

Моделирование сигналов отраженных от взволнованной морской поверхности

05, май 2017

Пирогов А. А.^{1,*}, Жураковский В. Н.¹

УДК: 621.3.09

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

^{*}sm2-2@inbox.ru

Введение

Переотражения радиосигнала от взволнованной морской поверхности создают существенные помехи для работ радиолокационных станций (РЛС) различного назначения. Именно поэтому необходимо наличие адекватной модели сигналов, описывающих распространение радиосигнала над морской поверхностью, находящейся в различных погодных условиях.

Проблема отражения радиосигналов от морской поверхности начала рассматривается учеными довольно давно. Уже в 50-х годах прошлого столетия проводятся натурные эксперименты по измерению параметров морского волнения [2]. В работе [1] морское волнение описывается как комплексная структура, формируемая различными факторами. В настоящее время достаточно много исследований на тему построения достоверных моделей сигналов, отраженных от морской поверхности, как старых [6, 7], так и новых [3, 7, 8, 10], однако, остается много нерешенных вопросов и, в работах [5, 8] проводится сравнение различных моделей и показано, что каждая модель имеет свою область применения и имеет участки сильного расхождения с экспериментальными данными.

В данной работе рассмотрены особенности морского волнения, основные подходы к моделированию морской поверхности и сигналов, отраженных от нее. Построена имитационная модель для отражения радиосигнала в зависимости от скорости ветра.

1. Проблема низколетящей цели

Проблема отслеживания низколетящей цели в радиолокации является очень важной. Суть проблемы заключается в том, чтобы точно определить высоту указанной цели в трудных условиях многолучевого распространения сигнала, как показано на рис. 1.

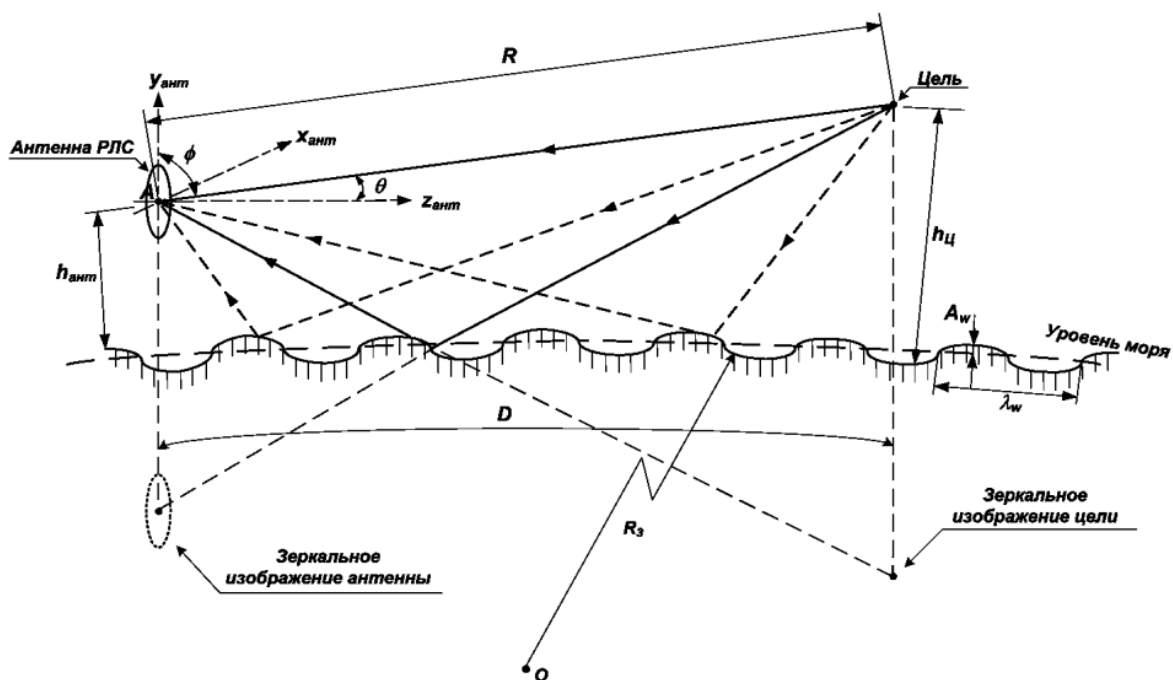


Рис. 1. Условия многолучевого распространения сигнала для низколетящих целей

Как можно видеть, прямой луч вместе с нежелательными побочными лучами, отражающимися от водной поверхности, исходят из цели и возвращаются к приемной антенне. Побочные лучи могут состоять из двух компонентов: из одного зеркального отражения, как показано на рисунке, и из диффузного отражения, распределенного в некотором диапазоне углов. Как правило, две эти компоненты не существуют одновременно. При волнении на море доминируют диффузные отражения, в то время как гладкая морская поверхность дает зеркальные отражения. Зеркальная компонента обычно дает больше затруднений, т.к. она более мощная, чем диффузные отражения и сильно коррелирует с прямым отраженным сигналом. Кроме того, зеркальное отражение чаще всего лежит в пределах ширины приемного луча антенны и, следовательно, смешивается с прямым отражением.

Для разработки алгоритмов пеленгации низколетящей цели над морской поверхностью необходимо разработать модель входных сигналов.

К сожалению, данная тема не очень широко освещается в настоящее время именно с точки зрения моделирования, что, однако, не отменяет наличие некоторых нерешенных проблем в данной области.

2. Волнение на морской поверхности

Измерения радиолокационных отражений от морской поверхности проводились многими экспериментаторами на различных частотах и при самых разных условиях. Однако даже при предположительно идентичных условиях они не всегда хорошо согласовались друг с другом. Большие расхождения в полученных данных частично объясняются трудностями измерения или описания окружающих условий и состояния моря. На отражения сигнала от морской поверхности моря влияют скорость и направления ветра у поверхно-

сти воды, его продолжительность, протяженность области разгона, океанские течения, наличие загрязнений, воздействие отдаленных штормов, от которых возмущение моря передается на дальние расстояния, а также местные погодные условия. Все эти показатели трудно измерить при проведении эксперимента в натурных условиях. Кроме того, существуют трудности калибровки для абсолютных измерений эффективной площади рассеяния сигнала, отраженного от морской поверхности, так как такой сигнал редко измеряется в условиях, сходных с лабораторными. Все эти, а также, возможно, еще неизвестные, факторы обуславливают некоторую неопределенность натурных данных, которую необходимо учитывать, как при разработке радиоаппаратуры, так и при разработке моделей морской поверхности.

