

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2023-1-12-21

УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ СИГНАЛА, РАССЕЯННОГО МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ОБЛУЧЕНИИ

Бородин Михаил Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина).

E-mail: boroda84@gmail.com

Адрес: 197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

Аннотация: Оценка параметров сложного широкополосного сигнала (СШП) для судовой радиолокационной станции (РЛС) требует сведений о комплексном коэффициенте рассеяния (ККР) морской поверхности, которые получают путём математического моделирования. В статье рассмотрены вопросы выполнения указанного моделирования и представлены его результаты для случая СШП сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при характерном для морской радиолокации скользющем угле облучения. Расчёт ККР выполнен с помощью метода интегрального уравнения для участка морской поверхности длиной 10 м. Для моделирования реализаций морской поверхности использована линейная модель последней в сочетании со спектром морского волнения Эльфохейли. Показано, что достижение желаемой формы взаимно-корреляционной функции (ВКФ) СШП сигнала с ЛЧМ возможно только с использованием усреднения спектра рассеянного сигнала, при этом длительность интервала усреднения для заданных параметров моделирования должна быть не менее 10 с. Исследованы ВКФ СШП сигнала в зависимости от коэффициента усреднения для значений скорости ветра над морской поверхностью 3 м/с и 3,38 м/с. Установлено, что при увеличении коэффициента усреднения максимальный уровень боковых лепестков ВКФ уменьшается, а при увеличении скорости ветра ширина ВКФ увеличивается.

Ключевые слова: морская поверхность, скользкий угол облучения, широкополосный сигнал, взаимно-корреляционная функция, судовая РЛС.

Введение

Разработка новых радиолокационных систем (РЛС) для исследования морской поверхности и решения задач её экологического мониторинга (например, обнаружение разливов нефти), обладающих высоким разрешением по дальности и высокой помехоустойчивостью, требует использования широкополосных сигналов.

Важнейшими информационными параметрами при исследовании морской поверхности с помощью РЛС, подлежащими оценке являются её эффективная площадь рассеяния (ЭПР) и комплексный коэффициент рассеяния (ККР). Из теории радиолокации известно, что понятия ЭПР и ККР справедливы только для узкопо-

лосных сигналов при выполнении условий [1]

$$\frac{\Delta f}{f_0} \ll 1, \quad (1)$$

где Δf — полоса частот сигнала; f_0 — несущая частота сигнала;

$$\Delta f \leq \frac{c}{3L_0}, \quad (2)$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме; L_0 — линейный размер объекта локации в направлении облучения.

Для широкополосного сигнала условия (1) и (2) не выполняются, поэтому используют другие характеристики радиолокационного рассеяния — импульсную характеристику во времен-

ной области и комплексный коэффициент передачи в частотной области. При этом объект локации рассматривают как линейную параметрическую цепь, для которой в качестве входных и выходных сигналов выступают напряженности падающего и рассеянного электромагнитных полей при фиксированных углах облучения и рассеяния, соответственно [1].

В рамках представления объекта локации в виде линейной цепи спектр сигнала, рассеянного морской поверхностью, определяют по формуле [1, 2]

$$S_p(\omega) = S(\omega)A(\omega, \theta, \theta_p), \quad (3)$$

где $S_p(\omega)$ — спектр сигнала, рассеянного морской поверхностью; $S(\omega)$ — спектр зондирующего сигнала, падающего на морскую поверхность; $A(\omega, \theta, \theta_p)$ — комплексный коэффициент передачи морской поверхности; ω — циклическая частота; θ и θ_p — углы облучения и рассеяния, соответственно.

В качестве коэффициента передачи морской поверхности в (3) выступает зависимость ККР от циклической частоты, а также от углов облучения и рассеяния.

Расчёт взаимно-корреляционной функции (ВКФ) рассеянного морской поверхностью сигнала выполняют, используя обратное преобразование Фурье, по формуле [1, 2]

$$B_1(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_p(\omega)S_p^*(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega, \quad (4)$$

где τ — временной сдвиг; «*» — оператор комплексного сопряжения.

Выбор параметров сложного широкополосного (СШП) сигнала для применения в новых РЛС требует экспериментальной отработки в натуральных условиях, что сопряжено с рядом трудностей, возникающих из-за отсутствия возможности полного контроля за условиями проведения эксперимента. Для преодоления указанных трудностей используют математическое моделирование с целью оценки требуемых параметров, в частности, спектра и корреляционных характеристик сигнала, рассеянного морской поверхностью.

Морская поверхность нестационарна из-за ряда факторов, включая неоднородность и непостоянство ветрового потока над ней, поэтому процесс рассеяния радиоволн также можно считать нестационарным. При рассеянии СШП сигнала на морской поверхности могут происходить искажения, негативно влияющие на его корреляционные свойства, в результате применение такого сигнала будет невозможным.

Таким образом, задача моделирования ВКФ СШП сигнала, рассеянного морской поверхностью, является актуальной.

Важным частным случаем рассматриваемой задачи является оценка параметров ВКФ сигнала, рассеянного морской поверхностью при небольших скоростях ветра и нулевом доплеровском сдвиге частоты. Указанный случай важен для обнаружения нефтяных плёнок на морской поверхности судовой моностатической РЛС при небольшом волнении.

