

М. А. Бородин ✉, В. Н. Михайлов, П. А. Филиппова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ"

ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОПЛЕРОВСКОГО СПЕКТРА СИГНАЛА, РАСSEЯННОГО МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, ПРИ СКОЛЬЗЯЩИХ УГЛАХ ОБЛУЧЕНИЯ

Аннотация

Введение. Доплеровский спектр сигналов, рассеиваемых морской поверхностью и принимаемых радиолокатором, используется в различных задачах океанологии и экологического мониторинга. Существующие модели доплеровского спектра сигналов имеют ограниченное применение, поскольку получены на основе эмпирических данных в меняющихся условиях. Изменчивость условий наблюдения наиболее существенно влияет на рассеяние радиоволн на морской поверхности при характерном для морской радиолокации скользющем облучении.

Цель исследования. Разработка математической модели доплеровского спектра сигналов при скользящих углах облучения морской поверхности для сантиметрового диапазона длин волн.

Материалы и методы. Рассмотрена двумерная задача рассеяния электромагнитного поля на цилиндрической детерминированной поверхности. Для генерации реализаций морской поверхности использована линейная модель с пространственным спектром морского волнения Эльфохейли. Получено решение задачи рассеяния для случая вертикальной поляризации падающего электромагнитного поля методом интегрального уравнения с контролем погрешности расчета. Методом статистических испытаний проведено математическое моделирование доплеровского спектра сигналов, рассеиваемых морской поверхностью. Рассмотрен случай, когда направление облучения морской поверхности радиолокатором перпендикулярно направлению ветра. Для каждой из сгенерированных реализаций морской поверхности рассчитано электромагнитное поле, рассеиваемое в направлении на приемник радиолокатора, как функция времени. Далее по совокупности временных реализаций рассеянного поля вычислена реализация доплеровского спектра сигналов.

Результаты. По совокупности реализаций доплеровского спектра получена его математическая модель, содержащая детерминированную и случайную составляющие. Предложена аппроксимация каждой из указанных составляющих; приведены математические выражения для их расчета. Приведен анализ результатов моделирования.

Заключение. Полученную математическую модель доплеровского спектра предполагается использовать для разработки алгоритмов оценки по принятым радиолокационным сигналам состояния морской поверхности и наличия на ней загрязняющих веществ.

Ключевые слова: радиолокация; доплеровский спектр сигнала; моделирование; рассеяние радиоволн; морская поверхность; скользящий угол облучения

Для цитирования: Бородин М. А., Михайлов В. Н., Филиппова П. А. Математическая модель доплеровского спектра сигнала, рассеянного морской поверхностью, при скользящих углах облучения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 63–73. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73>

Источник финансирования. Инициативная работа.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.02.2019; принята к публикации 20.05.2019; опубликована онлайн 27.06.2019

© Бородин М. А., Михайлов В. Н., Филиппова П. А., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Mikhail A. Borodin✉, **Vyacheslav N. Mikhaylov**, **Polina A. Filippova**
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

DOPPLER SPECTRUM MATHEMATICAL MODEL OF SIGNAL SCATTERING FROM SEA SURFACE AT LOW GRAZING ANGLES

Abstract

Introduction. Doppler spectra of signals which are scattered from sea surface and received by radar is used in oceanology and ecological monitoring applications. Existing models of Doppler spectra have the limitation of application because they are based on empirical data in changing conditions. Variability of the observation conditions critically influence on microwaves scattering by sea surface at low grazing angles which is typical for marine radiolocations.

Objective. The goal of investigation proposed in this article is to develop the mathematical model of Doppler spectra at low grazing angles for microwave frequency range.

Materials and methods. The two-dimensional problem of the scattering of an electromagnetic field on a cylindrical deterministic surface is considered. For generating of sea surface realizations is used linear model with spatial sea spectrum Elfohaily. The solution of the scattering problem is obtained for the case of vertical polarization of the incident electromagnetic field by the method of an integral equation with the control of the error of the solution. The mathematical modeling of the Doppler Spectrum of signal scattered by sea surface is produced by method of statistical trial. The case where the direction of the observation of the sea surface by radar is perpendicular to the direction of the wind is considered. The electromagnetic field scattered in the direction of the radar receiver as a function of time is calculated for each generated sea surface realizations. Further, the set of variables of the implementation of scattered field is calculated for implementation of the Doppler spectrum.

Results. The set of implementations of the Doppler spectrum provided its mathematical model with consist of deterministic and random component. The approximation of each aforesaid component is suggested and mathematical expressions for value component calculation are presented. The analyze of modeling result is produced.

Conclusion. The developed mathematical model is offered to use for the design of algorithm sea surface condition estimation and pollutant detection using the signal which received by radar.

Key words: Radiolocation; Doppler spectrum of signal; modeling; radio wave scattering; sea surface; grazing angle of illumination

For citation: Borodin M. A., Mikhaylov V. N., Filippova P. A. Doppler spectrum mathematical model of signal scattering from sea surface. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 63–73. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-63-73>

Acknowledgements. Initiative work.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 22.02.2019; accepted 20.05.2019; published online 27.06.2019

Введение. Радиолокационные станции (РЛС) сантиметрового диапазона длин волн широко используются при дистанционных исследованиях морской поверхности [1]–[4]. К преимуществам дистанционного зондирования океана с помощью РЛС относят всепогодность и независимость от времени суток, а также возможность размещения РЛС как на стационарных объектах, так и на подвижных носителях. Перечисленные преимущества РЛС обеспечивают возможность за относительно короткие временные интервалы получать информацию о состоянии морской поверхности, что крайне важно для оперативного анализа экологической ситуации исследуемой акватории.

Доплеровский спектр сигналов (ДСС), принятых РЛС, используется для определения исследуемых характеристик морской поверхности (волнения, скорости и направления приводного ветра), а также при выполнении экологического мониторинга морской поверхности при обнаружении участков ее загрязнения продуктами биологического и небиологического (нефтяные пленки) происхождения [1]–[5].