В работе [1] дана следующая классификация видов неровностей на поверхности моря:

- 1) Ветровая волна – волна, возникающая в результате взаимодействия ветра с поверхностью воды. Во время непосредственного взаимодействия ветра и воды, шероховатости называют волнами, после прекращения ветра – зыбью.
- 2) Гравитационная волна – волна, скорость распространения которой определяется главным образом силой тяжести. Волны на воде длиной более 5 см считаются гравитационными волнами.
- 3) Капиллярная волна (называемая так же рябью) – волна, скорость распространения которой определяется главным образом поверхностным натяжением. Волны, длиной менее 2,5 см считаются капиллярными волнами.
- 4) Брызги и пузыри на гребнях волн – образуются на гребнях ветровых волн под воздействием ветра, или при разрушении волны.

Обычно на исследуемом участке морской поверхности присутствуют сразу все эти возмущения.

Несмотря на наличие данных о зависимостях высот волн от ветра, для полного развития волнения требуется конечное время. Термин «полностью развитое волнение» описывает состояние, когда океанские волны достигли своей максимальной высоты для ветра данной силы. Так, ветер со скоростью 5 м/с вызывает полностью развитое волнение если дует на области разгона не менее 10 мор. миль в течение 2,4 часов [2]. Ветер со скоростью 15 м/с дующий над областью разгона протяженностью 280 мор. миль дает полностью развитое волнение при продолжительности воздействия 23 часа.

Всё вышеперечисленное делает задачу однозначного описания морской поверхности и сигналов, отраженных от нее, трудноразрешимой комплексной задачей.

3. Зеркальное отражение принимаемого от низколетящей цели сигнала

Простейшей моделью распространения сигналов от низколетящей цели является модель зеркального отражения от плоской земли. В этой модели подстилающая поверхность считается идеально плоской и гладкой. Геометрия зеркального отражения представлена на рис. 2.

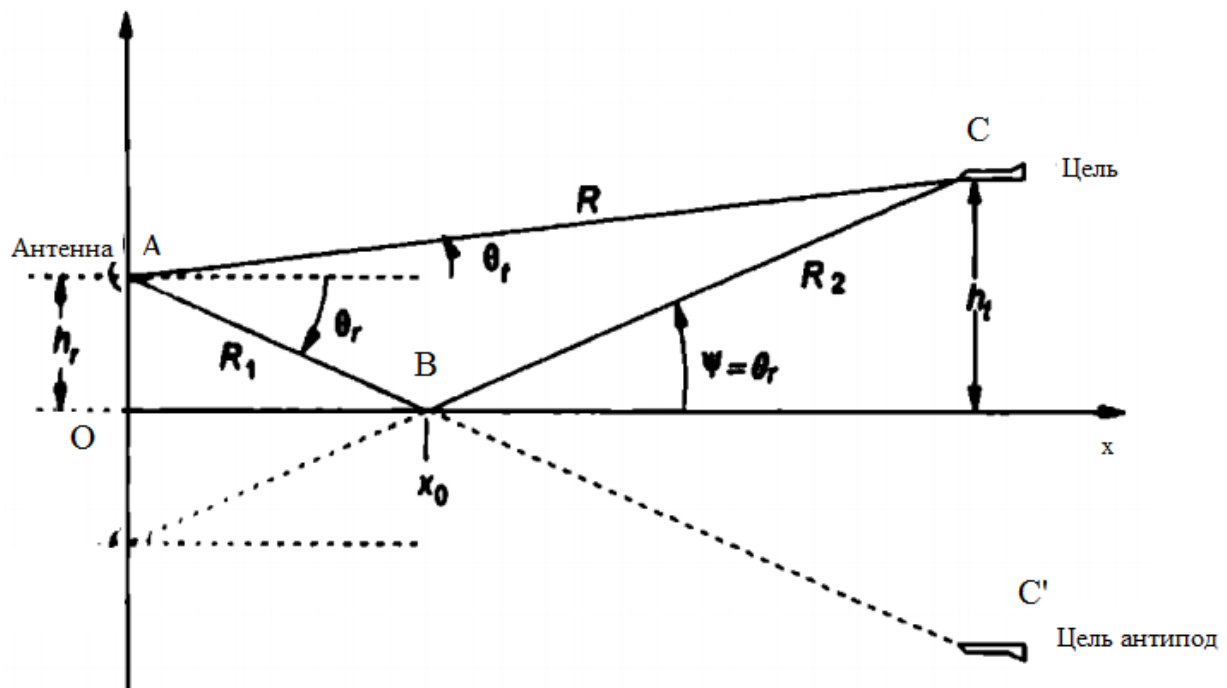


Рис. 2. Модель зеркального отражения от плоской земли

В такой модели сигнал на антенной решетке будет являться суммой прямого отраженного сигнала (AC) и зеркально отраженного (ABC). Расчет для отраженного сигнала можно заменить произведением коэффициента отражения подстилающей поверхности и сигнала, пришедшим с цели-антипода (AC'), который является зеркальным отражением цели относительно оси x .

Таким образом, мощность сигнала, принятого в точке A :

$$A = A_{AC} + A_{AC'},$$

где A_{AC} – сигнал, пришедший с направления AC , $A_{AC'}$ – сигнал, пришедший с направления AC' .

$$A_{AC} = Ae^{j\omega t}$$

$$A_{AC'} = p_s Ae^{j(\omega t + \phi_s)},$$

где p_s – зеркальный коэффициент отражения водной поверхности; ϕ_s – разность фаз между прямым и переотраженным сигналом.

Углы отражения и расстояние до цели находятся из заданных в модели параметров.

$$R = \sqrt{x_{\text{ц}}^2 + (h_{\text{ц}} - h_a)^2}$$

$$R' = \sqrt{x_{\text{ц}}^2 + (h_{\text{ц}} + h_a)^2}$$

$$\theta_t = \arcsin\left(\frac{h_{\text{ц}} - h_a}{R}\right)$$

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{h_{\text{ц}} + h_a}{R}\right)$$

Данные формулы справедливы для неподвижного положения антенны и цели. В случае движения цели необходимо учитывать разницу хода сигнала. В таком случае траектория цели-антипода будет зеркально повторять траекторию цели, а сигнал, пришедший от него, будет запаздывать на величину Δt :

$$\Delta t = \frac{\Delta R}{c},$$

где c – скорость света; ΔR – разность хода; $\Delta R = R' - R$

4. Модели на основе различных распределительных законов

Одним из самых распространенных в современной литературе способов моделирования сигналов, отраженных от морской поверхности является моделирование, с применением распределительных законов по отношению к удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) морской поверхности. Различные распределительные законы рассматриваются во многих статьях, таких как [3, 4]. При таком подходе диффузное отражение от морской поверхности считается как отражение от отдельных небольших участков морской поверхности, каждый из которых имеет свое собственное УЭПР со случайной величиной, распределенной по какому-либо закону. В работе [5] представлено сравнение моделей отражения сигналов на основе 4х распределений:

- модель с нормальным распределением: $\sigma^0(x) = k_1$;
- модель Ламберта: $\sigma^0(x) = k_2 \sin \psi_1 \sin \psi_2$;
- модель Бэкмана: $\sigma^0(x) = \frac{k_3}{\beta_0^2}$
- модель Бэкмана – Бартона: $\sigma^0(x) = \frac{k_4}{\beta_0^2} F_d^2(x)$.