Целью настоящей статьи является моделирование и анализ ВКФ СШП сигнала, рассеянного нестационарной морской поверхностью, при характерном для морской радиолокации скользком угле облучения с учётом влияния скорости ветра.

Постановка задачи

Из (3) следует, что для расчёта спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, необходимо иметь сведения о спектре зондирующего сигнала, а также о ККР морской поверхности.

В качестве зондирующего сигнала выбран сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), часто используемый в морской радиолокации [3]. Спектр зондирующего сигнала с ЛЧМ рассчитывается по формуле [2]

$$S(\omega) = \frac{U_0}{2} \exp\left(-i\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\alpha}\right) \times \int_{-\tau_0/2}^{+\tau_0/2} \exp\left(i\frac{\alpha}{2}\left(t - \frac{\omega - \omega_0}{\alpha}\right)^2\right) dt, \quad (5)$$

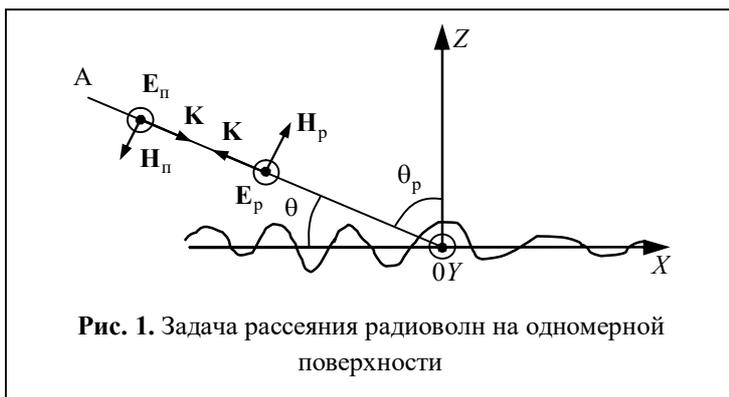


Рис. 1. Задача рассеяния радиоволн на одномерной поверхности

где U_0 — амплитуда импульса; τ_0 — длительность импульса; i — мнимая единица; ω — циклическая частота; ω_0 — циклическая несущая частота; t — переменная интегрирования; $\alpha = (2\pi f_d / \tau)$ — вспомогательный параметр; f_d — девиация частоты сигнала.

Значения ККР получают путём решения задачи рассеяния радиоволн на морской поверхности. Для упрощения расчётов реальную морскую поверхность, которая является двумерной и случайной, часто заменяют на цилиндрическую поверхность с заданным детерминированным одномерным сечением [4–6]. Такая замена даёт возможность рассматривать задачу рассеяния радиоволн только для детерминированного одномерного сечения морской поверхности.

Рассмотрим задачу рассеяния радиоволн на морской поверхности. На рис. 1 показано одномерное сечение морской поверхности $z = z(x)$ при $y = const$ и характеризующие задачу параметры. В точке A расположены источник и приёмник радиоволн. В точке O находится начало декартовой прямоугольной системы координат $OXYZ$, которое соответствует точке зеркального отражения электромагнитного поля от плоской и гладкой поверхности, совпадающей со средним уровнем шероховатой поверхности длиной L . Ось OY перпендикулярна плоскости падения электромагнитной волны, содержащей волновой вектор \mathbf{K} и ось OZ .

Введём обозначения x^0, y^0, z^0 — орт-векторы осей OX, OY и OZ системы координат $OXYZ$, соответственно. Угол облучения поверхности падающей электромагнитной волной равен θ , а угол рассеяния равен θ_p и отсчитывается от оси OZ в положительном направлении по часовой стрелке.

Поляризация падающего электромагнитного поля выбрана горизонтальной, поскольку данную поляризацию используют в большинстве судовых РЛС.

Решение задачи рассеяния радиоволн на морской поверхности

Для решения задачи рассеяния радиоволн на морской поверхности используют метод интегрального уравнения (ИУ) [4–7], целями которого являются расчёт плотности поверхностного тока, а также расчёт напряженности поля, рассеянного морской поверхностью.

Из-за конечных размеров рассматриваемого участка морской поверхности на его краях возникают паразитные краевые токи. Для снижения влияния краевых токов на рассчитываемый поверхностный ток используют усечение падающей волны [4–8], суть которого состоит в обеспечении уменьшения амплитуды волны от центра к краям поверхности до нулевого значения.

В этом случае в качестве падающего поля рассматривают следующую волну [4–6]:

$$\mathbf{E}_n(x, z) = y^0 E_0 T(x) \exp[ik(x \cos \theta - z \sin \theta)], \quad (6)$$

где $T(x)$ — функция усечения; E_0 — амплитуда падающего электрического поля; k — волновое число; i — мнимая единица; θ — угол облучения.