На отражение сигнала от морской поверхности влияют скорость и направление ветра у поверхности воды, его продолжительность, протяженность области ветрового разгона, наличие загрязнений (например пленок нефти), а также местные усло-

вия погоды [6], [7]. Кроме того, существуют трудности проведения точной калибровки сигнала, отраженного от морской поверхности [6].

Основой для интерпретации результатов экспериментальных исследований стала теория рассеяния радиоволн на взволнованной морской поверхности, в рамках которой выделяют резонансный (брэгговский) и нерезонансный виды рассеяния [2]–[7].

В настоящее время для сантиметрового диапазона длин волн известны эмпирические математические модели, представляющие собой формулы ДСС, усредненного по множеству реализаций, для ракурсов облучения по направлению действия ветра и в противоположном направлении [5].

Математические модели ДСС для ракурса облучения поперек направления действия ветра для интересующего диапазона длин волн в научной литературе авторам найти не удалось. В [4] представлены лишь частные реализации ДСС для указанного ракурса облучения.

Разработка алгоритмов решения обратной задачи – восстановления характеристик морской поверхности по принятым РЛС сигналам при малых углах скольжения – требует сведений не только об усредненном по множеству реализаций ДСС. В частности, необходима вероятностная модель, позволяющая генерировать реализации ДСС в соответствии с задаваемыми параметрами и с оценкой погрешности решения задачи рассеяния.

Развитие теории дифракции радиоволн на морской поверхности при скольжащих углах облучения дает возможность создания новых математических моделей ДСС для участков этой поверхности, размер которых определяется разрешающей способностью РЛС по пространству, а также для различных значений скорости ветра и направления его действия над морской поверхностью.

Цель настоящей статьи – разработка математической модели ДСС при скольжащих углах облучения морской поверхности для сантиметрового диапазона длин волн, характерного для РЛС, применяемых для задач океанологии и экологического мониторинга.

Для разработки указанной математической модели ДСС необходимо выполнить следующие этапы:

- выбрать математическую модель взволнованной морской поверхности;
- выбрать метод решения задачи рассеяния радиоволн на генерируемых реализациях морской поверхности;

- выполнить математическое моделирование процесса рассеяния радиоволн сантиметрового диапазона при скольжащих углах облучения методом статистических испытаний;

- обработать данные моделирования и сформировать математическую модель ДСС, рассеянных морской поверхностью.

Разрабатываемая математическая модель ДСС будет формироваться для ракурса облучения поперек направления действия ветра, что имеет практический интерес и подробно в научной литературе не освещалось.

Модель морской поверхности. Для описания морской поверхности существуют различные модели – линейные и нелинейные, учитывающие пространственный спектр морского волнения [10]–[13].

В рамках линейной модели морская поверхность представляется суммой пространственных гармоник, амплитуды которых есть независимые гауссовские случайные величины с дисперсиями, зависящими от волнового числа в радиальном спектре морских волн. Обзор наиболее распространенных нелинейных моделей морской поверхности представлен в [9]–[11].

В качестве пространственного спектра морского волнения выбираем спектр Эльфохейли, позволяющий более точно по сравнению с другими моделями спектров учитывать вклад гравитационно-капиллярных и капиллярных волн в морское волнение [12], [13].

Ввиду достаточного сложного математического описания процесса разрушения морской волны и образования пены, характерных для больших скоростей ветра, в дальнейшем будем использовать линейную модель одномерной морской поверхности как более простую в реализации и справедливую для небольших скоростей ветра. Математические выражения, необходимые для генерации реализаций морской поверхности, приведены в [9]–[11].

Решение задачи рассеяния. Для формирования математической модели ДСС от взволнованной морской поверхности при скольжащих углах облучения необходимо иметь сведения о поле, отраженном в направлении к РЛС. Для получения таких сведений необходимо решить задачу дифракции радиоволн на морской поверхности.

Ранее для получения характеристик сигналов, рассеянных морской поверхностью, использовалась так называемая двухмасштабная модель, в рамках которой рассеянное поле состояло из двух слагае-

мых [14]–[16]. Первое слагаемое отвечает за рассеяние на крупномасштабных неровностях морской поверхности (гравитационные волны) и определяется по методу Кирхгофа. Второе слагаемое отвечает за рассеяние на мелкомасштабных неровностях морской поверхности (рябь) и рассчитывается согласно методу возмущений. Однако для скольльзящих углов облучения получаемые по двухмасштабной модели результаты значительно расходятся с экспериментальными. Кроме того, погрешность получаемого решения никак не оценивалась.

Для преодоления указанных затруднений и в связи с интенсивным развитием компьютерной техники получил широкое распространение метод интегрального уравнения (МИУ), который не только представляет собой эффективное средство теоретического исследования задач дифракции, но и используется для получения численных алгоритмов решения достаточно широкого класса подобных задач [13]–[15]. Кроме того, указанный метод относится к строгим численным методам решения задачи дифракции, поскольку получаемые решения удовлетворяют уравнениям Максвелла. Также МИУ можно использовать для скольльзящих углов облучения. В рамках данного метода выделяют следующие интегральные уравнения [17]–[19]:

$$\mathbf{E}_{\Pi}(r) = \int_S \frac{\partial \mathbf{E}(r')}{\partial n'} G(r, r') dS'; \quad (1)$$

$$\mathbf{H}(r) = 2\mathbf{H}_{\Pi}(r) + 2 \int_S \mathbf{H}(r') \frac{\partial G(r, r')}{\partial n'} dS', \quad (2)$$

где $\mathbf{E}_{\Pi}(r)$, $\mathbf{H}_{\Pi}(r)$ – напряженности падающего электрического и магнитного полей соответственно; $\mathbf{E}(r)$, $\mathbf{H}(r)$ – напряженности полного электрического и магнитного полей на поверхности S соответственно; $G(r, r')$ – функция Грина; n' – внешняя нормаль к поверхности S ; r – точка наблюдения; r' – точка интегрирования.