где $k_i, i=1..4$, - отражательная способность участка поверхности; ψ_1, ψ_2 - углы падения и отражения сигнала.

Геометрия диффузного отражения сигнала представлена на рис. 3.

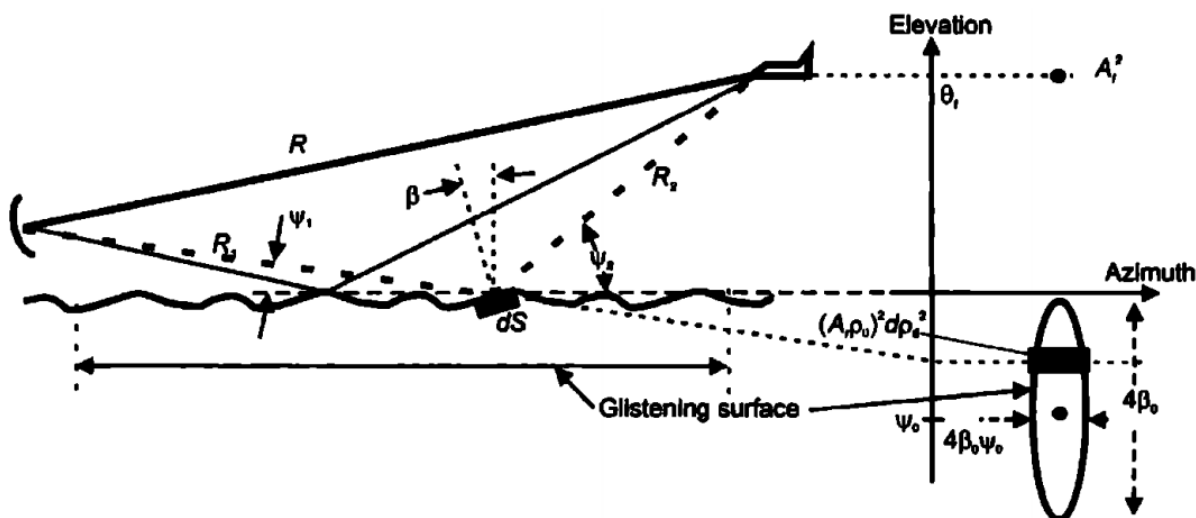


Рис. 3. Диффузное отражение сигнала

Модель 1, очевидно, упрощение, однако в условиях недостатка данных она может быть оправдана.

Модель 2 основана на предположении, что УЭПР должна быть пропорциональна произведению областей, проецируемых направлением «взгляда» от мишени и от радара.

Модели 3 и 4 основаны на концепции Бекмана о том, что диффузное отражение возникает на небольших плоских зеркальных поверхностях (фацетах), наклоненных под различными углами между нулем и β_0 . Идеальное отражение соответствует k_3, k_4 равным 1, так что это максимальное значение этих констант. Таким образом, мы получаем эффективную «блестящую поверхность», определяемую константой β_0 и геометрическими параметрами:

$$y = \frac{x(R-x)}{R} \left(\frac{h_r}{x} + \frac{h_t}{R-x} \right) \sqrt{\frac{\beta_0^2 - \left(\frac{h_r}{x} - \frac{h_t}{R-x} \right)^2}{4}}.$$

Модель 3 имеет наиболее простую формулировку, при которой угол наклона фацетов имеет равномерную функцию плотности вероятности между 0 и β_0 .

Модель 4 такая же, как модель 3 за исключением модификации, предложенной Бартоном, который домножает распределение Бекмана на коэффициент шероховатости:

$$F_d^2 = \sqrt{(1-p_{s1}^2)(1-p_{s2}^2)},$$

где p_{s1}, p_{s2} - коэффициент зеркального отражения для углов падения и отражения;

Область поверхности, переизлучающей на антенну диффузную компоненту определили Бекман и Спизичино как эллиптический контур, вытянутый вдоль трассы между антенной и целью. Модель, разработанная в [6] утверждает, что каждый элемент площади dS излучает диффузную мощность $(Ap_0)^2 dP_d^2$, где dP_d^2 - квадрат удельного коэффициента диффузного отражения, определяется по формуле:

$$dP_d^2 = \frac{1}{4\pi\beta_0^2} \left(\frac{R}{R_1 R_2} \right)^2 \exp\left(-\frac{\beta^2}{\beta_0^2}\right) F_d^2 Z dS,$$

где β_0 - среднеквадратичный наклон поверхности, $\beta = (\psi_2 - \psi_1) / 2$ - наклон фацетов участка поверхности, которые обеспечивают локальное зеркальное отражение, F_d - коэффициент неровности поверхности, Z - коэффициент коррекции малого угла падения:

$$\begin{cases} Z = \frac{8\sqrt{1-p_{s2}^2}}{4+3a-b+1/a}, b < a+1 \\ = 12(a^2+5a+12+9/a), b \geq a+1 \end{cases},$$

где a - меньшее из $\psi_1 / 2\beta_0$ и $\psi_2 / 2\beta_0$,

$$b = \frac{\lambda}{8\pi\sigma_h'\beta_0}.$$

Среднеквадратичное отклонение высоты σ_h' - скорректированное значение с учетом затенений из-за малого угла скольжений:

$$\sigma_h' = \sigma_h \sqrt[5]{4a}.$$

Модель 4, в соответствии с [5], является более точной и учитывает больше явлений, чем предыдущие.

Уровень волнения на море в соответствии с [7] является основой для вычисления характеристик морской поверхности:

$$\sigma_h \approx (0.158SS)^2 + (0.11SS)^6 + (0.13SS)^{12}.$$

$$\beta_0 \approx 0.055 + 0.0077SS$$

Существенным недостатком такой модели является то, что не учитывается направление ветра.

В статье [8] представлено сравнение нескольких распределительных моделей с использованием данных, полученных с вебсайта, поддерживаемого профессором Наукиным. Измерения выполнены IPIX радаром на восточном побережье Канады с вершины скалы возле Дармута, Новая Шотландия. Частота дискретизации радара 9.39 МГц (и длина волны около 3 см), с двумя поляризациями: вертикальной и горизонтальной. Угол скольжения варьировался от величины, меньше 1° до нескольких градусов. Пример данных представлен на рис. 4.

