УДК 537.874.4 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-8-5-15

Моделирование обнаружения малоразмерных объектов на морской поверхности с учетом эффекта затенения

А. А. Иванов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

aaivanov1@stud.etu.ru

Аннотация.

Цель работы. Разработка комплексной математической модели обнаружения малоразмерных надводных объектов (например, катеров с эффективной площадью рассеяния 2 м^2) с использованием наземной радиолокационной станции (высота антенны 10 м, частота 10 ГГц, вертикальная поляризация) в условиях морского волнения. Исследование направлено на количественную оценку влияния затенения объекта гребнями волн на отношение сигнал/помеха и вероятность обнаружения при различных состояниях моря.

Материалы и методы. В основе модели лежит двухмасштабный подход с разделением волнового спектра на крупные (гравитационные) и мелкие (капиллярные) волны. Генерация морской поверхности выполнена методом суперпозиции гармоник с использованием спектра Пирсона–Московица для крупных волн и модифицированного спектра Эльфухаили для мелких волн. Расчет удельной эффективной площади рассеяния моря выполнен по формулам двухмасштабной модели (брэгговское рассеяние, поляризационные коэффициенты, поправка на асимметрию волн). Учтены эффекты затенения поверхности по лучам визирования, геометрическое затенение объекта и кривизна Земли. Моделирование проведено для трех состояний моря по шкале Дугласа: спокойное (1 балл, высота волн 0.15 м), умеренное (3 балла, 1.2 м) и сильное (5 баллов, 3.25 м). Для каждого состояния сгенерировано по 1000 реализаций случайного волнового поля, выполнена статистическая обработка результатов.

Результаты. Установлено, что эффективная площадь рассеяния цели снижается с 1.95 м^2 (1 балл) до 0.14 м^2 (5 баллов) из-за затенения гребнями волн. Удельная эффективная площадь рассеяния моря (медианное значение) возрастает с –48.4 до –30.9 дБ при переходе от 1 к 5 баллам. Отношение сигнал/помеха уменьшается с +8.1 дБ при спокойном море до –22.9 дБ при сильном волнении.

Ключевые слова: морское волнение, эффективная поверхность рассеяния, затенение, радиолокационное обнаружение, малоразмерные объекты, математическое моделирование, отношение сигнал/помеха, вероятность обнаружения

Для цитирования: Иванов А. А. Моделирование обнаружения малоразмерных объектов на морской поверхности с учетом эффекта затенения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 8. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-8-5-15.

© Иванов А. А., 2026

Original article

Modeling the Detection of Small Targets on the Sea Surface, Considering the Shading Effect

A. A. Ivanov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

aaivanov1@stud.etu.ru

Abstract.

Purpose of the work. Development of a complex mathematical model for detecting small-sized surface targets (e. g., boats with a radar cross-section of 2 m^2) using a ground-based radar station (antenna height 10 m, frequency 10 GHz, vertical polarization) under sea wave conditions. The study aims to quantitatively assess the effect of target shadowing by wave crests on the signal-to-clutter ratio and detection probability under various sea states.

Materials and methods. The model is based on a two-scale approach (TSM) with separation of the wave spectrum into large (gravity) and small (capillary) waves. The sea surface was generated by the method of harmonic superposition using the Pierson–Moskowitz spectrum for large waves and a modified Elfouhaily spectrum for small waves. The specific normalized radar cross-section of the sea surface was calculated using two-scale model formulas (Bragg scattering, polarization coefficients, wave asymmetry correction). Surface shadowing along the lines of sight, geometric shadowing of the target, and Earth's curvature were taken into account. Modeling was performed for three sea states on the Douglas scale: calm (1 point, wave height 0.15 m), moderate (3 points, 1.2 m), and rough (5 points, 3.25 m). For each state, 1000 realizations of the random wave field were generated, and the results were statistically processed.

Results. It was established that the target's radar cross-section decreases from 1.95 m^2 (1 point) to 0.14 m^2 (5 points) due to shadowing by wave crests. The specific normalized radar cross-section of the sea surface (median value) increases from –48.4 dB to –30.9 dB when transitioning from 1 to 5 points. The signal-to-clutter ratio decreases from +8.1 dB in calm seas to –22.9 dB in rough seas.

Keywords: sea waves, effective scattering surface, shading, radar detection, small-size targets, mathematical modeling, signal-to-noise ratio, probability of detection

For citation: Ivanov A. A. Modeling the Detection of Small Targets on the Sea Surface, Considering the Shading Effect // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 8. P. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-8-5-15.

Введение. В задаче радиолокационного обнаружения малоразмерных объектов на море гребни волн затеняют лодку и другие удаленные участки поверхности. Процесс обнаружения основан на двух принципах:

– геометрический: луч радара должен достичь лодки без пересечения более высокой волны;

– энергетический: отраженный от лодки сигнал должен превышать отражения от морской поверхности с учетом статистических флуктуаций. Эффективность обнаружения зависит от вероятности того, что в случайный момент времени выполняются оба условия, что, в свою очередь, определяется состоянием моря, параметрами радиолокационной станции (далее – РЛС) и характеристиками объекта [1].

