

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 537.874.4:527

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).405-418

ГРНТИ 29.35.19+47.49.27

Специальность ВАК 2.2.16

*Научная статья*

### УЧЕТ ЗАТЕНЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Михайлов В. Н.

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

**Аннотация** Эффективность реализации радиотехнических систем и комплексов мониторинга акваторий неразрывно связана с созданием адекватных моделей эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) морской поверхности, востребованных при решении задач обнаружения и сопровождения надводных объектов в целях обеспечения безопасности морской навигации. В статье рассматривается влияние затенения волн, находящихся вдали от наблюдателя, более близкими. Рассмотрено и выполнено имитационное моделирование морской поверхности на основе вероятностной модели Лонге-Хиггинса для состояний морской поверхности от умеренного до сильного. Для полученных моделей проведен статистический анализ видимости участков поверхности. Показано, что в рамках применяемой модели волнения, эффект затенения имеет наибольшее влияние при зондировании вдоль направления ветра, а наименьший – в направлении, ему перпендикулярном. Установлено, что при сильном волнении эффект от затенения выражен в большей степени. По результатам анализа предложен подход к учету эффекта затенения при моделировании ЭПР морской поверхности.

**Ключевые слова:** ветровое волнение, эффективная поверхность рассеяния, видимость, математическое моделирование, гармонический синтез

**Для цитирования:** Михайлов В. Н. Учет затенения при моделировании эффективной поверхности рассеяния морской поверхности // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 405-418. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).405-418

*Research Article*

### CONSIDERATION OF SHADING IN SEA SURFACE RCS MODELS

Mikhailov V. N.

<sup>1</sup> *Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (Saint Petersburg, Russia)*

**Abstract** The effectiveness of the implementation of radar systems for water areas monitoring is inextricably linked with the creation of adequate models of the radar cross-section (RCS) of the sea surface, which are required for the efficient detection and tracking of surface objects in order to ensure the safety of marine navigation. The article considers the influence of shading of waves that are far from the observer by closer ones. The modeling of the sea surface based on the Longuet-Higgins probability model for various sea surface conditions ranging from moderate to strong is considered and corresponding simulations are performed. For the obtained models, statistical analysis of the visibility of water surface areas was carried out. It is shown that within the applied wave model, the shading effect appears the most pronounced when the direction of observation is collinear with the wind direction, and the least pronounced at the perpendicular direction. It has been established that with strong waves, the effect of shading is more pronounced. Based on the results of the analysis, an approach to take into account the shading effect in modeling the RCS of the sea surface was proposed.

**Keywords:** wind waves, radar cross-section, visibility index, numerical modeling, harmonic synthesis

**For citation:** Mikhailov V. N. Consideration of shading in sea surface RCS models // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 405-418. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).405-418

## Введение

Результаты измерений удельной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) морской поверхности, приводимые в литературных источниках, отражают значение, усредненное по большому количеству независимых экспериментов, проводимых в различное время и зачастую – в различных географических точках. В качестве примера можно указать исследования под руководством Масуко в Японском море и Тихом океане [1], совета по научным и промышленным исследованиям ЮАР (CSIR) на юго-западном побережье Южной Африки [2], результаты измерений в рамках проекта Ingara организации оборонной науки и технологий Австралии (DSTO) [3, 4] и некоторые другие. Наиболее полный на сегодняшний день набор данных об УЭПР, так называемые таблицы Натансона [5] является результатом объединения многочисленных экспериментов различных исследователей более, чем за 20 лет. Таким образом, известные данные не учитывают мгновенную структуру волнения и связанные с ней эффекты, такие как затенение, переотражение и др. Из вышеуказанного можно сделать вывод, что, как и сами значения, так и построенные на их основе модели удельных ЭПР морской поверхности, описанные, например, в [1, 6, 7, 8] не в полной мере могут быть использованы при моделировании или оценке эффективной поверхности рассеяния морской поверхности на ограниченном временном интервале. Для более точной оценки мгновенных значений при моделировании ЭПР морской поверхности необходимо учитывать затенение удаленных от наблюдателя волн более близкими [9, 10]. В литературе эта операция получила название – определение видимости. Задачи определения видимости широко рассматриваются в литературе с позиций геоинформационных систем и архитектуры [11, 12, 13, 14, 15]. Далее рассмотрим методы определения видимости и их применение при дистанционном радиолокационном зондировании морской поверхности.