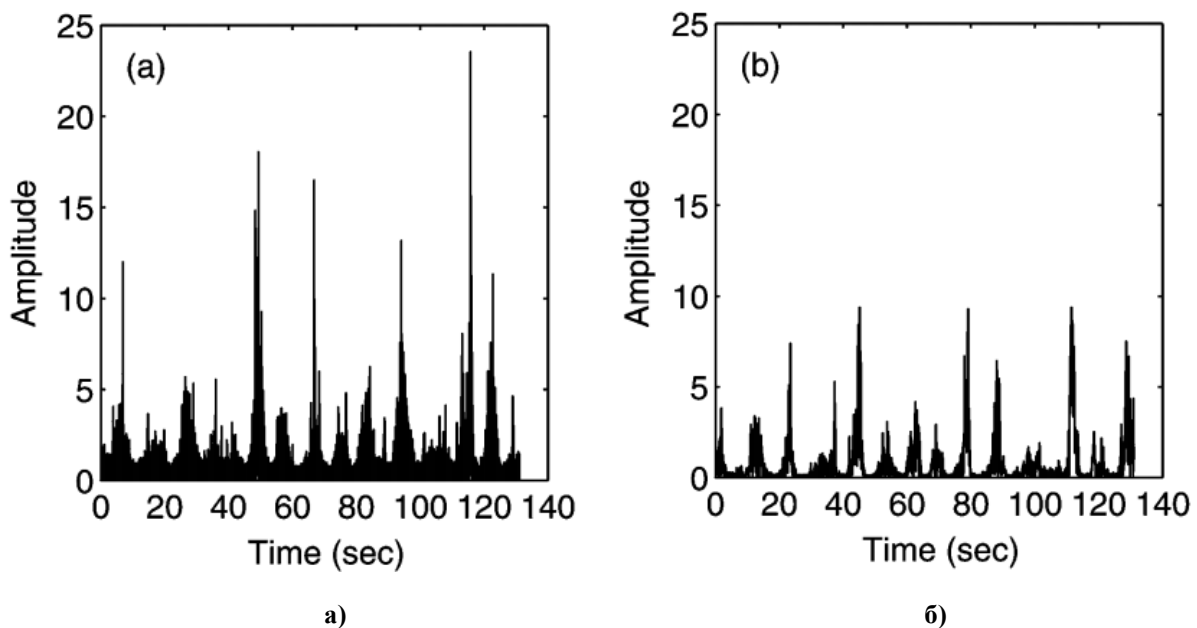


Рис. 4. Пример данных об амплитуде морской помехи:
а) – без цели, б) – с целью

Были рассмотрены четыре распределения:

- 1) Распределение Вейбула;
- 2) Log-normal распределение;
- 3) К – распределение;
- 4) Дополненное гауссово распределение.

В данной статье проводится проверка возможности использовать распределительные законы для моделирования морской поверхности, однако, к сожалению, не приводятся графики результатов. Вот небольшое описание применяемых распределений и метода оценки их работоспособности

- 1) Распределение Вейбула:

Плотность распределения вероятности может быть выражена как функция с двумя параметрами:

$$f(x) = abx^{b-1}e^{-ax^b}, x \geq 0, a > 0, b > 0.$$

- 2) Log-normal распределение:

Плотность распределения вероятности:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0.$$

- 3) К – распределение:

$$f(x) = \frac{\sqrt{2\nu}}{\sqrt{\mu}\Gamma(\nu)2^{\nu-1}} \left(\sqrt{\frac{2\nu}{\mu}}x\right)^{\nu} K_{\nu-1}\left(\sqrt{\frac{2\nu}{\mu}}x\right), x \geq 0.$$

- 4) Дополненное гауссово распределение:

В этом распределении неизвестная x разделяется на две другие случайные переменные $x = \sqrt{\tau}z$. Для морского шума z – это локальный Релеевский компонент, τ – Гама компонент, который модулирует уровень мощности морской зыби, называемой текстурой

Гама плотность распределения вероятности:

$$p_{\tau}(\tau) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^{\nu} \tau^{\nu-1} \exp\left(-\frac{\nu}{\mu}\tau\right), \tau \geq 0.$$

Для оценивания применимости данных распределительных законов использовался тест Колмогорова-Смирнова:

$$D_e = \max_{1 \leq i \leq N} |F(x_i) - F_t(x_i)|,$$

где $F(x_i)$ – эмпирическая кумулятивная плотность распределения, ее значение эквивалентно i/N , где i – число отсчетов, не превышающих x_i , N – общее число отсчетов. Соответствующая кумулятивная плотность рассчитывается для конкретного распределения с параметрами для конкретного набора данных и сравнивается с критическим значе-

нием, зависящим от выбранного уровня значимости и размера выборки. Если рассчитанное значение больше, то гипотеза будет отвергнута и данные не могут правдоподобно рассматриваться как вытекающие из рассматриваемого распределения.

В ходе проверок было выяснено, что параметры некоторых распределений действительно можно использовать для данной цели, однако для каждого распределения существует, как минимум, одно измерение, где оно не работает.

Существенной проблемой представленных выше моделей является то, что в этих работах не учтено влияние направления ветра на переотраженный сигнал.

5. Спектральная структура взволнованного моря

Взволнованную морскую поверхность можно рассматривать как суперпозицию бесконечного числа элементарных волн с различными частотами, амплитудами, направлением распространения и фазами [9]. В таком случае амплитуда волнения вычисляется по формуле:

$$u(x, y, t) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \sqrt{2S(\omega, \psi)} d\omega d\psi \sin(k(x \cos(\psi) + y \sin(\psi)) - \omega t + \varepsilon),$$

где $S(\omega, \theta)$ - двумерный энергетический спектр волнения; ω – частота элементарной волны, рад/с; ψ – угол между направлением распространения элементарной волны и направлением визирования РЛС, рад; k – волновое число, рад/с; ε – случайная фаза, рад.

Волновое число вычисляется по формуле:

$$k = \frac{\omega^2}{g},$$

где g – ускорение свободного падения.

Двумерный энергетический спектр представляется произведением:

$$S(\omega, \theta) = s(\omega)F(\psi),$$

где $s(\omega)$ – частотный спектр; $F(\psi)$ – угловой спектр.

Существует много аппроксимирующих представлений для углового и частотного спектра. Выбор той или иной функции спектра или функции углового распределения спектральной энергии зависит от решения конкретной задачи, т. е. от того, для каких целей производится расчет параметров волн. В работе [10] для расчета параметров ветрового волнения используется частотный спектр Пирсона – Московича и угловой спектр Дарбишайра.

Спектр Пирсона – Московича имеет вид:

$$s(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left(-\beta \left(\frac{\omega_{\text{макс}}}{\omega} \right)^4 \right),$$

где $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 0,74$ - параметры аппроксимации; $\omega_{\max}$ - частота составляющей спектра максимальной амплитудой, которая рассчитывается при известной скорости ветра V по формуле:

$$\omega_{\max} = \frac{g}{V}.$$

Угловой спектр Дарбишайра рассчитывается по формуле:

$$F(\psi) = \frac{2,96}{\pi\sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\psi - \psi_0)^2}{0,114\pi^2}\right),$$

где ψ_0 - угол между направлением ветра и направлением зондирования.