Модель охватывает все этапы процесса обнаружения: генерацию морской поверхности методом Лонге–Хиггинса, расчет видимости участков поверхности, моделирование удельной эффективной площади рассеяния (ЭПР) по двухмасштабной модели TSM [2]–[4], траекторное моделирование объекта с учетом затенения, расчет отношения сигнал/помеха (ОСП) и окончательную оценку вероятности обнаружения. Это позволяет получить количественные зависимости вероятности обнаружения от состояния моря, показывающие, что при волнении 3 балла и выше ОСП становится отрицательным, что делает обнаружение стандартными методами практически невозможным.

Постановка задачи. Эффект затенения представляет собой геометрическое явление, при котором более близкие к наблюдателю элементы рельефа (гребни волн) частично или полностью перекрывают линию прямой видимости на удаленные участки поверхности. В контексте радиолокационного наблюдения это приводит к двум взаимосвязанным последствиям:

1. Статистическое снижение средней эффективной поверхности рассеяния моря из-за уменьшения числа видимых рассеивателей.

2. Увеличение дисперсии мгновенных значений ЭПР вследствие преимущественного наблюдения ближних гребней волн.

Для наземной РЛС, расположенной на высоте h_a над средним уровнем моря, линия визирования на точку поверхности с координатами (r, θ) описывается уравнением

$$z(r) = h_a - \frac{r^2}{2R_\text{e}},$$

где R_e – эффективный радиус Земли с учетом рефракции; r – горизонтальная дальность от точки стояния РЛС; θ – азимутальный угол (пеленг).

Точка поверхности с ординатой $z_\text{s}(r, \theta, t)$ считается видимой в момент времени t, если выполняется условие для всех промежуточных точек вдоль линии визирования:

$$z_\text{s}(r,\ \theta,\ t) < z(r).$$

При создании модели морской поверхности морское волнение описывается стационарным случайным процессом. Спектральные характеристики соответствуют установившемуся ветровому волнению, описываемому спектром Пирсона–Московица для гравитационных волн (волны на поверхности воды, восстанавливающей силой которых служит сила тяжести, формируют основные гребни и склоны морской поверхности) и моделью Эльфухаили для капиллярных волн (волны, восстанавливающая сила которых – поверхностное натяжение образуют мелкую рябь на гребнях крупных волн).

Рассеяние от морской поверхности описывается двухмасштабной моделью (TSM) [5]:

$$\sigma_{vv}^{1s}(\theta_i') = 8\pi k_i^4 \cos^4\theta_i' \left|\alpha_{vv}\right|^2 W(2k_i \sin\theta_i', 0),$$

где $\alpha_{vv} = \dfrac{(\varepsilon_r - 1)\left[(\varepsilon_r - 1)\sin^2\theta_i' + \varepsilon_r\right]}{\left[\varepsilon_r \cos\theta_i' + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i'}\right]^2}$, где θ_i' – локальный угол падения, отсчитываемый от вертикали к направлению на радар; α_{vv} – поляризационный коэффициент, который получается из коэффициентов Френеля для вертикальной поляризации и учитывает диэлектрические свойства морской воды; W – двумерный спектр высот мелкомасштабных волн, аргумент которого, $2k_i \sin\theta_i'$ – это брэгговское волновое число, при котором возникает резонансное рассеяние; ε_r – комплексная диэлектрическая проницаемость.

Удельная ЭПР моря рассчитывается на основе спектра мелких волн (модель Эльфухаили) и локальных углов падения, а корреляционные свойства помех соответствуют распределению Рэлея [6].

Входные параметры модели:

• Параметры РЛС: $h_a = 10$ м; $f = 10$ ГГц; вертикальная поляризация VV (передача и прием вертикально поляризованной электромагнитной волны).

• Параметры объекта: $\sigma_t = 2$ м^2 (полная эффективная площадь рассеяния объекта); $h_t = 1.5$ м (мгновенная высота поверхности в точке расположения объекта).

• Диапазон дальностей: $R \in [0, 1500]$ м.

• Состояния моря: 1, 3, 5 баллов по шкале Дугласа.

• Вероятность ложной тревоги: $P(f_a) = 10^{-3}$.

При создании модели были допущены следующие приближения:

1. Модель не учитывает нестационарность волновых процессов.

2. Предполагается полное затенение (без учета дифракции и многократного рассеяния).

3. Не учитывается влияние атмосферных условий на распространение радиоволн.

4. Модель объекта не включает угловую зависимость ЭПР.

Моделирование морской поверхности. Для моделирования взволнованной морской поверхности проведем вычисления для трех состояний моря – 1, 3 и 5 баллов по шкале Дугласа. В основе построения лежит спектральный метод Лонге–Хиггинса (метод генерации случайной морской поверхности суперпозицией большого числа гармонических волн с амплитудами, определяемыми из энергетического спектра волнения, и случайными фазами) [7], [8], согласно которому поверхность представляется в виде суперпозиции множества синусоидальных волн с различными амплитудами, длинами и направлениями распространения, что позволяет воспроизвести случайный характер реального волнения.