В качестве функции усечения падающей электромагнитной волны выбрана функция, обеспечивающая требуемый спад амплитуды волны от центра к краям поверхности [8]

$$T(x) = \frac{\sin(2\pi x/L)}{2\pi x/L}. \quad (7)$$

При использовании метода ИУ напряженность электрического поля, рассеянного морской поверхностью, рассчитывают по формулам [4-6,9]

$$E_p(r, \theta_p) = \frac{\exp(ikr)}{\sqrt{r}} E_p(\theta_p), \quad (8)$$

$$E_p(\theta_p) = \left[\frac{i \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) Z_0}{\sqrt{8\pi k}} \right] \times \int_{-L/2}^{+L/2} J(x) G(x, \theta_p) \sqrt{1+(z'(x))^2} dx, \quad (9)$$

$$G(x, \theta_p) = \exp\left[-ik(x \sin \theta_p + z(x) \cos \theta_p)\right], \quad (10)$$

где θ_p — угол рассеяния; Z_0 — волновое сопротивление свободного пространства; $J(x)$ — плотность поверхностного тока, полученная методом ИУ; r — расстояние между точкой на рассматриваемой поверхности и точкой приёма поля.

Согласно (8) рассеянная одномерной поверхностью электромагнитная волна является цилиндрической. ККР для рассеянной цилиндрической волны определяют по формуле [1, 5, 6]

$$A(\omega, \theta, \theta_p) = \sqrt{2\pi r} \exp(-ikr) \frac{E_p(r, \theta_p)}{E_p(\theta)}, \quad (11)$$

где $E_p(\theta)$ — значение угловой зависимости падающего поля для углового направления θ .

Из (11) следует, что при угле рассеяния равном $\frac{\pi}{2} - \theta$ значение ККР совпадает со значением коэффициента отражения. В случае плоской идеально проводящей поверхности при горизонтальной поляризации падающего поля и скользящем угле облучения коэффициент отражения равен -1 , тогда справедливо равенство

$$E_n(\theta) = -E_p(\theta). \quad (12)$$

Используем (12), чтобы рассчитать значение $E_n(\theta)$. Тогда плотность поверхностного тока, наводимую падающим полем на рассматриваемой поверхности, можно определить в приближении физической оптики (приближение Кирхгофа) по формуле [4-6]

$$\mathbf{J}(x) = \mathbf{y}^0 2[\mathbf{n}(x, z), \mathbf{H}_n(x, z)], \quad (13)$$

где \mathbf{n} — нормаль к поверхности в точке с координатами (x, z) ; $\mathbf{H}_n(x, z)$ — вектор напряженности магнитного поля, падающего на поверхность, в точке с координатами (x, z) .

Нормаль к поверхности в точке определяют по формуле

$$\mathbf{n}(x, z) = -\frac{z'(x)\mathbf{x}^0}{\sqrt{1+(z'(x))^2}} + \frac{\mathbf{z}^0}{\sqrt{1+(z'(x))^2}}. \quad (14)$$

Вектор напряженности магнитного поля, падающего на поверхность [4-6]

$$\mathbf{H}_n(x, z) = (-\mathbf{x}^0 \sin \theta - \mathbf{z}^0 \cos \theta) H_0 T(x) \times \exp[ik(x \cos \theta - z \sin \theta)], \quad (15)$$

где H_0 — амплитуда падающего магнитного поля.

Подставляя (14) и (15) в (13) получают

$$\mathbf{J}(x) = \mathbf{y}^0 2H_0 T(x) \exp[ik(x \cos \theta - z \sin \theta)] \times \frac{z'(x) \cos \theta - \sin \theta}{\sqrt{1+(z'(x))^2}}. \quad (16)$$

Для плоской поверхности $z = 0$, тогда (16) преобразуют к виду

$$\mathbf{J}(x) = -\mathbf{y}^0 2H_0 T(x) \sin \theta \exp[ikx \cos \theta]. \quad (17)$$

Подставляя скалярную часть (17) в (9) с учетом (12) получают

$$E_n(\theta) = -2Z_0 H_0 \sin \theta \int_{-L/2}^{+L/2} T(x) dx. \quad (18)$$

Используя (11) и (18), получают итоговую формулу для расчёта ККР

$$A(\omega, \theta, \theta_p) = \sqrt{2\pi} \frac{\int_{-L/2}^{+L/2} J(x) G(x, \theta_p) \sqrt{1+(z'(x))^2} dx}{-2\sin \theta \int_{-L/2}^{+L/2} T(x) dx}. \quad (19)$$

Моделирование ВКФ рассеянного сигнала

Моделирование выполнено за несколько этапов. На первом этапе выполнялось моделирование последовательных реализаций одномерной морской поверхности во времени. При этом использована линейная модель морской поверхности, предполагающая представление последней в виде набора пространственных волн, каждая из которых распространяется независимо от других [10–12]. При расчёте реализаций поверхности использован пространственный спектр морского волнения Эльфохейли, позволяющий с большей достоверностью моделировать капиллярные морские волны [12, 13]. Для учёта влияния гравитационных морских волн на моделируемый профиль поверхности из исходной реализации поверхности длиной 100 м выделялся участок требуемой длины L .