Используя такую модель морской поверхности можно для расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) воспользоваться уже рассмотренной моделью Бекмана – Бартона или же другой ЭПР моделью.

Ниже приведены некоторые результаты моделирования. На рис. 5 представлены энергетические спектры морского волнения при скоростях ветра 2 и 7 м/с, угол между направлением зондирования и направлением ветра равен 45° .

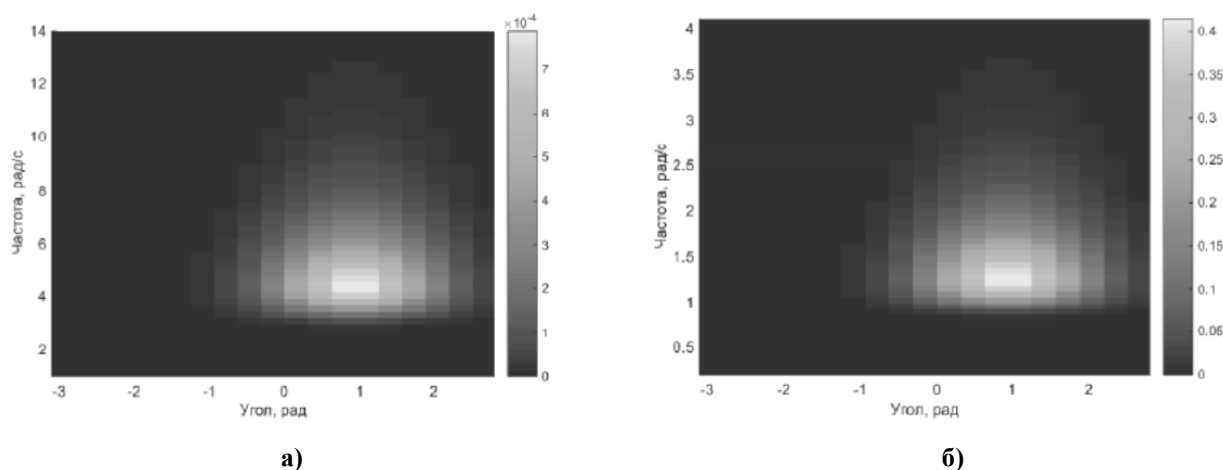


Рис. 5. Энергетический спектр морского волнения: а) – при скорости 2 м/с; б) – при скорости ветра 7 м/с

6. Модель сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности

Рассмотренная далее модель является комбинацией методов, рассмотренных в предыдущих разделах.

В основе построенной в данной работе модели лежит предположение, что размеры неровностей у одной и той же поверхности могут иметь широкий диапазон значений, поэтому реальные поверхности обычно дают смешанное отражение, в котором есть и диффузная и зеркальная компоненты (рис. 6).



Рис. 6. Смешанное отражение сигнала

Принятый на антенне сигнал, определяется как сумма прямого, зеркального и диффузного отражений от цели и морской поверхности.

В рамках данной работы была разработана модель сигнала от низколетящей цели на входе антенны.

Мощность зеркального отражения сконцентрирована в области точки зеркального отражения, тогда как мощность диффузной помехи распределена по всей отражающей поверхности. Для его вычисления необходимо разбить отражающую поверхность на сетку элементарных участков площади $dx dy$ и производить вычисление отражения от каждого из этих участков, как показано на рис. 7.

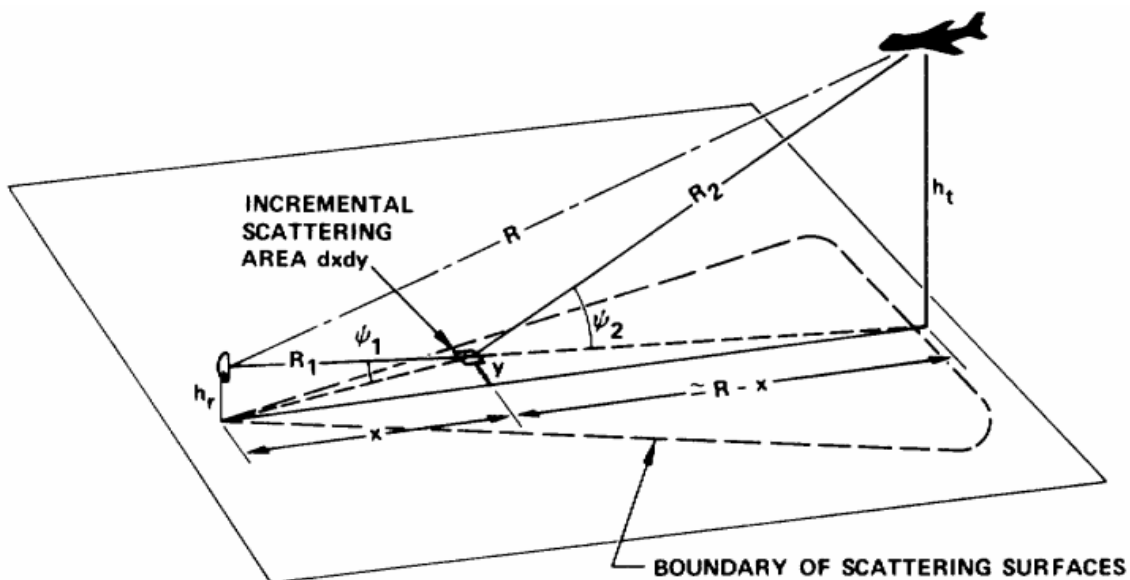


Рис. 7. Геометрия вычисления диффузного отражения

Однако предложенная к рассмотрению модель предполагает вычисление диффузной компоненты от узкой эллиптической области, вытянутой вдоль трассы цель-антенна.

Параметрами модели являются координат цели, координаты антенны, уровень волнения на море. Уровень волнения на море является основой для вычисления характеристик морской поверхности:

$$\sigma_h \approx (0.158SS)^2 + (0.11SS)^6 + (0.13SS)^{12}.$$

$$\beta_0 \approx 0.055 + 0.0077SS$$

Диэлектрическая константа $\varepsilon_r = 60$, проводимость воды $\sigma_e = 15$. Длина волны излучаемого сигнала λ взята равной 10 см. Амплитуда сигнала взята равной условной единице.

При разработке модели сигналов, отраженных о взволнованной морской поверхности, был сделан ряд допущений:

- 1) Диаграмма направленности антенны и диаграмма обратного рассеивания цели сферические с единичной амплитудой;
- 2) Сигнал не затухает в пространстве;
- 3) Волны считаются цилиндрическими с осями перпендикулярными плоскости, образованной целью, антенной и точкой зеркального отражения;
- 4) Волнение морской поверхности считается полностью развитым, а характеристики морской поверхности одинаковыми для всей исследуемой площади.