Рассмотрим двумерную задачу рассеяния электромагнитного поля на цилиндрической детерминированной шероховатой поверхности S . В морской радиолокации при скольльзящих углах облучения характерен случай, когда продольный размер освещенной области морской поверхности, существенный для рассеяния радиоволн, значительно превышает поперечный. Таким образом, допущение о двумерности решаемой задачи рассеяния правомерно.

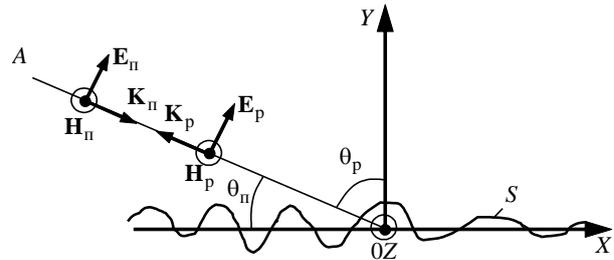


Рис. 1. Геометрические характеристики шероховатой поверхности

Fig. 1. Geometrical characteristics of a rough surface

Вид шероховатой поверхности и характеризующие задачу геометрические характеристики показаны на рис. 1. Источник и приемник электромагнитной волны расположены в точке A . Падающая электромагнитная волна характеризуется напряженностями электрического поля \mathbf{E}_{Π} , магнитного поля \mathbf{H}_{Π} , а также волновым вектором \mathbf{K}_{Π} ; рассеянная волна – напряженностями электрического \mathbf{E}_p и магнитного \mathbf{H}_p полей, а также волновым вектором \mathbf{K}_p . Ось OZ системы координат перпендикулярна плоскости падения электромагнитной волны. Морская поверхность облучается под углом θ_{Π} , рассеяние электромагнитной энергии происходит под углом θ_p^* .

Выбор вертикальной поляризации падающего поля обоснован тем, что работа РЛС на указанной поляризации обеспечивает большее по сравнению с горизонтальной поляризацией значение удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности при скольльзящем облучении и наиболее часто используется в морских РЛС, выполняющих океанологические исследования [16].

Для построения численного решения интегрального уравнения оно сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с неизвестными, представляющими собой коэффициенты разложения искомого решения по выбранным базисным функциям [17]–[18].

При решении сгенерированная реализация морской поверхности разбивается на N сегментов, в пределах каждого из которых для представления искомого решения (плотности поверхностного тока) используется кусочно-постоянная базисная функция. Использование функции такого вида позволяет получить наиболее простой численный алгоритм решения задачи [17]–[18].

* Угол облучения принято измерять от невозмущенной морской поверхности, угол рассеяния – от нормали к этой поверхности.

В настоящей статье для решения задачи рассеяния использовано интегральное уравнение (2); аналогичное решение можно также получить, используя (1).

Пусть в результате решения СЛАУ необходимо определить N неизвестных коэффициентов разложения искомого решения. Запишем СЛАУ в матричном виде [17]–[19]:

$$A\mathbf{J} = \mathbf{H}_{1\Pi}, \quad (3)$$

где A – матрица импеданса с размерами $N \times N$; \mathbf{J} – вектор-столбец плотности поверхностного тока размером N ; $\mathbf{H}_{1\Pi}$ – вектор-столбец напряженности падающего поля размером N .

Элементы матрицы импеданса при вертикальной поляризации вычислялись по формулам [17], [20]

$$A(m, n) = \begin{cases} -\frac{ik\Delta x}{4} H_1^{(1)}(kR_{mn}) \times \\ \times \left[\frac{y(x_m) - y(x_n) - y'(x_n)(x_m - x_n)}{R_{mn}} \right], & m \neq n; \\ \frac{1}{2} - \frac{\Delta xy''(x_m)}{4\pi l_y(x_m)} + \\ + \frac{k\Delta x l_y(x_m)}{4} \left[1 + \frac{2i}{\pi} \ln \left(\frac{k\Delta x l_y(x_m)}{4} \right) \right], & m = n, \end{cases} \quad (4)$$

где m – индекс точки наблюдения; n – индекс точки интегрирования ($m, n = \overline{1, N}$)*; i – мнимая единица; k – волновое число; Δx – длина одного сегмента морской поверхности; $H_1^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода первого порядка;

$$R_{mn} = \sqrt{[y(x_m) - y(x_n)]^2 + (x_m - x_n)^2}; \quad (5)$$

y' , y'' – первая и вторая производные ординаты морской поверхности по ее абсциссе;

$$l_y(x_m) = \sqrt{1 + [y'(x_m)]^2}. \quad (6)$$

Для устранения краевых токов на границах рассматриваемого участка поверхности разме-

щаются виртуальные резистивные вставки, представляющие собой плоские участки поверхности заданной длины L_r с переменным сопротивлением $R_0(x)$ [19]:

$$R_0(x) = \begin{cases} 0, & |x| < L_t/2; \\ Z_0 \left(\frac{0.5L - |x|}{L_r} \right)^4, & L_t/2 < |x| \leq L_t/2 + L_r, \end{cases} \quad (7)$$

где $Z_0 = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства; L_t – длина генерируемого участка морской поверхности; $L = L_t + L_r$ – совокупная длина участка морской поверхности; L_r – длина резистивной вставки.

Диагональные элементы матрицы импеданса A при вертикальной поляризации падающего поля с учетом резистивных вставок рассчитывались по формуле [19], [20]

$$A(m, m) = R_0(x_m) + \frac{1}{2} - \frac{\Delta xy''(x_m)}{4\pi l_y} + \\ + \frac{k\Delta x l_y(x_m)}{4} \left[1 + \frac{2i}{\pi} \ln \left(\frac{k\Delta x l_y(x_m)}{4} \right) \right]. \quad (8)$$

Расчет составляющих рассеянного поверхностью электромагнитного поля в дальней зоне проводился по известным формулам [18], [21] и не представлял трудностей.