Для моделирования использованы следующие параметры:

- частота радиоволны менялась в диапазоне от 7 ГГц до 13 ГГц с шагом 20 МГц, всего 141 значение частоты;
- длительность зондирующего сигнала с ЛЧМ выбрана 66,7 нс, а девиация частоты указанного сигнала составила 3 ГГц;
- угол облучения морской поверхности составил 2° , а направление облучения совпадает с направлением действия ветра над морской поверхностью;
- значения скорости ветра на высоте 10 м, определяющие спектр морского волнения Эльфохейли, равны 3 м/с и 3,38 м/с, что соответствует значениям среднеквадратического отклонения (СКО) аппликата исходной морской поверхности 0,0585 м и 0,075 м, соответственно;
- длина участка моделируемой морской поверхности выбрана $L = 10$ м, что соответствует размеру элемента разрешения по дальности для типовой судовой РЛС (например, РЛС Furuno FAR-2117) с узкополосным тональным сигналом;
- временной интервал между двумя соседними реализациями морской поверхности –

переменный и соответствует темпу поступления данных от РЛС. В типовой судовой РЛС кругового обзора при скорости вращения 24 оборота/мин и ширине диаграммы направленности (ДН) 1° период поступления сигналов от морской поверхности с заданного углового направления равен 2,5 с. За время прохождения ДН антенны сектора углов, равного 1° , РЛС успевает выполнить 25 циклов зондирования при максимальном значении периода зондирования 0,25 мс. При моделировании генерация реализаций морской поверхности выполнялась «порциями» по 25 реализаций с интервалом 0,25 мс внутри «порции» через период 2,5 с;

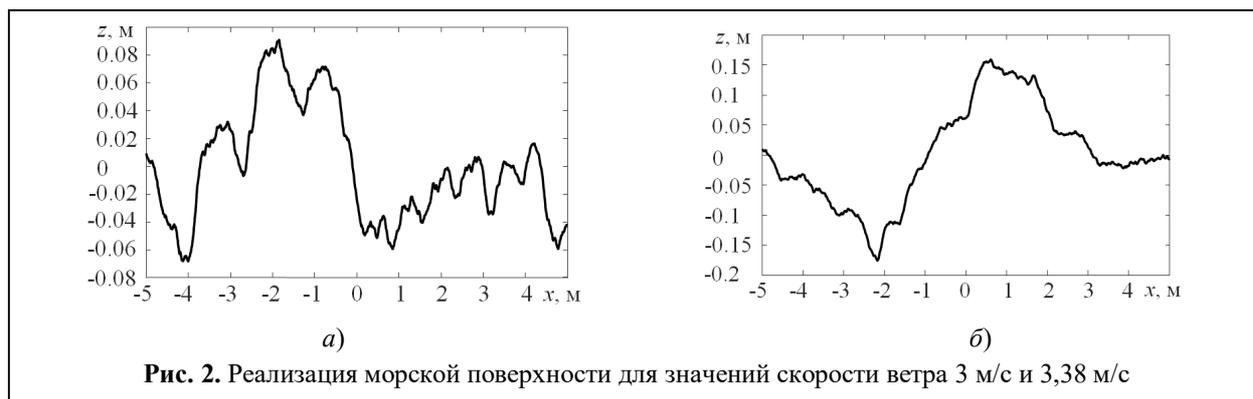
- длительность интервала анализа рассеянных морской поверхностью сигналов составила 10 с, что более чем в 2 раза превышает период доминирующей морской волны. Число реализаций морской поверхности равно 125;

На втором этапе отдельно для каждой частоты из рассматриваемого диапазона частот и для каждой реализации морской поверхности решалась задача рассеяния радиоволн методом ИУ. Далее, используя формулу (18), рассчитывался ККР как функция частоты для заданного угла облучения θ и угла рассеяния, соответствующего направлению обратного рассеяния к РЛС и равного $\theta - \pi/2$.

На третьем этапе выполнялся расчёт спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью согласно (3) и (5), используя полученную на втором этапе зависимость ККР от частоты.

Затем для анализа влияния нестационарности морской поверхности на корреляционные свойства рассеянного сигнала производилось накопление и усреднение полученного спектра сигнала по заданному значению его последовательных реализаций.

После указанных операций с помощью (4) рассчитывалась ВКФ СШП сигнала, при этом вместо бесконечных пределов интегрирования использованы нижняя и верхняя частоты из заданного для моделирования частотного диапазона. Затем выполнялась нормировка ВКФ СШП сигнала к её максимальному значению.



Нормированная ВКФ обозначена как $B_{\eta}(\tau)$, где τ — временной сдвиг.