Полученная модель позволяет посмотреть, как суммарный сигнал, пришедший на антенну, так и отдельно мощность зеркальной и диффузной компоненты.

Зеркальная компонента считалась в окрестностях точки зеркального отражения по формуле:

$$\text{Re } f = p_o p_s s,$$

где $s = A \exp\left(-i \frac{R_1 + R_2}{\lambda}\right)$ сигнал, пришедший в область зеркального отражения.

Диффузная компонента вычислялась как сумма отражений от элементов поверхности вдоль трассы между антенной и целью:

$$\text{Dif} = \sum_L s p_o P_d \Delta S,$$

где L – трасса между целью и антенной. ΔS – элемент площади поверхности.

Результаты для уровня волнений на море $SS = 3$ представлены на рис. 8, 9.

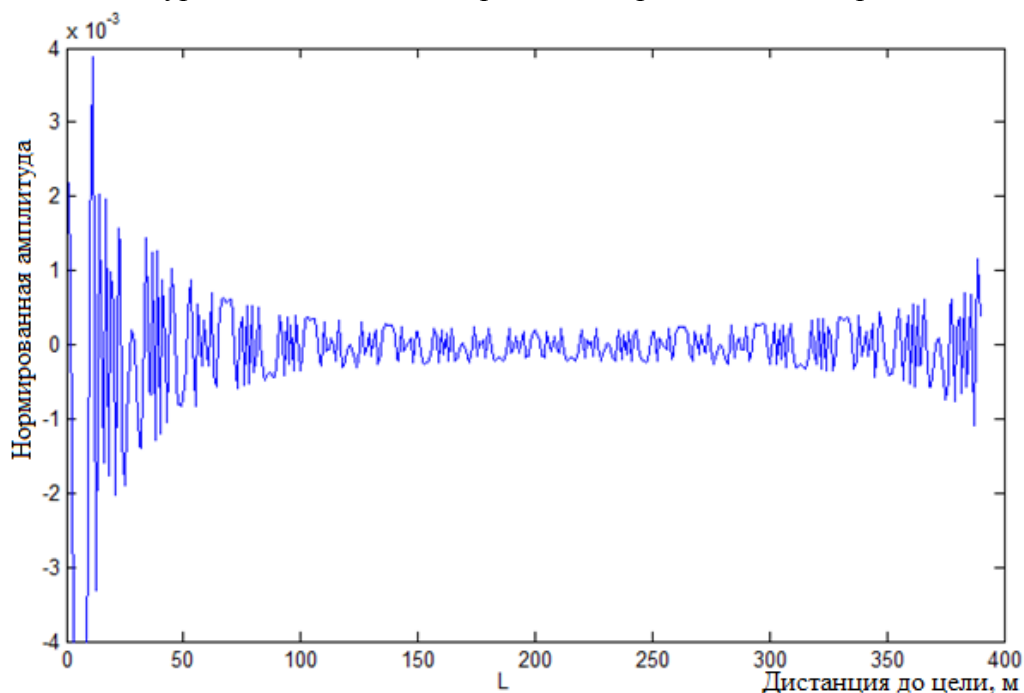


Рис. 8. Диффузно отраженный сигнал, действительная часть

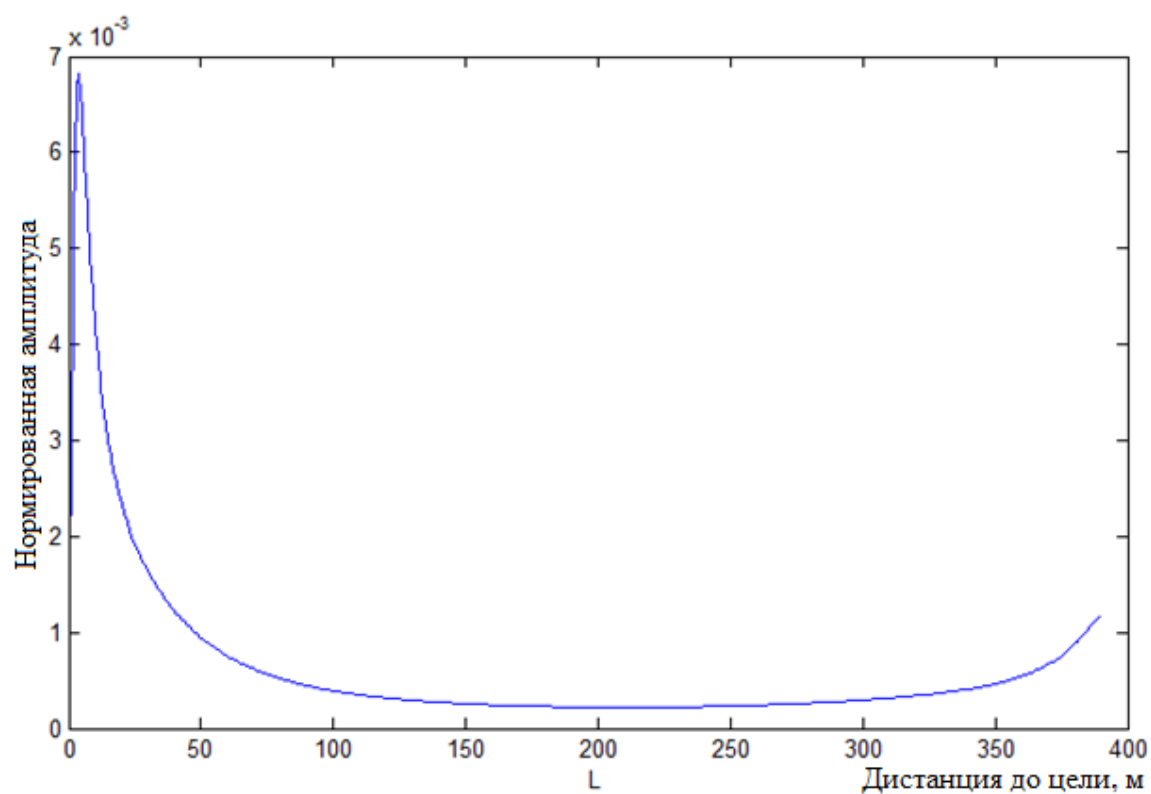


Рис. 9. Модуль диффузного отраженного сигнала

Для уровня волнения моря $SS = 9$ результаты представлены на рис. 10, 11.