При формировании профиля волнения используются два спектральных диапазона. Морская поверхность представлена как суперпозиция элементарных плоских синусоидальных волн с разделением на два масштаба:

$$z(x, y, t) = z_{\text{кр}(x, y, t)} + z_{\text{мелк}(x, y, t)},$$

где $z_{\text{кр}}$ – крупные волны (гравитационные, $k < k_c$) формируют макрорельеф; $z_{\text{мелк}}$ – мелкие волны (капиллярные, $k \geq k_c$) создают микрорельеф для брэгговского рассеяния. Разделение масштабов осуществляется при волновом числе

Табл. 1. Параметры моделирования
Tab. 1. Simulation parameters

Состояние моря по шкале Дугласа в баллах	Скорость ветра на высоте 10 м U_{10}, м/с	Средняя высота одной трети самых высоких волн $h_{1/3}$, м	Пиковая круговая частота спектра ω_m, рад/с	Волновое число пика спектра k_p, рад/м	Энергия мелких волн
1 – спокойное море	2.5	0.15	3.45	1.21	15 % от общей энергии
3 – умеренное волнение	7.0	1.20	1.23	0.15	15 % от общей энергии
5 – сильное волнение	11.6	3.25	0.74	0.06	15 % от общей энергии

$$k_c = \frac{k_i}{6} = 34.9 \text{ рад/м},$$

где k_i – волновое число падающей радиоволны λ (рад/м), в нашем случае $\lambda = 0.03$ м (частота 10 ГГц), поэтому $k_i \approx 209.4$ рад/м; k_c – пороговое волновое число, разделяющее крупные и мелкие волны. Значение $k_c \approx 34.9$ рад/м соответствует длине волны $\lambda_c = 2\pi/k_c \approx 0.18$ м; λ_c – длина волны на границе разделения масштабов.

Крупные гравитационные волны, определяющие общий рельеф поверхности, описываются спектром Пирсона–Московица [9]

$$S(\omega) = 4.98\left(\frac{m_0}{\omega_m}\right)\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^{-5}\exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^{-4}\right],$$

где ω – круговая частота волн, рад/с; $\omega_m = g/U$ – пиковая частота; g – ускорение свободного падения; U – скорость ветра; $m_0 = \hbar^2/(2\pi)$ – нулевой момент спектра, $\hbar$ – средняя высота волн.

Мелкие капиллярные волны (рябь), играющие ключевую роль в рассеянии радиолокационного сигнала, моделируются на модели спектра Эльфухаили (эмпирическая модель, описывающая полный частотно-угловой спектр ветрового волнения в широком диапазоне волновых чисел, объединяющая гравитационную и капиллярную области спектра), что обеспечивает корректное отражение микрошероховатости. Эти мелкие (капиллярно-гравитационные) волны создают основной механизм обратного рассеяния радиоволн – брэгговское рассеяние. Крупные волны в двухмасштабной модели лишь наклоняют поверхность, изменяя локальный угол падения, но само рассеяние определяется именно мелкими волнами. Спектр мелких волн [10] для $K < k_c$

$$W(K,\varphi) = B(K)D(\varphi)\exp\left[-\left(\frac{k_c - K}{k_c}\right)^4\right],$$

где K – пространственное волновое число резонансных (брэгговских) волн; $B(K)$ – амплитудный множитель; $D(\varphi)$ – угловая функция направленности.

Выходными данными модели служат трехмерные массивы высот поверхности, организованные по координатам «азимут–дальность–номер реализации», а также соответствующие каждому состоянию моря параметры ветра и волнения – скорость ветра на высоте 10 м и значительная высота волн (средняя высота одной трети самых высоких волн за период наблюдения).

Угловой спектр принят в форме [11]

$$S^0(\omega,\theta) = \left[\frac{\Gamma(s+1)}{2\sqrt{\pi\Gamma(s+0.5)}}\right]\cos^{2s}\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция; s – параметр направленности, зависит от отношения частоты к пиковой.

Для трех состояний моря использованы параметры, представленные в табл. 1:

Поверхность генерировалась в полярной системе координат с параметрами:

– дальность: 10…1500 м с шагом 10 м;

– азимут: 0…360° с шагом 1°;

– количество реализаций: 1000 для каждого состояния моря;

– число гармоник: 60 – для крупных волн, 80 – для мелких;

– усиление мелких волн: ×50 для увеличения вклада в рассеяние.

Алгоритм определения видимости. Следующим этапом работы стало определение зон видимости морской поверхности с учетом затенения, создаваемого рельефом волн, и кривизны Земли. Для каждой из 1000 сгенерированных ранее реализаций взволнованной поверхности и для каждого фиксированного направления (азимута) строился профиль высот вдоль луча распространения радиолокационного сигнала. Радар при этом полагался расположенным на высоте 10 м над уровнем спокойного моря. Алгоритм последовательно проверял, не перекрывает ли какая-

либо промежуточная волна, находящаяся ближе к наблюдателю, линию визирования до более удаленной точки поверхности. Если такое перекрытие существовало, то соответствующая точка классифицировалась как затененная. [12] Для корректного учета кривизны земной поверхности в расчеты вводилась эффективная высота радара (высота над линией визирования), которая уменьшается по мере увеличения дальности до наблюдаемого участка.

Участок поверхности считается видимым, если линия прямой видимости от антенны РЛС (высота 10 м) к этому участку не пересекает поверхность. С учетом кривизны Земли эффективная высота радара

$$H_{\text{эф}(r)} = H_{\text{рад}} - \frac{r^2}{2R_{\text{з}}},$$

где $R_{\text{з}} = 6378.1$ км; $H_{\text{рад}}$ – высота антенны РЛС над средним уровнем моря.