Совокупная погрешность всех вычислений при расчете поля, рассеянного морской поверхностью, оценивалась на основе закона сохранения энергии, согласно которому мощность падающего поля P_{Π} должна быть равна мощности рассеянного поля P_p с учетом части мощности, поглощенной резистивными вставками $P_{\text{вст}}$:

$$P_{\Pi} = P_p + P_{\text{вст}}. \quad (9)$$

Мощность падающего поля вычислялась по формуле [18], [21]

$$P_{\Pi} = Z_0 H_0^2 \sin \theta_{\Pi}, \quad (10)$$

где H_0 – амплитуда напряженности падающего поля.

Мощность поля, рассеянного участком морской поверхности, вычислялась по формуле [21]

$$P_p = \frac{k}{8\pi} \frac{Z_0}{2} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} |W(\theta_p)|^2 d\theta_p, \quad (11)$$

* Точка наблюдения – точка на морской поверхности, в которой рассчитывается плотность поверхностного тока. Точка интегрирования – точка на морской поверхности, электромагнитное поле от которой вносит вклад в плотность поверхностного тока, определяемого в точке наблюдения.

где

$$W(\theta_p) = \int_{-L/2}^{+L/2} J(x) ik [-y'(x) \sin \theta_p + \cos \theta_p] \times \exp\{ik[-x \sin \theta_p + y(x) \cos \theta_p]\} dx, \quad (12)$$

причем $J(x)$ – плотность поверхностного тока, вычисленная из (3).

Мощность, поглощенная на резистивных вставках, определялась по формуле

$$P_{вст} = H_0^2 \sin^2 \theta_{п} \int_{-L/2}^{+L/2} R_0(x) dx. \quad (13)$$

Окончательно, совокупная погрешность всех вычислений при решении задачи рассеяния оценивалась как [21]

$$\delta = 1 - \left(\frac{P_p + P_{вст}}{P_{п}} \right). \quad (14)$$

Математическое моделирование ДСС. Моделирование ДСС проведено в программном пакете MATLAB в три этапа.

На первом этапе с помощью спектрального метода [18] для фиксированного значения средне-

Таблица 1. Параметры генерации модели морской поверхности

Table 1. Parameters for generating of the sea surface model

Параметр	Значение
Длина волны падающего поля, м	0.03
Длина участка морской поверхности, м	10
Угол облучения морской поверхности поля ($\theta_{п}$), ...°	2
Длина одного сегмента морской поверхности (Δx), м	0.01
Среднеквадратическое отклонение ординат морской поверхности (σ_y), м	0.025; 0.1
Временной интервал между реализациями морской поверхности (Δt), с	0.0135
Длительность интервала анализа (T_a), с	7

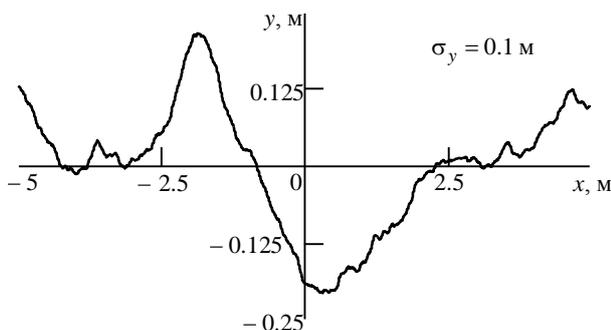


Рис. 2. Пример реализации участка морской поверхности
Fig. 2. An example of the implementation of the sea surface plot

квадратического отклонения (СКО) ординат морской поверхности σ_y генерировались временные реализации участка морской поверхности заданной длины (всего 520 реализаций с временным интервалом между соседними реализациями Δt).

С целью сравнения и последующего анализа моделирование ДСС проводилось для двух значений СКО ординат морской поверхности. Параметры, используемые для генерации, представлены в табл. 1, пример реализации показан на рис. 2*.

На втором этапе моделирования согласно формулам (2)–(14) с помощью МИУ рассчитывалось электромагнитное поле, рассеиваемое в направлении к РЛС, в зависимости от времени для каждой реализации морской поверхности. При этом направление ветра, определяющее движение морских волн, полагалось перпендикулярным направлению облучения морской поверхности. Погрешность решения задачи рассеяния в среднем не превышала 25 %.

На третьем этапе моделирования рассчитывался ДСС от морской поверхности по мощности согласно формуле [11]

$$S(f_d, \theta_{п}, \theta_p) = \left| \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} u(t, \theta_{п}, \theta_p) \exp(-j2\pi f_d t) dt \right|^2,$$

где T_a – длительность интервала анализа; u – поле, рассеиваемое морской поверхностью, в точке приема РЛС; f_d – доплеровский сдвиг частоты; t – время.

Длительность интервала анализа сигналов для вычисления ДСС составила 7 с для обеспечения необходимого разрешения по доплеровской частоте. Действия по описанным этапам повторялись 100 раз для получения необходимого числа реализаций ДСС.

Далее полученные данные обрабатывались с целью формирования математической модели ДСС и последующего анализа.

Расчеты проводились на персональном компьютере с ОС Windows 7, процессором Intel Core i5 2430M (2 × 2.4 ГГц) и ОЗУ емкостью 4 Гбайт. При этом расчет ДСС для одной реализации морской поверхности занимал в среднем 12 с. На выполнение моделирования и расчет ДСС было затрачено 8 дней.

* Начало координат расположено в центре облучаемого участка невзволнованной морской поверхности.