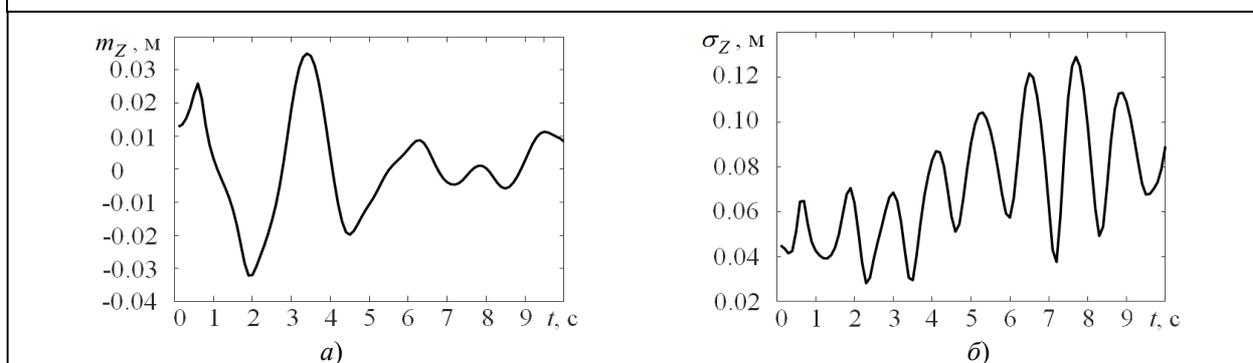
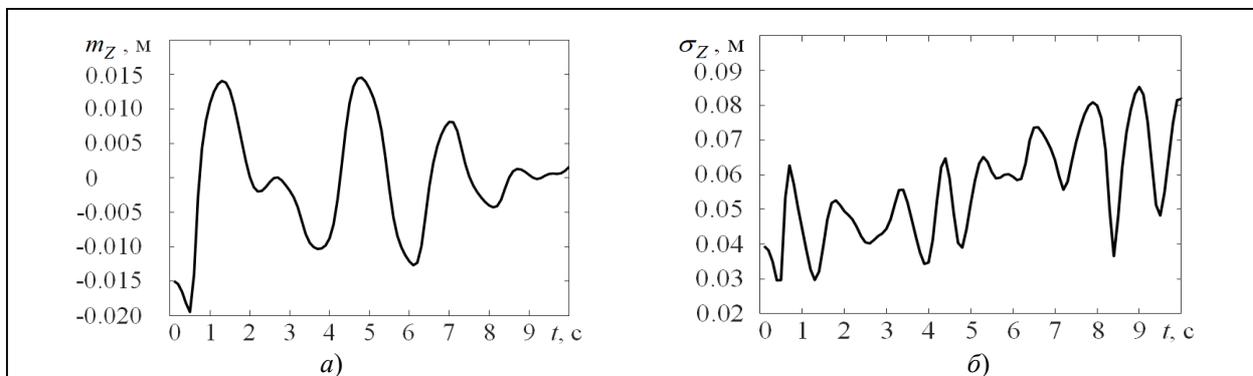
Моделирование выполнено в среде Matlab на персональном компьютере с процессором Intel Core i5-7400 с тактовой частотой 3 ГГц и объемом памяти оперативного запоминающего устройства в 8 Гб. Время расчёта ВКФ и спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, для одной её реализации составило 30 мин.

На рис. 2 (а и б) показаны реализации участка морской поверхности длиной 10 м для

значений скорости ветра на высоте 10 м — 3 м/с и 3,38 м/с соответственно.

На рис. 3 и 4 показаны статистические характеристики участка моделируемой морской поверхности длиной 10 м — зависимости среднего значения m_z и СКО аппликат σ_z для значений скорости ветра 3 м/с и 3,38 м/с соответственно. Изменение статистических характеристик аппликат морской поверхности от времени указывает на нестационарность последней.

На рис. 5 (а, б, в, г) и рис. 6 (а, б, в, г) пред-



ставлены нормированные ВКФ сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скоростях ветра 3 м/с и 3,38 м/с, соответственно, и значениях коэффициента усреднения 25; 50; 75; 100.

В таблице приведены полученные в ходе моделирования параметры нормированной ВКФ СШП сигнала — ширина ВКФ по уровню 0,5 от максимума и максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) — в зависимости от коэффициента усреднения и скорости ветра. Для значения коэффициента усреднения, равного 25, расчёты вышеуказанных параметров не велись из-за существенных искажений ВКФ.

Автокорреляционная функция зондирующего сигнала (5), использованного при моделировании, имеет ширину по уровню 0,5 равную 0,42 нс, которая отличается от теоретической ввиду ограничения полосы частот сигнала.

Анализируя полученные зависимости (рис. 5 и 6) и параметры, представленные в таблице, можно сделать следующие выводы:

- главный максимум нормированной ВКФ рассеянного сигнала претерпевает существенные искажения, преодолеть которые можно путём усреднения спектра;

- при коэффициенте усреднения, равном 100, для случая скорости ветра 3 м/с достигаются значения параметров нормированной ВКФ, близкие к теоретическим, при этом для скоростей ветра 3 м/с и 3,38 м/с наблюдается ярко выраженный максимум ВКФ на фоне боковых лепестков;

- при увеличении скорости ветра ширина нормированной ВКФ увеличивается, а максимальное значение УБЛ уменьшается;

- при увеличении коэффициента усреднения уменьшается максимальное значение УБЛ, достигая при скорости ветра 3,38 м/с значения меньшего, чем теоретическое, которое равно 0,21;

- также при увеличении коэффициента усреднения ширина нормированной ВКФ увеличивается для скорости ветра 3 м/с, а для скорости ветра 3,38 м/с меняется немонотонно.