Для каждого азимутального направления строим профиль высот, где первая точка (ближняя зона) всегда видима. Для каждой последующей точки на расстоянии r рассчитывается текущий тангенс угла:

$$T_{\text{curr}} = \frac{z(r) - H_{\text{эф}(r)}}{r}.$$

Если $T_{\text{curr}} \geq T_{\max}$ (максимальный тангенс предыдущих видимых точек), точка видима, иначе – затенена. По результатам обработки всего ансамбля реализаций для каждой точки акватории в координатах «азимут–дальность» вычислялась вероятность ее видимости, определяемая как отношение числа реализаций, в которых данная точка не затенялась, к общему числу реализаций. Физически затенение возникает вследствие того, что более близкие к радару волны, имеющие значительную высоту, экранируют собой участки поверхности, расположенные за ними. Результаты расчета видимости представлены в табл. 2, а также визуализированы на рис. 1.

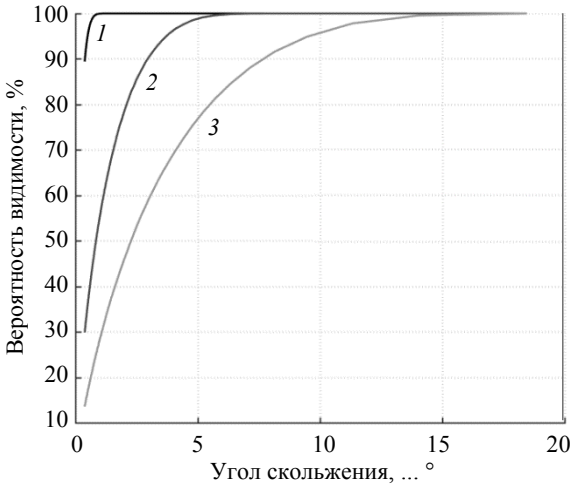


Рис. 1. Вероятность видимости поверхности в зависимости от угла скольжения для разных состояний моря в баллах: *1* – 1; *2* – 3; *3* – 5
Fig. 1. The probability of surface visibility depending on the sliding angle for different sea conditions in points: *1* – 1; *2* – 3; *3* – 5

Следующая часть алгоритма отвечает за расчет отражающих характеристик взволнованной морской поверхности, а именно – удельной эффективной площади рассеяния σ^0, выражаемой в децибелах. Для этого была использована двухмасштабная модель для вертикальной поляризации на частоте 10 ГГц с параметрами: скорость трения $u = 0.001(1.1 + 0.035U_{10})U_{10}$; волновое число минимальной фазовой скорости $k_m =$ = 363 рад/м; пиковое волновое число $k_p = \frac{0.77g}{U_{10}}$ [13]. Расчеты выполнялись для одной конкретной реализации рельефа, полученной на первом этапе работы, что позволило в дальнейшем сопоставить пространственное распределение отражающих свойств с геометрией волн.

Для каждой точки поверхности в пределах луча определялись два ключевых геометрических параметра: локальный угол падения луча, который формируется с учетом высоты стояния точки и уклона крупной волны в данном месте, и локальный угол скольжения. Локальный угол падения

Табл. 2. Результаты расчета видимости
Tab. 2. Visibility calculation results

Баллы	Видимость поверхности, %	Полностью видимые точки, %	Полностью невидимые точки, %
1	97.5	82.3	2.1
3	54.7	15.8	21.4
5	32.2	3.1	44.9

$$\theta'(r,\varphi) = \text{atan}\left(\frac{H_{\text{рад}} - \zeta(r,\varphi)}{r}\right),$$

где $\zeta(r, \varphi)$ – высота морской поверхности в точке с координатами (r, φ) (дальность и азимут); r – горизонтальная дальность до точки.

Эти параметры необходимы, поскольку они определяют условия рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Далее, в соответствии с двухмасштабным подходом, рассчитывался спектр мелких капиллярных волн на масштабе, равном половине длины волны зондирующего сигнала, что соответствует условию брэгговского резонанса. На основе рассчитанного спектра и с учетом поляризационных коэффициентов для вертикальной поляризации *VV* по формуле двухмасштабной модели вычислялось значение σ^0 в каждой дискретной точке акватории.

Участки, которые, согласно результатам предыдущего этапа моделирования, имели вероятность видимости менее одного процента, фактически экранированы от облучающего сигнала. Для таких точек значение σ^0 принудительно понижалось до пренебрежимо малого, поскольку в реальных условиях затененные участки не дают вклада в принимаемое отражение. В результате обработки для каждого состояния моря были получены двумерные карты распределения удельной эффективной площади рассеяния, а также рассчитаны основные статистические характеристики: среднее значение, медиана и стандартное отклонение σ^0. Эти данные в дальнейшем используются как исходная информация для моделирования помеховой обстановки и расчета отношения сигнал/помеха при обнаружении малоразмерных объектов. Удельная ЭПР (УЭПР) модифицируется с учетом вероятности видимости:

$$\sigma^0_{\text{кор}} = \sigma^0_{\text{TSM}} P_{\text{вид}} + \sigma^0_{\text{мин}} \left(1 - P_{\text{вид}}\right),$$

где $\sigma^0_{\text{мин}} = 1e-30$ – минимальное значение для невидимых участков; σ^0_{TSM} – УЭПР, рассчитанная по двухмасштабной модели в предположении, что данный элемент поверхности полностью виден; $P_{\text{вид}}$ – вероятность того, что данный участок поверхности видим радаром в данной реализации волнения. Результаты моделирования ЭПР представлены в табл. 3.

Параметры объекта задавались следующим образом: полная эффективная площадь рассеяния при отсутствии затенения принималась равной 2 м^2, высота центра рассеяния над средним уровнем моря составляла 1.5 м. Начальное положение объекта соответствовало дальности 1000 м и азимуту 0° относительно позиции радара. Движение объекта моделировалось со скоростью 10 узлов по курсу 45° в течение 120 с при дискретности 1 с.