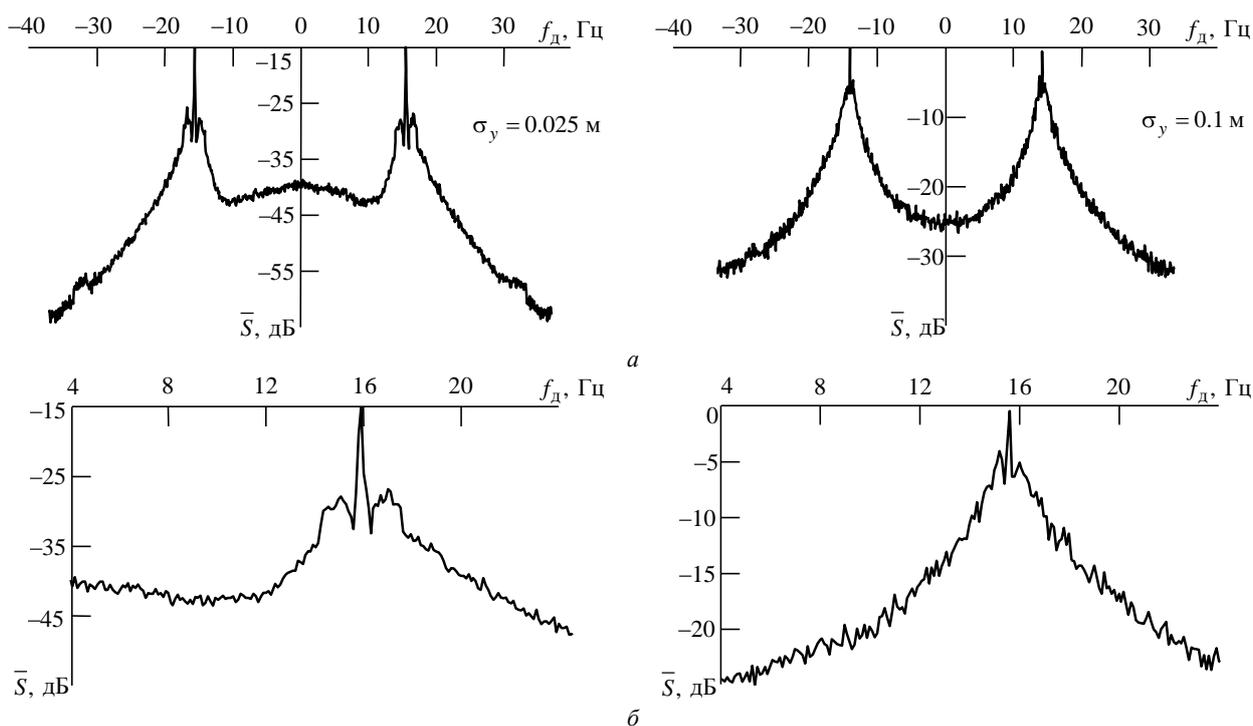


Рис. 3. Детерминированная составляющая доплеровского спектра сигнала (а); фрагмент (б)
Fig. 3. Deterministic component of the Doppler signal spectrum (a); the fragment (b)

В дальнейшем анализе ДСС рассматривался как аддитивная смесь детерминированной $\overline{S}(f_d)$ и случайной ΔS составляющих:

$$S(f_d) = \overline{S}(f_d) + \Delta S.$$

Детерминированная составляющая ДСС для разных значений СКО ординат морской поверхности представлена на рис. 3, а. На рис. 3, б показаны фрагменты этих ДСС в увеличенном масштабе.

Анализируя рис. 3, а отметим два основных максимума, так называемые брэгговские линии,

Таблица 2. Параметры характерных элементов для области положительных частот доплеровского спектра
Table 2. Parameters of the characteristic elements for the region of the positive frequencies of the Doppler spectr

Параметр ДСС	σ_y , м	
	0.025	0.1
Частота основного максимума (f_{\max}), Гц	15.6	15.6
Ширина основного максимума, Гц	0.40	0.45
Относительная амплитуда основного максимума, дБ	-19.2	-4.27
Частота левого дополнительного максимума, Гц	14.6	15.0
Частота правого дополнительного максимума, Гц	16.6	16.2
Относительная амплитуда левого дополнительного максимума, дБ	-28.6	-10.4
Относительная амплитуда правого дополнительного максимума, дБ	-27.6	-10.5

обусловленные резонансным рассеянием радиоволн, падающих на морскую поверхность и соответствующих удаляющейся и приближающейся к РЛС морским волнам. Также можно отметить два дополнительных максимума в окрестности основного, которые обусловлены как резонансным, так и нерезонансным механизмами рассеяния.

Далее для упрощения анализа будем рассматривать только часть ДСС, соответствующую положительным частотам (рис. 3, б); для отрицательных частот подход к анализу аналогичный. Положения брэгговских линий на частотной оси, а также их ширины и другие параметры для этой части ДСС представлены в табл. 2.

Положение основного максимума детерминированной составляющей ДСС по частоте рассчитывается по формуле [2]

$$f_{d \max} = \sqrt{gK_B + (\sigma_B/\rho_B)K_B^3}/2\pi, \quad (15)$$

где $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – гравитационная постоянная; $K_B = 2\pi/\Lambda_B$ – волновое число морской волны; $\sigma_B = 74.3 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ – поверхностное натяжение на границе раздела сред "воздух – морская вода"; $\rho_B = 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность морской воды, причем

$$\Lambda_B = \lambda/(2 \cos \theta_{\Pi}) \quad (16)$$

Таблица 3. Параметры моделирования для $\sigma_y = 0.025$ м

Table 3. Simulation options for $\sigma_y = 0.025$ m

Параметр	$\sigma_y = 0.025$ м				
	m				
	1	2	3	4	5
P	4	3	3	3	4
$f_{1,m}$, Гц	0	13.9	15.3	16	17.3
$f_{2,m}$, Гц	13.9	15.3	16	17.3	37
$a_{4,m}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	$-4.2 \cdot 10^{-5}$
$a_{3,m}$	$-55.2 \cdot 10^{-3}$	2.753	226.75	1.045	$2.4 \cdot 10^{-3}$
$a_{2,m}$	0.336	-129.22	$-1.08 \cdot 10^4$	-62.6	0.041
$a_{1,m}$	-0.921	$2.01 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^5$	$1.22 \cdot 10^3$	-5.504
$a_{0,m}$	-39.386	$-1.04 \cdot 10^4$	$-8.95 \cdot 10^5$	$-7.73 \cdot 10^3$	41.16

