM (штрихпунктирная линия). В качестве исходной ординаты для нелинейной CWM-модели (3) использована волновая ордината поверхности, полученной по линейной модели со спектром Эльфохейли.

ПРВ углов волнового склона поверхностей, изображенных на рис. 5, представлены на рис. 6. Обозначения линий на рис. 6 аналогичны обозначениям линий на рис. 5. Из анализа ПРВ следует, что для поверхности, полученной по модели CWM, вероятности появления больших углов волнового склона существенно выше, чем вероятности получения таких же углов волнового склона по линейной модели со спектрами Пирсона–Московица и Эльфохейли.

Параметры флуктуаций волновых ординат приведены в табл. 3.

Сравнение результатов линейного и нелинейного моделирования (дисперсий ординат и дисперсий углов волнового склона с теоретической дисперсией ординат и дисперсией углов волнового склона, полученной на основе эксперимен-

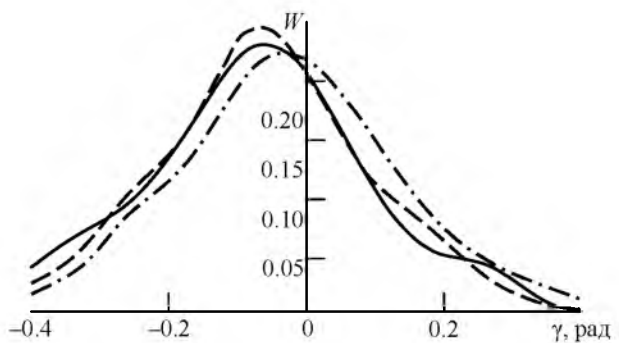


Рис. 6

Таблица 3

Параметр	Линейная модель со спектром		Нелинейная модель CWM
	Пирсона–Московица	Эльфохейли	
$D_y, \text{м}^2$	0.011	0.015	0.015
$D_\gamma, \text{рад}^2$	0.025	0.027	0.031
$\alpha_{3\gamma}$	0.032	0.061	-0.016

тальных измерений соответственно) позволяет заключить, что лучшую точность моделирования обеспечивает нелинейная модель CWM.

Из рассмотренных линейных моделей лучшую точность моделирования волновых ординат морской поверхности обеспечивает линейная модель со спектром Эльфохейли.

Из рис. 1, 2 и 5 видно, что при высоком разрешении РЛС в ее элемент разрешения будет по-

падать различные участки движущейся морской поверхности: как гребни, так и ложбины волн, а также участки перехода от гребня к ложбине или, наоборот, от ложбины к гребню. Это приведет к нестационарному изменению поверхности моря в элементе разрешения РЛС и, в свою очередь, к нестационарности отраженных сигналов, существенно усложняющей решение задачи экологического мониторинга морской поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев В. В. Радиоэлектронные средства экологического контроля для обнаружения и измерения характеристик разлива нефти на водной поверхности: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2001. 40 с.
2. Леонтьев В. В., Пименов А. А. Новая парадигма решения задачи радиолокационного обнаружения пленок нефти при скользящих углах облучения поверхности моря // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 6. С. 46–48.
3. Иванов В. А., Показеев К. В., Шрейдер А. А. Основы океанологии: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2008. 576 с.
4. Nouguier F., Guerin C.-A., Chapron B. "Choppy Wave" Model for Non-Linear Gravity Waves // J. of geophysical research. C. Oceans. 2009. Vol. 114, № 9. P. 1–16.
5. Toporkov J. V., Brown G. S. Numerical Simulations of Scattering from Time-Varying, Randomly Rough Surfaces / IEEE Trans. on geoscience and remote sensing. 2000. Vol. 38, № 4. P. 1616–1624.
6. A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-Driven Waves / T. Elfouhaily, B. Chapron, K. Katsaros, D. Vandemark // J. of geophysical research. C. Oceans. 1997. Vol. 102, № 7. P. 15 781–15 796.
7. Cox C. S., Munk W. H. Statistics of the Sea Surface Derived from Sun Glitter // J. of marine research. 1954. Vol. 13, № 2. P. 198–226.
8. Бородин М. А., Леонтьев В. В. Анализ точностных характеристик итерационного алгоритма вычисления поля, рассеянного шероховатой поверхностью // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 9. С. 1043–1048.

V. V. Leontev, A. A. Pimenov  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

#### Justification for the Choice of the Sea Surface Mathematical Model in Solving the Problem of Radar for Environment Monitoring

*Accuracy assessment of sea surface mathematical modeling are discussed. The linear model with Pierson-Moskowitz and Elfouhaily spectrum as well as nonlinear CWM model, which provides computational process stability and low computational complexity, are considered. Both wave ordinate dispersion and wave dispersion slope angle were used as criteria of model fidelity. It is shown that for short surfaces with dimensions close to radar resolution capabilities, the best accuracy provides by nonlinear CWM model.*

Radiolocation, modeling, wave scattering, sea surface

Статья поступила в редакцию 22 марта 2016 г.