Для каждого момента времени в пределах смоделированной траектории определялось текущее положение объекта в полярных координатах. На основе ансамбля из 1000 реализаций волнового рельефа, сгенерированных ранее, вычислялась средняя высота морской поверхности под объектом, а также рассчитывался угол скольжения луча, соединяющего радиолокатор с объектом. Далее вдоль луча от радара до объекта равномерно размещалось 20 контрольных точек, и если в какой-либо из реализаций высота волны в промежуточной точке превышала высоту линии визирования, объект для данной реализации считался геометрически затененным. Усреднением по всем 1000 реализациям определялась вероятность геометрического затенения объекта в каждом временном отсчете.

Итоговая вероятность видимости объекта формировалась как комбинация трех факторов. Базовую составляющую определяла зависимость вероятности обнаружения от угла скольжения, заимствованная из известных экспериментальных данных: чем меньше угол скольжения, тем ниже вероятность видимости вследствие ухудшения условий распространения сигнала. Вторым фактором была поправка на направление ветра, учитывающая, что при наблюдении вдоль ветра затенение выражено сильнее. Учет направления ветра (максимальное затенение вдоль ветра), коррекция на направление ветра – $P_{\text{вет}} = 1 - \alpha \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$, где $\Delta\varphi$ – разность азимутов

Табл. 3. Результаты моделирования ЭПР
Tab. 3. RCS modeling results

Баллы	σ^0_{TSM} (среднее), дБ	σ^0_{TSM} (медиана), дБ	σ^0_{TSM} (с учетом видимости), дБ	Стандартное отклонение
1	–44.7	–48.4	–46.1	2.4
3	–35.4	–37.2	–39.8	6.6
5	–30.1	–30.9	–35.5	8.8

объекта и направления ветра; $\alpha = 0.10$ (1 балл), 0.35 (3 балла), 0.60 (5 баллов) – эмпирический параметр, характеризующий степень анизотропии затенения в зависимости от направления ветра.

Третьим фактором выступала непосредственно рассчитанная вероятность геометрического затенения. На основе полученной интегральной вероятности для каждого момента времени методом статистических испытаний разыгрывалось бинарное событие «объект видим/объект невидим». Для геометрического затенения производилась проверка 20 точек вдоль луча визирования. Объект затенен, если

$$\zeta_{\text{пов}(r_i)} > H_{\text{рад}} - \left(H_{\text{рад}} - h_{\text{об}_{\text{эф}}}\right)\left(\frac{r_i}{r_{\text{об}}}\right),$$

где $\zeta_{\text{пов}(r_i)}$ – высота морской поверхности в промежуточной точке на расстоянии r_i от радара вдоль луча; $h_{\text{об}_{\text{эф}}}$ – эффективная высота объекта над тем же средним уровнем.

ЭПР объекта определялась следующим образом: в те моменты времени, когда объект признавался видимым, его ЭПР принималась равной полному значению 2 м^2,

$$\sigma_{\text{об}_{\text{эф}}} = \sigma_{\text{об}} P_{\text{вид}_{\text{об}}},$$

где $\sigma_{\text{об}}$ – максимальная ЭПР объекта в отсутствие затенения; $\sigma_{\text{об}_{\text{эф}}}$ – эффективная (средняя) ЭПР объекта с учетом затенения.

Для моментов, когда объект считался невидимым, использовался усредненный подход, согласно которому ЭПР полагалась пропорциональной текущей вероятности видимости, что позволяло получить непрерывную оценку отражающих свойств объекта с учетом флуктуаций затенения. В результате моделирования был сформирован временной ряд ЭПР движущегося объекта, который в дальнейшем используется для расчета отношения сигнал/помеха и итоговой вероятности обнаружения в условиях реального морского волнения. Результаты моделирования объекта представлены в табл. 4 и проиллюстрированы на рис. 2.

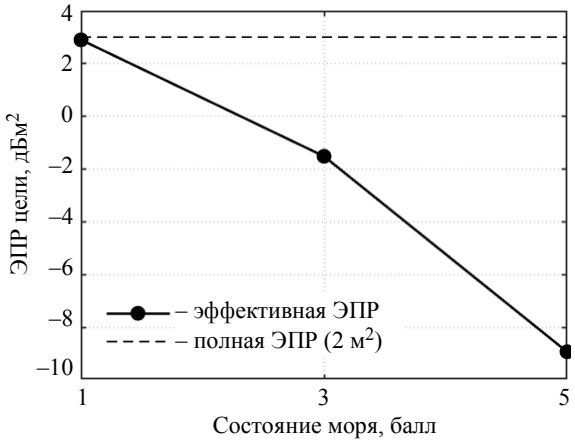


Рис. 2. Эффективная ЭПР цели
Fig. 2. Effective target EPR

Для каждого момента времени в пределах смоделированной траектории использовались полученные ранее данные: текущая дальность до объекта, угол скольжения, а также эффективная ЭПР объекта, сформированная с учетом затенения. На основе этих параметров определялась площадь элемента разрешения радиолокационной станции $A_{\text{res}} = \text{cross}_{\text{ran}} \times \text{along}_{\text{ran}}$, здесь $\text{cross}_{\text{ran}} = r \times \theta_b$ – размер по азимуту; $\text{along}_{\text{ran}} = \min\left(\frac{\Delta R}{\sin\theta}, 1000\right)$, где θ_b – ширина луча РЛС по азимуту, рад; ΔR – разрешение по дальности, м, определяющее минимальное расстояние между двумя целями, при котором они еще различаются, – размер по дальности с физическим ограничением. Азимутальный размер элемента разрешения вычислялся как произведение дальности на ширину диаграммы направленности, составлявшую 1° в радианной мере. Размер элемента разрешения по дальности определялся отношением линейного разрешения РЛС по дальности (15 м) к синусу угла скольжения, что при малых углах скольжения приводит к существенному увеличению площади элемента разрешения и, соответственно, росту помехового сигнала от подстилающей поверхности.