Таблица 4. Параметры моделирования для $\sigma_y = 0.1$ м

Table 4. Simulation options for $\sigma_y = 0.1$ m

Параметр	$\sigma_y = 0.1$ м				
	m				
	1	2	3	4	5
P	4	3	3	3	4
$f_{1,m}$, Гц	0	14.3	15.3	16	17.3
$f_{2,m}$, Гц	14.3	15.3	16	17.3	37
$a_{4,m}$	$8.79 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	$-3.9 \cdot 10^{-4}$
$a_{3,m}$	$-17 \cdot 10^{-3}$	-1.04	236.84	5.467	$36.7 \cdot 10^{-3}$
$a_{2,m}$	0.19	$1.37 \cdot 10^3$	$1.11 \cdot 10^4$	-276.45	-1.16
$a_{1,m}$	-0.634	$-2.02 \cdot 10^4$	$1.76 \cdot 10^5$	$4.65 \cdot 10^3$	12.1
$a_{0,m}$	-31.22	$9.92 \cdot 10^4$	$-9.23 \cdot 10^5$	$-2.61 \cdot 10^4$	-33.85

– длина морской волны, порождающая основной максимум в детерминированной составляющей ДСС; λ – длина радиоволны, падающей на морскую поверхность.

Расчеты по формулам (15) и (16) подтверждают значение частоты основного максимума детерминированной составляющей ДСС (табл. 2).

Учитывая характер детерминированной составляющей ДСС как функции частоты (один ос-

новной максимум, два дополнительных максимума и два участка по их краям), предложено разделить ее на пять неперекрывающихся частотных интервалов и выполнить аппроксимацию независимо в каждом из них:

$$\bar{S}(f_d) = \sum_{m=1}^5 F_m(f_d),$$

где

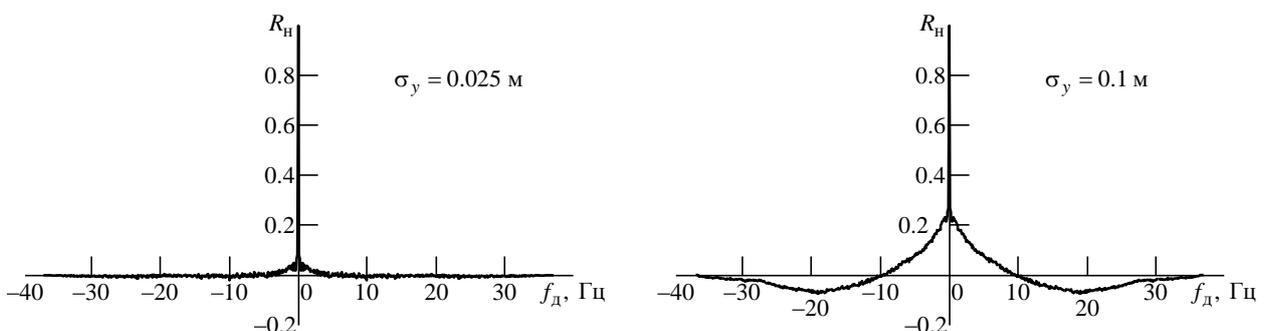


Рис. 4. Нормированная корреляционная функция случайной составляющей доплеровского спектра сигнала
 Fig. 4. The normalized correlation function of the random component of the Doppler signal spectrum

$$\begin{cases} F_m(f) = a_P \cdot m f^P + a_{P-1} \cdot m f^{P-1} + \dots + a_0 \cdot m, \\ f \geq f_{1,m}, f \leq f_{2,m}; \\ F_m(f) = 0, f < f_{1,m}, f > f_{2,m}. \end{cases}$$

Значения $a_{P,m}$, $f_{1,m}$, $f_{2,m}$, P , приведены в табл. 3, 4.

Средняя ошибка аппроксимации детерминированной составляющей ДСС составила 0.13 % при СКО ординат морской поверхности 0.025 м и 0.17 % при СКО 0.1 м.

Случайная составляющая ДСС представлялась статистической моделью, согласно которой она была реализацией случайного стационарного процесса с нулевым математическим ожиданием и заданными корреляционной функцией (КФ) и СКО. В ходе анализа данных моделирования при использовании критерия согласия Пирсона установлено, что случайная составляющая подчиняется гамма-распределению при уровне значимости 0.95. Значения СКО случайной составляющей ДСС составили 5.6 дБ при $\sigma_y = 0.025$ м и 6.05 дБ при $\sigma_y = 0.1$ м.

Нормированные КФ случайной составляющей ДСС $R_n(\Delta f_d)$ представлены на рис. 4. Интервал корреляции случайной составляющей ДСС для $\sigma_y = 0.025$ м составил 0.59 Гц, а для $\sigma_y = 0.1$ м 3.85 Гц. Единица измерения интервала корреляции, как и частоты – герц, поскольку от нее зависит моделируемая величина – случайная составляющая ДСС.

Заключение. В результате выполнения моделирования разработана математическая модель ДСС для сантиметрового диапазона радиоволн с вертикальной поляризацией, включающая в себя детерминированную и случайную составляющие для ракурса облучения поперек направления действия

ветра. Получены математические выражения для указанных составляющих при двух различных СКО ординат морской поверхности, соответствующих небольшой бальности морского волнения.

Анализируя полученные результаты для фиксированного угла скольжения и при увеличении СКО ординат морской поверхности можно сделать следующие выводы:

1. Положение основного максимума по частоте остается неизменным и подтверждается теоретическим расчетом.