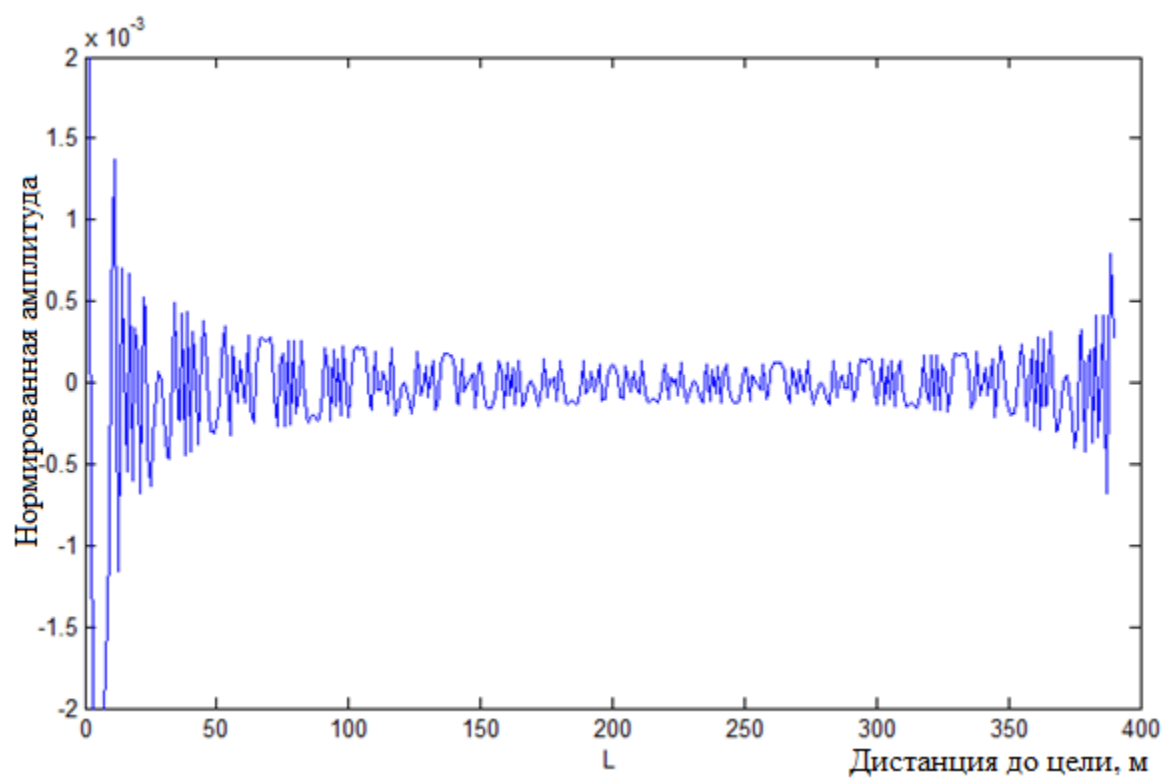


Рис. 10. Диффузно отраженный сигнал, действительная часть

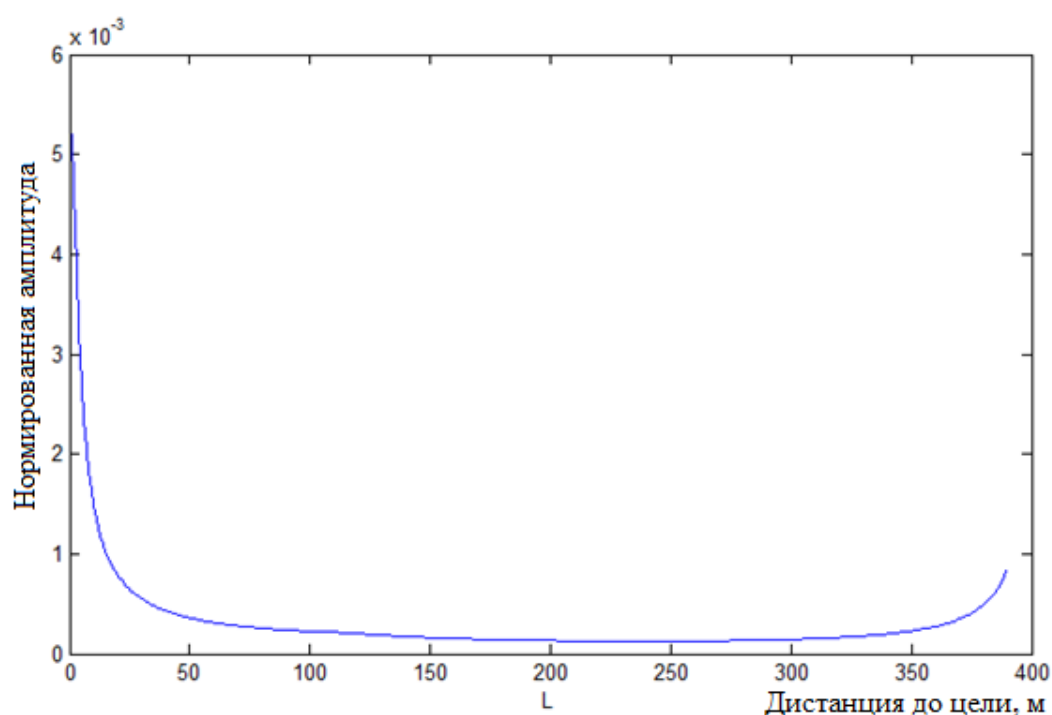


Рис. 11. Модуль диффузного отраженного сигнала

На полученных результатах можно увидеть увеличение мощности отраженного сигнала вблизи цели и антенны.

Рассмотрим зависимость мощностей диффузной и зеркальной компоненты от уровня волнения моря. Соответствующие результаты работы модели представлены на рис. 12, 13.