Эффективная площадь рассеяния помехи, создаваемой взволнованным морем, рассчитывалась

Табл. 4. Результаты моделирования объекта
Tab. 4. Target modeling results

Баллы	Угол скольжения (средний), γ, …°	Вероятность видимости, %	ЭПР, м^2	Деградация ЭПР, %
1	0.57	84.2	1.95 (2.9 дБм^2)	–2.5
3	0.57	14.9	0.58 (–1.5 дБм^2)	–71.0
5	0.57	4.0	0.14 (–8.9 дБм^2)	–93.0

как произведение площади элемента разрешения на медианное значение удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности, полученное на этапе трехмерного моделирования отражающих характеристик. Расчет отношения сигнал/помеха:

$$\mathrm{SCR}_{\text{лин}} = \frac{\sigma_{\text{об}_{\text{эф}}}}{\sigma^0_{\text{моря}} \times A_{\text{res}}},\ \mathrm{SCR}_{\text{дБ}} = 10\lg\left(\mathrm{SCR}_{\text{лин}}\right),$$

где $\sigma^0_{\text{моря}}$ – медианное значение после фильтрации выбросов (-60 дБ $< \sigma^0 < 0$ дБ).

В результате для каждого из трех рассматриваемых состояний моря формировался временной ряд изменения отношения сигнал/помеха вдоль траектории движения объекта, а также рассчитывались его статистические характеристики – среднее значение, медиана и показатели разброса. Результаты расчета представлены в табл. 5 и на рис. 3.

На основе полученных значений отношения сигнал/помеха проводилась оценка эффективности обнаружения объекта при заданной вероятности ложной тревоги. В рамках данной статьи использовалась упрощенная модель однократного некогерентного обнаружения без накопления сигнала, что позволяет оценить потенциальные возможности РЛС в каждом отдельном импульсном отсчете. Вероятность правильного обнаружения для каждого момента времени вычислялась по формуле, связывающей вероятность ложной тревоги и отношение сигнал/помеха в линейном масштабе. При фиксированной вероятности ложной тревоги, принятой 10^{-3}, увеличение отношения сигнал/помеха закономерно приводит к росту вероятности обнаружения, стремящейся к единице при больших значениях превышения сигнала над помехой. Для некогерентного детектора при рэлеевских помехах вероятность правильного обнаружения цели

$$P_d = P^{\frac{1}{1+\mathrm{SCR}_{\text{лин}}}}(fa).$$

Посредством усреднения мгновенных значений вероятности обнаружения вдоль всей траектории движения объекта для каждой балльности волнения определялась средняя вероятность обнаружения (рис. 4), характеризующая эффективность работы РЛС в конкретных гидрометеорологических условиях. Результаты оценки вероятности обнаружения и классификация эффективности обнаружения представлены в табл. 6 и 7 соответственно.

Табл. 5. Результаты расчета ОСП
Tab. 5. The results of the SCR calculation

Баллы	ОСП (среднее), дБ	ОСП (медиана), дБ	Диапазон ОСП, дБ	Доля времени, в течение которого отношение сигнал/помеха превышает 0 дБ (ОСП > 0 дБ), *P*, %
1	8.1	8.2	[6.9, 8.9]	100
3	–9.3	–10.1	[–12.0, –2.3]	0
5	–22.9	–23.4	[–24.4, –8.7]	0

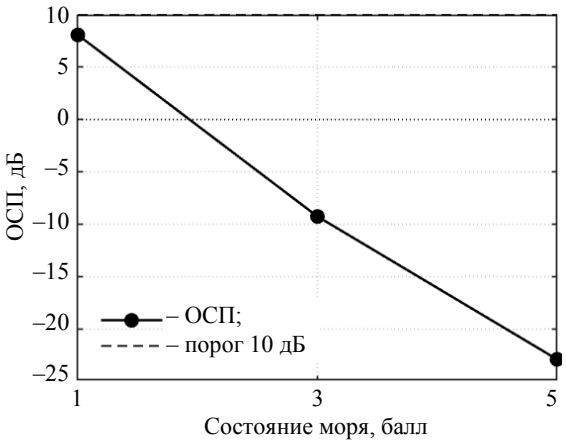


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/помеха от состояния моря в баллах по шкале Дугласа
Fig. 3. Dependence of the SCR from the state of the sea in points, on the Douglas scale

Табл. 6. Результаты оценки вероятности обнаружения
Tab. 6. Results of the assessment of the probability of detection

Волнение, балл	ОСП (среднее), дБ	Средняя вероятность правильного обнаружения цели, P_d, %	*P*, % (ОСП > 10 дБ)	*P*, % (ОСП > 3 дБ)
1	8.1	39.5	0	12.3
3	–9.3	0.4	0	0
5	–22.9	0.1	0	0