2. Ширина основного максимума детерминированной составляющей ДСС (по уровню –3 дБ), содержащая информацию о ветровом воздействии на морскую поверхность, увеличивается. Увеличение скорости ветра над морской поверхностью приводит к росту СКО ординат морской поверхности.

3. Относительная амплитуда основного и дополнительных максимумов детерминированной составляющей ДСС увеличивается. Морская поверхность становится более шероховатой и ее коэффициент обратного рассеяния в направлении к РЛС увеличивается.

4. Уменьшается разница в относительных амплитудах между основным и дополнительными максимумами ДСС. Данный эффект обусловлен увеличением числа участков морской поверхности, выполняющих нерезонансное рассеяние, вследствие увеличения морского волнения.

Таким образом, в разработанной математической модели ДСС учитываются физические эффекты взаимодействия радиоволн с взволнованной морской поверхностью, характерные для скользящих углов облучения. Указанная модель может быть использована для генерации входных данных при разработке алгоритмов обработки эхосигналов РЛС, применяемых для задач океанологии и экологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, № 6. С.46–48.

2. X-band microwave backscattering from ocean waves / P. Y. Lee, J. D. Barter, K. L. Beach; C. L. Hindman, B. M. Lade, H. Rungaldier, J. C. Shelton, A. B. Williams, R. Yee, H. C. Yuen // J. of geophysical research, 1995. Vol. 100, № 2. P. 2591–2611. doi: 10.1029/94JC02741

3. Yang P., Guo L., Jia C. Electromagnetic scattering and Doppler spectrum simulation of time-varying oil-covered

nonlinear sea surface // J. of Applied Remote Sensing. 2016. Vol. 10, № 1. P. 1–14. doi: 10.1117/1.JRS.10.016015

4. Wang J., Xu X. Doppler simulation and analysis for 2-D sea surface up to Ku-band // IEEE trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. GRS-54, № 1. P. 466–478. doi: 10.1109/TGRS.2015.2459598

5. Raynal A. M., Doerry A. W. Doppler characteristics of sea clutter // Sandia Report SAND2010-3828. 2010. P. 27–29. doi: 10.2172/992329

6. Юровский Ю. Ю., Малиновский В. В., Смолов В. Е. Радиолокационные методы мониторинга прибрежной зоны: возможности и проблемы использования.

Севастополь: Изд-во Мор. гидрофиз. ин-та НАН Украины, 2008. 75 с. (Совр. пробл. океанологии. Вып. 4).

7. Малиновский В. В. Оценка связи параметров радиолокационного сигнала, отраженного от моря при малых углах скольжения, с характеристиками обрушений ветровых волн // Мор. гидрофиз. журн. 1991. № 6. С. 32–41.

8. Walker D. Experimentally motivated model for low grazing angle radar Doppler spectra of the sea surface // IEE proc. on Radar, Sonar and Navigation, 2000. Vol. RSN-147, № 3. P.114–120. doi: 10.1049/ip-rsn:20000386

9. Johnson J. T., Toporkov J., Brown G. A Numerical study of backscattering from time-evolving sea surfaces: comparison of hydrodynamic models // IEEE trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001. Vol. GRS-39, № 11. P. 2411–2420. doi: 10.1109/36.964977

10. Toporkov J. K., Brown G. S. Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces // IEEE trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2000. Vol. GRS-38, № 4. P. 1616–1624

11. Numerical simulation of backscatter from linear and nonlinear ocean surface realization / C. L. Rino, T. L. Crystal, A. K. Koide, H. Ngo, H. Guthart // Radio Science, 1991. Vol. 26, № 1. P. 51–71. doi: 10.1029/90RS01687

12. Леонтьев В. В., Пименов А. А. Обоснование выбора математической модели морской поверхности при решении задачи радиолокационного экологического мониторинга // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. № 2. С. 75–79.

13. Bourlier C., Saillard J., Berginc G. Intrinsic infrared radiation of the sea surface // Progress in electro-

magnetics research. 2000. Vol. 27. P. 185–335. doi: 10.2528/PIER99080103

14. Шмелев А. Б. Рассеяние волн статистически неровными поверхностями // Успехи физ. наук. 1972. Т. 106, вып. 3. С. 459–480.

15. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

16. Сколник М. Справочник по радиолокации. Т. 1. М.: Сов. радио, 1976. 326 с.

17. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2000. 536 с.

18. Scattering of Electromagnetic waves: Numerical simulation / L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, C. Ao. New York: John Wiley and Sons, 2001. 716 p. doi:10.1002/0471224308

19. Oh Y., Sarabandi K. Improved numerical simulation of electromagnetic wave scattering from perfectly conducting random surfaces // IEE proc. – microwave antennas propagation. 1997. Vol. 144, iss. 4. P. 256–260. doi: 10.1049/ip-map:19971189

20. Li Y., Wu Z., Zhao J. High-Efficiency numerical computing in low-grazing scattering from sea surface using resistive tapering and forward-backward method // 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. 13–16 October 2014, Beijing, China. Bellingham: SPIE, 2014. P.1101–1104. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992702

21. Бородин М. А., Леонтьев В. В., Третьякова О. А. Рассеяние вертикально поляризованной электромагнитной волны шероховатой поверхностью при скользком облучении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 5. С. 33–46.

Бородин Михаил Анатольевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 30 научных работ. Сфера интересов – радиолокация; распространение и рассеяние радиоволн; радиотехнические системы мониторинга окружающей среды.

<https://orcid.org/0000-0002-5237-9118>

E-mail: boroda84@gmail.com

Михайлов Вячеслав Николаевич – инженер по специальности "Радиотехника" (2000, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), ассистент кафедры радиотехнических систем указанного университета, научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация; эвристические алгоритмы; цифровая обработка сигналов.