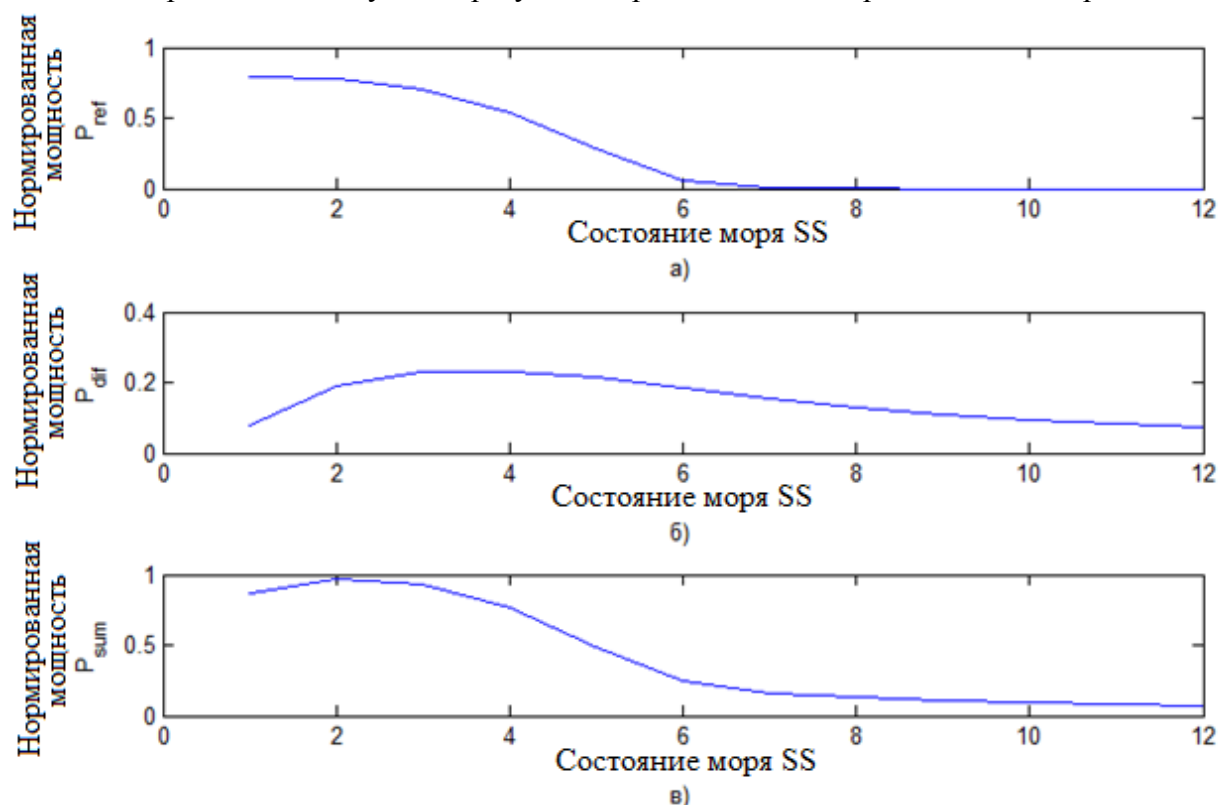


Рис. 12. Мощности отраженного сигнала в зависимости от состояния моря SS: а) – мощность зеркальной компоненты; б) – мощность диффузной компоненты; в) – суммарная мощность отраженного сигнала

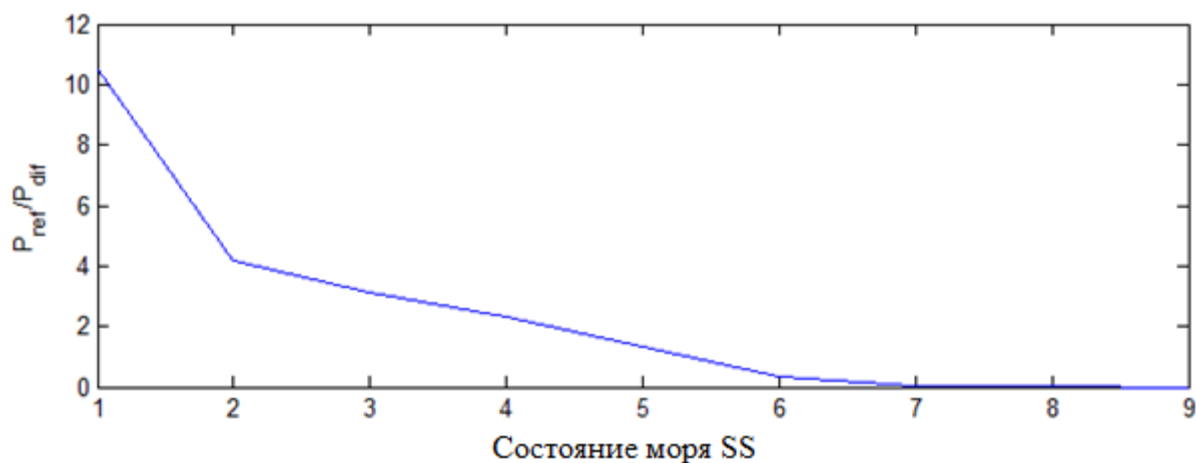


Рис. 13. Соотношение мощностей зеркальной и диффузной компоненты

Как мы можем увидеть, при увеличении волнения уменьшается доля зеркального отражения в принятом отраженном сигнале и увеличивается роль в отражении диффузной компоненты. Суммарная мощность принимаемого антенной сигнала так же уменьшается, так как с увеличением волнения увеличивается часть энергии, рассеиваемой в направлениях отличных от направления на антенну.

Заключение

В данной работе были рассмотрены основные методы моделирования морской поверхности, сигналов, отраженных от нее. Было оценено современное состояние исследований в этой области. На основе рассмотренных материалов была построена математическая модель, позволяющая оценить вклад различных составляющих переотраженного сигнала. Разработанная модель может использоваться для отработки морских радиолокационных станций.

Список литературы

- [1]. Сколник М.И. и др. Справочник по радиолокации: В 4-х т. Т. 1. Основы радиолокации / М.И. Сколник, И. Мерилл, Л. Блэйк, Г. Дилей, Я.С. Ицхоки; пер. с англ. А. Я. Брейтбарта и др. / под общей редакцией К.Н. Трофимова; под ред. Я.С. Ицхоки. М.: Советское радио. 1976. 456 с.
- [2]. Ragazzini J.R., Bergen A.R. A Mathematical Technique for the Analysis of Linear Systems. // Proc. IRE. 1954. Vol. 42. Is. 11. Pp. 1645-1651. DOI: 10.1109/JRPROC.1954.274659
- [3]. Rosenberg L., Crisp D.J., Stacy N.J. Analysis of the KK-distribution with X-band medium grazing angle sea-clutter. // Radar Conference - Surveillance for a Safer World, 12-16 Oct. 2009. RADAR. International. IET Radar, Sonar Navig. IEEE. 2010. Vol. 4. No. 2. Pp. 209–222.
- [4]. Ward K., Tough R., Watts S. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance. 2nd ed. Croydon.: CPI Group Ltd. 2013. 562 p.

- [5]. Mrstick A.V., Smith P.G. Multipath Limitations on Low-Angle Radar Tracking. // IEEE transaction on aerospace and electronic systems. 1978. Vol. aes-14. Is. 1. Pp. 85 – 102. DOI: 10.1109/TAES.1978.308582
- [6]. Beckmann P., Spizzichino A. The scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. London: Pergamon Press. 1963. 503 p.; Norwood, MA: Artech House. 1987. 511 p.
- [7]. David K. Barton. Radar System Analysis and Modeling. Artech House. 2004. 566 p.
- [8]. Jing Hu, Wen-Wen Tung, Jianbo Gao. Detection of Low Observable Targets Within Sea Clutter by Structure Function Based Multifractal Analysis // IEEE transactions on antennas and propagation. 2006. Vol. 54. Is. 1. Pp. 136 – 143. DOI: 10.1109/TAP.2005.861541
- [9]. Абузьяров З.К. Морское волнение и его прогнозирование. Л.: Гидрометиздат. 1981. 164 с.
- [10]. Минаков Е.И., Мешков А.В., Полынкин А.В. Моделирование отражения радиолокационного сигнала от морской поверхности. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 2. С. 164-170.