Табл. 7. Классификация эффективности обнаружения
Tab. 7. Classification of detection efficiency

Диапазон ОСП, дБ	Оценка эффективности обнаружения	Физическая интерпретация
ОСП > 10	Отличное	Сигнал значительно превышает помеху
3 < ОСП ≤ 10	Хорошее	Сигнал превышает помеху
0 < ОСП ≤ 3	Удовлетворительное	Сигнал незначительно превышает помеху
–5 < ОСП ≤ 0	Слабое	Сигнал сравним с помехой
ОСП ≤ –5	Практически невозможно	Сигнал маскируется помехой

Табл. 8. Сводная таблица результатов
Tab. 8. Experimental results

Волнение, балл	$h_{1/3}$, м	Видимость поверхности, %	σ^0 моря, дБ	Видимость объекта, %	ЭПР объекта, дБм^2	ОСП, дБ	P_d, %
1	0.15	97.5	–48.4	84.2	2.9	8.1	39.5
3	1.20	54.7	–37.2	14.9	–1.5	–9.3	0.4
5	3.25	32.2	–30.9	4.0	–8.9	–22.9	0.1

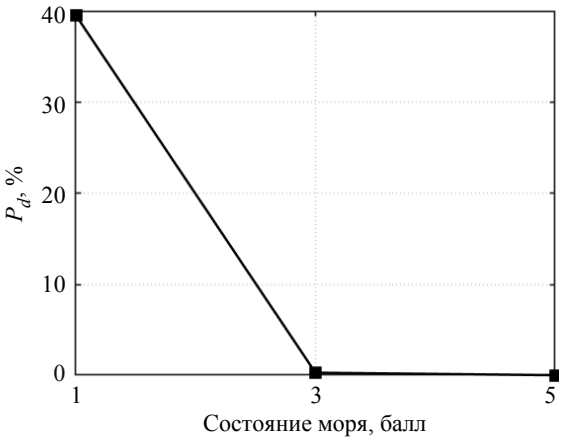


Рис. 4. Вероятность обнаружения цели в зависимости от состояния моря
Fig. 4. The probability of detecting a target depends on the state of the sea

В итоговых результатах, представленных в табл. 8, прослеживаются следующие зависимости:

– увеличение σ^0 на 17.5 дБ при переходе от 1 к 5 баллам, что соответствует росту спектральной плотности мелких волн;

– экспоненциальное уменьшение эффективной ЭПР объекта при увеличении значения состояния моря;

– падение отношения сигнал/помеха на 31 дБ при переходе от 1 к 5 баллам состояния моря.

Важно подчеркнуть, что представленные результаты получены в предположении однократного зондирования для каждого положения объекта, тогда как реальные радиолокационные станции используют многократное сканирование и процедуры накопления сигнала, что существенно улучшает обнаружительные характеристики. Тем не менее, выполненное моделирование позволяет оценить, какую долю времени объект остается доступным для обнаружения при однократном обзоре, и выявить критические уровни волнения, при которых традиционные методы обработки сигналов перестают обеспечивать требуемую эффективность.

В результатах, представленных в табл. 8, прослеживаются следующие зависимости: увеличение σ^0 на 17.5 дБ при переходе от 1 к 5 баллам, что соответствует росту спектральной плотности мелких волн; экспоненциальное уменьшение ЭПР объекта при увеличении значения состояния моря; падение отношения сигнал/помеха на 31 дБ при переходе от 1 к 5 баллам состояния моря.

Выводы. Проведенное исследование было направлено на решение задачи обнаружения малозаметных объектов на фоне морской поверхности. Разработанная математическая модель, учитывающая эффект рельефного затенения объектов волнами, позволила получить количественные оценки, имеющие прикладное значение.

Результаты моделирования демонстрируют высокую чувствительность эффективности обнаружения к балльности волнения. Показано, что увеличение волнения с 1 до 5 баллов вносит дополнительные потери в трактовое отношение сигнал/помеха, достигающие 43.8 дБ. Как следствие, даже для достаточно контрастного объекта (ЭПР = 2 м^2) на ближней границе зоны обнаружения (1 км) вероятность ее сопровождения падает с почти детерминированной (99.6 %) до уровня случайной (0.4 %).

Таким образом, ключевой вывод исследования заключается в подтверждении факта, что при

волнении 4–5 баллов малоразмерный объект практически полностью маскируется волнами, делая его обнаружение традиционными методами невозможным. Это ставит следующее требование к современным радиолокационным станциям морского базирования: для сохранения работоспособности в условиях сильного волнения (выше 3 баллов) необходимо применение специальных методов обработки, например адаптивных алгоритмов или методов поляризационной селекции.

Список литературы

1. Кутузов В. М., Михайлов В. Н. Методика расчета ЭПР отражений от морской поверхности при оценке зоны видимости морской РЛС // Intern. Conf. «Системы радиолокационного мониторинга/Radar Monitoring Systems – 2017 (RMS'2017)». Ханой, Вьетнам, 2017. С. 23–32.

2. Wu J. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane // J. of Geophys. Res.: Oceans. 1982. Vol. 87, no. C12. P. 9704–9706. doi: 10.1029/JC087iC12p09704.

3. Valenzuela G. R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves – A review // Boundary-Layer Meteorol. 1978. Vol. 13. P. 61–85. doi: 10.1007/BF00913863.