Указанные трансформации формы норми-

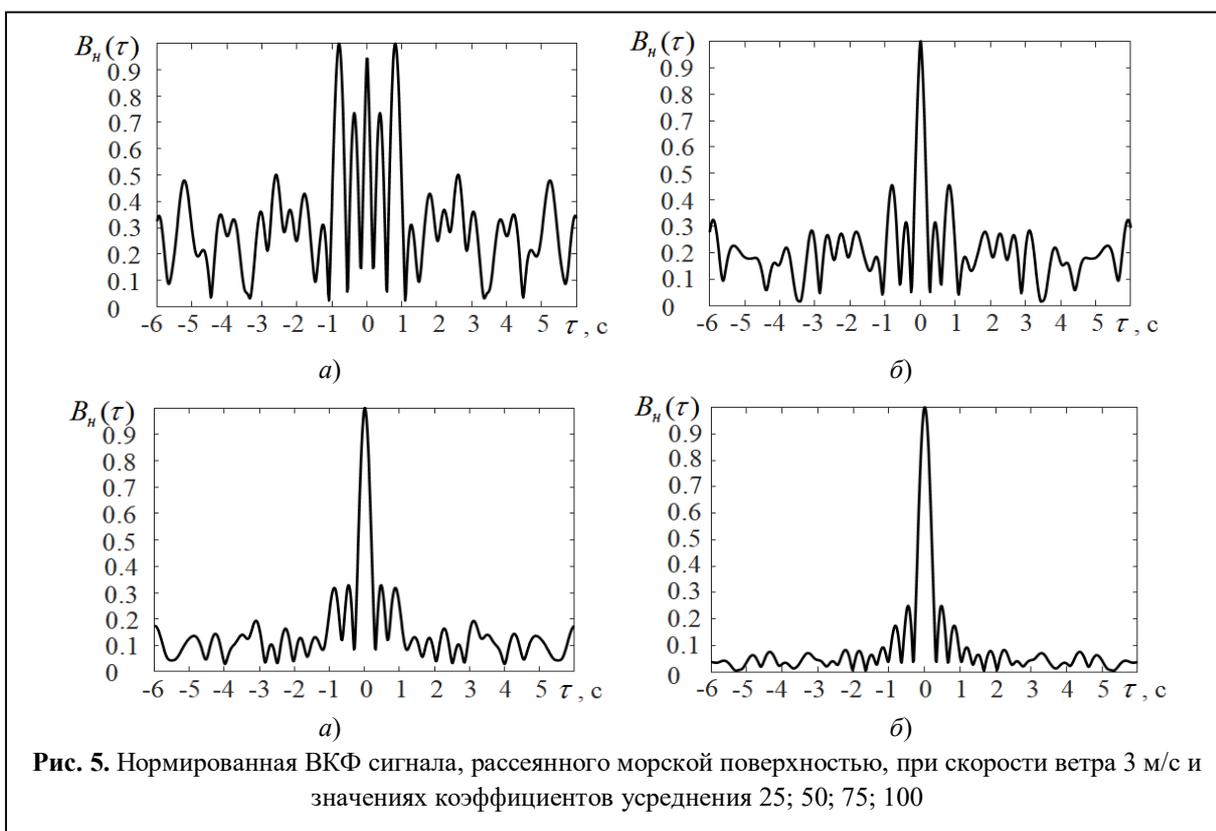


Рис. 5. Нормированная ВКФ сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скорости ветра 3 м/с и значениях коэффициентов усреднения 25; 50; 75; 100