E-mail: VNMikhailov@etu.ru

Филиппова Полина Александровна – бакалавр (2017) по направлению "Радиотехника", студентка 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера интересов – радиолокация; распространение и рассеяние радиоволн.

<https://orcid.org/0000-0002-6682-6919>

E-mail: malinovka.vesna@mail.ru

REFERENCES

1. Leont'ev V. V., Pimenov A. A. New Paradigm for Solving the Problem of Radar Detection of Oil Films with Sliding Angles of Irradiation of the Sea Surface. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, vol. 18, no. 6, pp. 46–48. (In Russ.)

2. Lee P. Y., Barter J. D., Beach K. L., Hindman C. L., Lade B. M., Rungaldier H., Shelton J. C., Williams A. B., Yee R., Yuen H. C. X-band microwave backscattering

from ocean waves. J. of geophysical research, 1995, vol. 100, no. 2, pp. 2591–2611. doi: 10.1029/94JC02741

3. Yang P., Guo L., Jia C. Electromagnetic scattering and Doppler spectrum simulation of time-varying oil-covered nonlinear sea surface. J. of Applied Remote Sensing, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 1–14. doi: 10.1117/1.JRS.10.016015

4. Wang J., Xu X. Doppler simulation and analysis for 2-D sea surface up to Ku-band. IEEE trans. on Geoscience and

Remote Sensing. 2016, vol. GRS-54, no. 1, pp. 466–478. doi: 10.1109/TGRS.2015.2459598

5. Raynal A. M., Doerry A. W. Doppler characteristics of sea clutter. Sandia Report SAND2010-3828, 2010, pp. 27–29. doi: 10.2172/992329

6. Yurovskii Yu. Yu., Malinovskii V. V., Smolov V. E. Radar Methods Of Coastal Zone Monitoring: Opportunities And Problems Of Use. Sevastopol, *Izd-vo Morskogo gidrofizicheskogo instituta NAN Ukrainy*, 2008, 75 p. (Modern problems of oceanology. Vol. 4). (In Russ.)

7. Malinovskii V. V. Estimation of the Relationship of the Parameters of the Radar Signal Reflected from the Sea at Small Slip Angles with the Characteristics of Wind-Wave Collapses. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal], 1991, no. 6, pp. 32–41. (In Russ.)

8. Walker D. Experimentally motivated model for low grazing angle radar Doppler spectra of the sea surface. IEE proc. on Radar, Sonar and Navigation, 2000, vol. RSN-147, no. 3, pp.114–120. doi: 10.1049/ip-rsn:20000386

9. Johnson J. T., Toporkov J., Brown G. A Numerical study of backscattering from time-evolving sea surfaces: comprasion of hydrodynamic models. IEEE trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2001, vol. GRS-39, no. 11, pp. 2411–2420. doi: 10.1109/36.964977

10. Toporkov J. K., Brown G. S. Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces. IEEE trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2000, vol. GRS-38, no. 4, pp. 1616–1624.

11. Rino C. L., Crystal T. L., Koide A. K., Ngo H., Guthart H. 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.rf

12. Leont'ev V. V., Pimenov A. A. Justification of the Choice of a Mathematical Model of the Sea Surface When Solving the Problem of Radiolocation Environmen-

tal Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2016, vol. 19, no. 2, pp. 75–79. (In Russ.)

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

14. Shmelev A. B. Wave Scattering by Statistically Uneven Surfaces. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in the Physical Sciences], 1972, vol. 106, no. 3, pp. 459–480. (In Russ.)

15. Bass F. G., Fuks I. M. *Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti* [Wave Scattering on a Statistically Uneven Surface]. Moscow, *Nauka*, 1972, 424 p. (In Russ.)

16. Skolnik M. *Spravochnik po radiolokatsii* [Handbook of radar]. Vol. 1, Moscow, *Sov. radio*, 1976, 326 p. (In Russ.)

17. Pimenov Yu. V., Vol'man V. I., Muravtsov A. D. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2000, 536 p. (In Russ.)

18. Tsang L., Kong J. A., Ding K.-H., Ao C. Scattering of Electromagnetic waves: Numerical simulation. New York, John Wiley and Sons, 2001, 716 p. doi:10.1002/0471224308

19. Oh Y., Sarabandi K. Improved numerical simulation of electromagnetic wave scattering from perfectly conducting random surfaces. IEE proc. – microwave antennas propagation. 1997, vol. 144, iss. 4, pp. 256–260. doi: 10.1049/ip-map:19971189

20. Li Y., Wu Z., Zhao J. High-Efficiency numerical computing in low-grazing scattering from sea surface using resistive tapering and forward-backward method. 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. 13–16 October 2014, Beijing, China. Bellingham, SPIE, 2014, pp.1101–1104. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992702

21. Borodin M. A., Leont'ev V. V., Tretyakova O. A. Scattering of a Vertically Polarized Electro-Magnetic Wave by a Rough Surface with Gliding Irradiation Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2010, vol. 13, no. 5, pp. 33–46. (In Russ.)

Mikhail A. Borodin – Cand. of Sci. (Engineering) (2011), Associate Professor of the Department of Radio Engineering System of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 30 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; propagation and scattering of radio waves; radio engineering system for ecology monitoring. <https://orcid.org/0000-0002-5237-9118>

E-mail: boroda84@gmail.com

Vyacheslav N. Mikhaylov – Dipl.-engineer on radio engineering (2000, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"), assistant of Radio Engineering Systems Department of named university, the scientist of "Prognosis" Research Institute. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: radar detection and location; heuristic algorithms and digital signal processing.

E-mail: VNMikhaylov@etu.ru

Polina A. Filippova – bachelor degree (2017) in radio engineering, 2nd year master degree student of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". Area of expertise: radiolocation; propagation and scattering of radio waves.

<https://orcid.org/0000-0002-6682-6919>

E-mail: malinovka.vesna@mail.ru