4. Fung A. K., Lee K. K. A semi-empirical sea-spectrum model for scattering coefficient estimation // IEEE J. Ocean. Eng. 1982. Vol. 7, no. 4. P. 166–176. doi: 10.1109/JOE.1982.1145535.

5. An improved two-scale model with volume scattering for the dynamic ocean surface / Z.-S. Wu, P. Zhang, L.-X. Guo, P. Zhou // Progress in Electromagnetics Research (PIER). 2009. Vol. 89. P. 39–56. doi: 10.2528/PIER08111803.

6. Huang X.-Z., Jin Y.-Q. Scattering and emission from two-scale randomly rough sea surface with foam scatterers // IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. 1995. Vol. 142, no. 2. P. 109–114. doi: 10.1049/ip-map:19951765.

7. Абузяров З. К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 166 с.

8. Massel S. R. Ocean surface wave: their physics and prediction. Singapore: World Sci. Publ., 1996. 464 с.

9. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов: методы и оценки. Л.: Судостроение, 1982. 287 с.

10. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves / T. Elfouhaily, B. Chapron, K. Katsaros, D. Vandemark // J. of Geophys. Res.: Oceans. 1997. Vol. 102, no. C7. P. 15781–15796. doi: 10.1029/97JC00467.

11. Флуктуационный анализ моделей морской поверхности / В. Н. Михайлов, Н. С. Пыко, М. И. Богачев, В. М. Кутузов // Вестн. НовГУ. 2023. № 1(130). С. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145.

12. Михайлов В. Н. Учет затенения при моделировании эффективной поверхности рассеяния морской поверхности // Вестн. НовГУ. 2023. № 3(132). С. 405–418. doi: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).405-418.

13. Головинский П. А., Проскурин Д. К. Рассеяние волн анизотропной двухмасштабной шероховатой поверхностью // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 112–120. doi: 10.18721/JPM.11411.

Информация об авторе

Иванов Александр Андреевич – аспирант кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». E-mail: aaivanov1@stud.etu.ru

References

1. Kutuzov V. M., Mihajlov V. N. Metodika rascheta JePR otrazhenij ot morskoj poverhnosti pri ocenke zony vidimosti morskoj RLS // Intern. Conf. «Sistemy radiolokacionnogo monitoringa/Radar Monitoring Systems – 2017 (RMS'2017)». Hanoj, V'etnam, 2017. S. 23–32. (In Russ.).

2. Wu J. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane // J. of Geophys. Res.: Oceans. 1982. Vol. 87, no. C12. P. 9704–9706. doi: 10.1029/JC087iC12p09704.

3. Valenzuela G. R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves – A review // Boundary-Layer Meteorol. 1978. Vol. 13. P. 61–85. doi: 10.1007/BF00913863.

4. Fung A. K., Lee K. K. A semi-empirical sea-spectrum model for scattering coefficient estimation // IEEE J. Ocean. Eng. 1982. Vol. 7, no. 4. P. 166–176. doi: 10.1109/JOE.1982.1145535.

5. An improved two-scale model with volume scattering for the dynamic ocean surface / Z.-S. Wu, P. Zhang, L.-X. Guo, P. Zhou // Progress in Electromagnetics Research (PIER). 2009. Vol. 89. P. 39–56. doi: 10.2528/PIER08111803.

6. Huang X.-Z., Jin Y.-Q. Scattering and emission from two-scale randomly rough sea surface with foam scatterers // IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. 1995. Vol. 142, no. 2. P. 109–114. doi: 10.1049/ip-map:19951765.

7. Abuzjarov Z. K. Morskoe volnenie i ego prognozirovanie. L.: Gidrometeoizdat, 1981. 166 s. (In Russ.).

8. Massel S. R. Ocean surface wave: their physics and prediction. Singapore: World Sci. Publ., 1996. 464 s.

9. Borodaj I. K., Necvetaev Ju. A. Morehodnost' sudov: metody i ocenki. L.: Sudostroenie, 1982. 287 s. (In Russ.).

10. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves / T. Elfouhaily, B. Chapron, K. Katsaros, D. Vandemark // J. of Geophys. Res.: Oceans. 1997. Vol. 102, no. C7. P. 15781–15796. doi: 10.1029/97JC00467.

11. Fluktuacionnyj analiz modelej morskoj poverhnosti / V. N. Mihajlov, N. S. Pyko, M. I. Bogachev, V. M. Kutuzov // Vestn. NovGU. 2023. № 1(130). S. 129–145. doi: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145. (In Russ.).

12. Mihajlov V. N. Uchet zatenenija pri modelirovanii jeffektivnoj poverhnosti rassejanija morskoj poverhnosti // Vestn. NovGU. 2023. № 3(132). S. 405–418. doi: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).405-418. (In Russ.).

13. Golovinskij P. A., Proskurin D. K. Rassejanie voln anizotropnoj dvuhmasshtabnoj sherohovatoj poverhnost'ju // Nauch.-tehn. vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2018. T. 11. № 4. S. 112–120. doi: 10.18721/JPM.11411. (In Russ.).

Information about the author

Aleksandr A. Ivanov – postgraduate student, Department of Radio Engineering Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: aaivanov1@stud.etu.ru

Статья поступила в редакцию 06.04.2026; принята к публикации после рецензирования 27.06.2026; опубликована онлайн 23.10.2026.

Submitted 06.04.2026; accepted 27.06.2026; published online 23.10.2026.