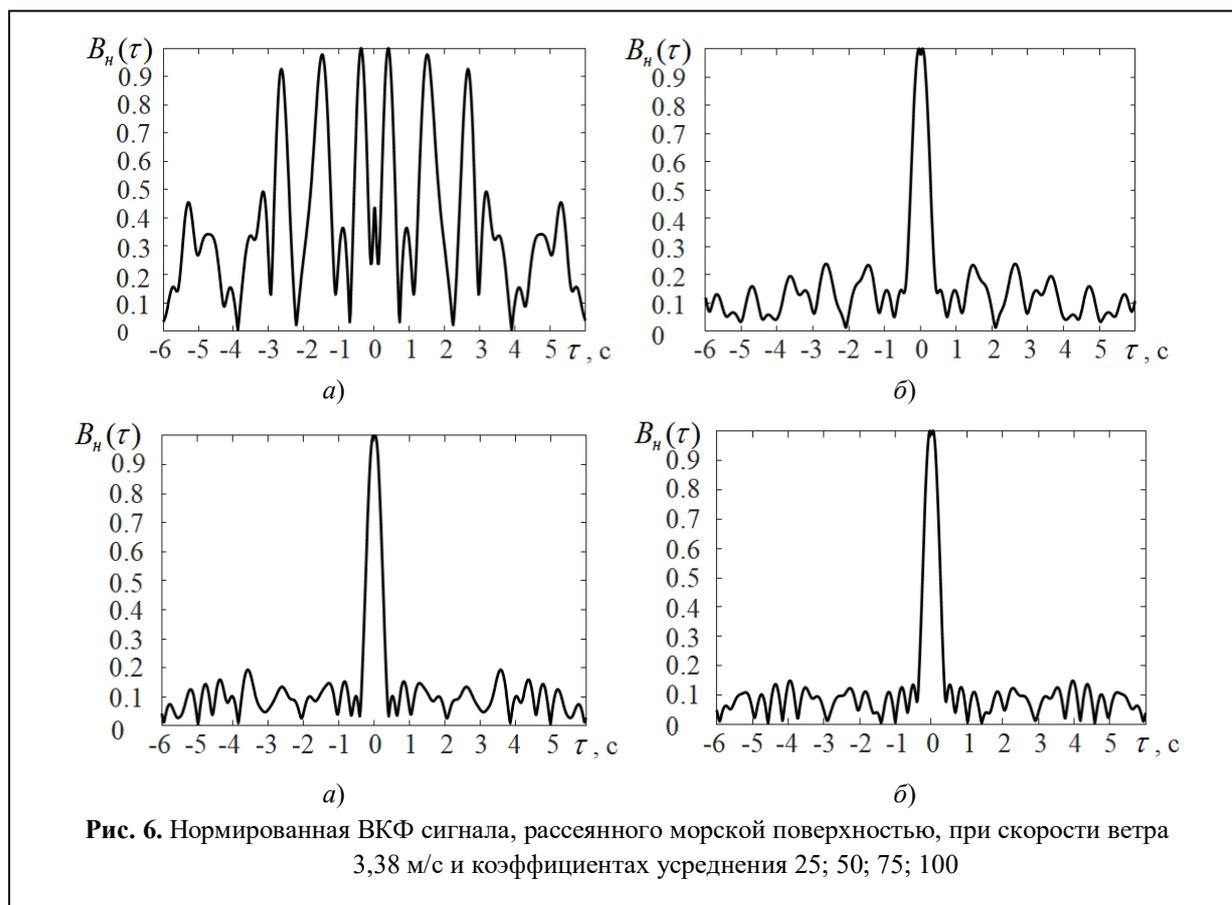


Рис. 6. Нормированная ВКФ сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скорости ветра 3,38 м/с и коэффициентах усреднения 25; 50; 75; 100

рованной ВКФ рассеянного сигнала при увеличении скорости ветра возникают из-за увеличения флуктуаций фазы ККР от морской поверхности.

Отметим, что при дальнейшем увеличении скорости ветра увеличится диапазон изменений среднего значения и СКО аппликат морской поверхности, поэтому ожидается увеличение значения коэффициента усреднения спектра рассеянного сигнала, при котором будет обеспечиваться желаемая форма нормированной ВКФ.

Заключение

Выполнено математическое моделирование и анализ ВКФ СШП сигнала с ЛЧМ, рассеянного нестационарной морской поверхностью в направлении к РЛС, при скользющем угле облучения с учетом влияния скорости ветра.

Установлено, что форма ВКФ, близкая к теоретической, обеспечивается только при усреднении спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, при этом длительность интервала усреднения для выбранных параметров моделирования должна быть не менее

Таблица. Параметры нормированной ВКФ рассеянного сигнала

Параметр	Коэффициент усреднения	Значение	
		Скорость ветра 3 м/с	Скорость ветра 3,38 м/с
Ширина (в нс) по уровню 0,5	50	0,307	0,566
	75	0,373	0,492
	100	0,392	0,502
Максимальный УБЛ	50	0,457	0,239
	75	0,329	0,193
	100	0,25	0,15

10 с. Изменение скорости ветра приводит к увеличению ширины главного максимума ВКФ и уменьшению её максимального УБЛ. Установление связи между длительностью интервала анализа рассеянных сигналов, связанного с коэффициентом усреднения, и параметрами морской поверхности, включая период доминирующей морской волны, среднее значение и СКО аппликата, является предметом дальнейших исследований.

Литература

1. Радиотехнические системы / Ю.М. Казаринов [и др.]. М.: Академия, 2008. 592 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш.школа, 2000. 462 с.
3. Скольник М.И. Справочник по радиолокации. М.: Техносфера, 2014. Т.2. 680 с.
4. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations / L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, C. O. Ao // New York: John Wiley & Sons, 2001. 736 p. DOI: 10.1002/0471224278.
5. Franceschetti G., Iodice A, Riccio D. Scattering from dielectric random fractal surfaces via method of moments // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2000. Vol. 38. No. 4. Pp. 1644–1650.
6. Chen M.F., Bai S.Y. Computer simulation of wave scattering from a dielectric random surface in two dimensions-cylindrical case // Journal of electromagnetic waves and applications. 1990. Vol.4. No. 10. Pp.963–982.
7. Zhang Y., Wang Y., Zheng H. EM Scattering from a Simple Water Surface composed of Two Time-varying Sinusoidal Waves // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). 2020. Vol. 8. Pp. 200684–200694. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779021.
8. Леонтьев В.В., Бородин М.А. Усечение падающего поля в задаче рассеяния электромагнитных волн на случайных поверхностях конечной длины // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т.24. № 4. С. 48–56. DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-48-56.
9. Borodin M. A., Leont'ev V. V. Analysis of the Accuracy of an Iterative Algorithm for Calculating the Field Scattered by a Rough Surface // Journal of Communications Technology and Electronics. 2009. Vol. 54. No. 9. Pp. 989–994. DOI: 10.1134/S1064226909090034.
10. Toporkov J.K., Brown G.S. Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 4, Pp. 1616–1624.
11. Rino C.L. et. al. Numerical simulation of backscatter from linear and nonlinear ocean surface realization. Radio Science. 1991. Vol. 26. No. 1. Pp. 51–71. DOI: 10.1029/90RS01687.
12. Elfouhaily T. et. al. A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-driven Waves // J. of Geophysical Research. Oceans, 1997. Vol. 102, No. C7. Pp. 15781–15796. DOI: 10.1029/97JC00467.
13. Bourlier C., Saillard J., Berginc G. Intrinsic Infrared Radiation of the Sea Surface // Progress in Electromagnetics Research. 2000. Vol. 27. Pp. 185–335. DOI: 10.2528/PIER99080103.

Поступила 3 ноября 2022 г.

English

CROSS-CORRELATION FUNCTION SIMULATION OF THE SIGNAL SCATTERED BY SEA SURFACE UNDER GLANCING RADIATION

Mihail Anatol'evich Borodin — PhD, Associate Professor of the Department of Radio Engineering System, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI».

E-mail: boroda84@gmail.com

Address: 197376, Russian Federation, Saint Petersburg, Professor Popov Str., 5.

Abstract: Simulation is accomplished for ship navigation radar with mechanical scanning and probing signal, with horizontal polarization and linear frequency modulation. The sea surface was treated as a linear parametric circuit. Spectrum of the signal scattered by sea surface is defined as product of the probing signal spectrum and complex scattering coefficient. Dependence calculation of the complex scattering coefficient on the frequency is done via integral equation method for a 10 m long section of the sea surface. Linear model of sea waves interaction combined with Elfouhaily wave spectrum is applied to generate sea surface implementations. It is demonstrated that achieving the cross-correlation function shape close to possible in theory can be done by averaging the scattered signal spectrum. The cross-correlation function of a broadband signal with zero Doppler frequency shift depending on the averaging coefficient is examined for wind speed values as 3 m/s and 3.38 m/s over sea surface. The averaging ratio is regarded as the number of progressive implementations of the averaged-value signal spectrum. The maximum duration of time lapse for signal analysis used

for averaging was 10 s. It is found that peak sidelobe of the cross-correlation function decreases with an increase of the averaging ratio and its width increases as the wind speed raises compared with expected theoretical value. These transformations of cross-correlation function shape of the scattered signal occur with wind speed gain due to phase fluctuations' increase of the complex scattering coefficient of the sea surface. It is likely that to ensure the defined shape of the signal cross-correlation function with further wind speed gain there will be needed the averaging ratio raise due to mean variation range expansion and root-mean-square deviation of the sea surface z-axis.

Keywords: sea surface, glancing radiation angle, broadband signal, cross-correlation function, ship radar.

References

1. Radio engineering systems / Yu.M. Kazarinov [et al.]. Moscow: Akademiya, 2008. 592 p.
2. Baskakov S.I. Radio engineering circuits and signals. Moscow: Vyshaya shkola, 2000. 462 p.
3. Skolnik M.I. Handbook of radar. Moscow: Tehnosfera, 2014. Vol.2. 680 p.
4. Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations. L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, C. O. Ao. New York: John Wiley & Sons, 2001. 736 p. DOI: 10.1002/0471224278.
5. Franceschetti G., Iodice A, Riccio D. Scattering from dielectric random fractal surfaces via method of moments. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. 2000. Vol. 38. No. 4. Pp. 1644–1650.
6. Chen M.F., Bai S.Y. Computer simulation of wave scattering from a dielectric random surface in two dimensions-cylindrical case. Journal of electromagnetic waves and applications.1990. Vol.4. No. 10. Pp.963–982.
7. Zhang Y., Wang Y., Zheng H. EM Scattering from a Simple Water Surface composed of Two Time-varying Sinusoidal Waves. Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). 2020. Vol. 8. Pp. 200684–200694. DOI: 10.1109/COMPEN.2019.8779021.
8. Leontiev V.V., Borodin M.A. Truncation of the incident field in the problem of scattering electromagnetic waves on random surfaces of finite length. News of Russian universities. Radio electronics. 2021. Vol. 24, No. 4. Pp. 48–56. DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-48-56.
9. Borodin M. A., Leont'ev V. V. Analysis of the Accuracy of an Iterative Algorithm for Calculating the Field Scattered by a Rough Surface. Journal of Communications Technology and Electronics. 2009. Vol. 54. No. 9. Pp. 989–994. DOI: 10.1134/S1064226909090034.
10. Toporkov J.K., Brown G.S. Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 4, Pp. 1616–1624.
11. Rino C.L. et. al. Numerical simulation of backscatter from linear and nonlinear ocean surface realization. Radio Science. 1991. Vol. 26. No. 1. Pp. 51–71. DOI: 10.1029/90RS01687.
12. Elfouhaily T. et. al. A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-driven Waves. J. of Geophysical Research. Oceans, 1997. Vol. 102, No. C7. Pp. 15781–15796. DOI: 10.1029/97JC00467.
13. Bourlier C., Saillard J., Berginc G. Intrinsic Infrared Radiation of the Sea Surface. Progress in Electromagnetics Research. 2000. Vol. 27. Pp. 185–335. DOI: 10.2528/PIER99080103.