## Методы определения видимости вершин

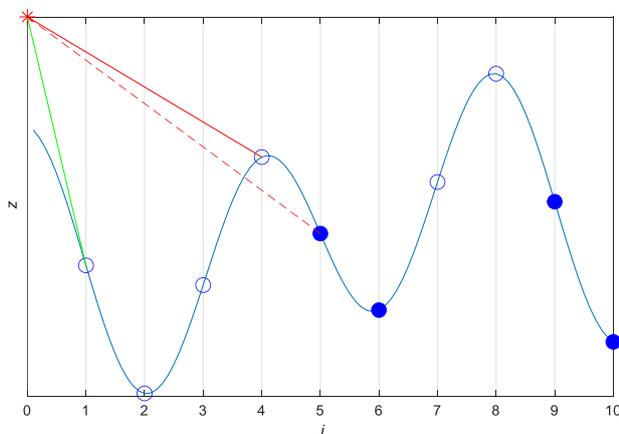
Рассмотрим сначала одномерный случай, иллюстрация которого приведена на рисунке 1а). Если линия прямой видимости, т. е. прямая линия, соединяющая наблюдателя и наблюдаемую точку или объект, не перекрывается из-за рельефа или других объектов, считается, что объект или точка являются видимыми, в противном случае – затененными [11, 12]. Алгоритм определения видимости может быть описан следующими шагами:

1. Выбирается точка наблюдения ( $O$ ), направление визирования (в двумерном случае вправо или влево) и ордината, с которой происходит наблюдение ( $z_0$ );

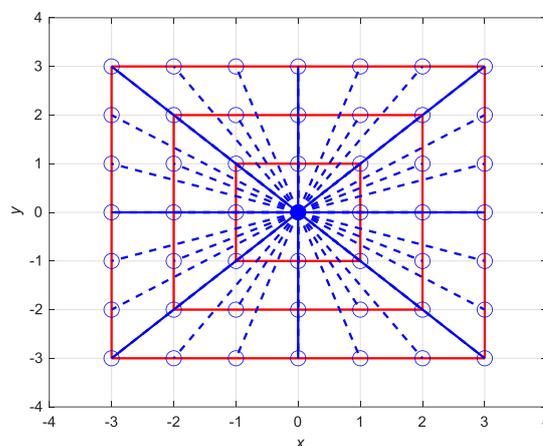
2. Ближайшая к наблюдателю точка интереса ( $P_1$ ) с ординатой  $z_1$  в выбранном направлении визирования считается видимой. Через точки  $O$  и  $P_1$  строится прямая с уклоном:  $A = \frac{z_1 - z_0}{|P_1 - O|}$  (зеленая линия на рисунке 1 а). Обозначим расстояние между точкой наблюдения и интереса как  $r_k = |P_k - O|$ ;  $k = 1:P_{max}$ ,  $P_{max}$  – самая дальняя от наблюдателя точка, видимость которой надо определить. Уравнение прямой тогда будет:  $y_k = z_0 + A \cdot r_k$ ,  $A = \frac{z_1 - z_0}{r_1}$ ;

3. Если ордината точки  $P_i$  ( $2 < i \leq P_{max}$ ) меньше, чем значение прямой ( $y_i$ ) в точке  $P_i$ , то точка является затененной (точка 5). В противном случае точка видима (точка 4 на рисунке 1 а), а уклон линии прямой видимости изменяется на  $A = \frac{z_i - z_0}{r_i}$  (сплошная красная линия);

4. Пункт 3 повторяется пока не будет определена видимость всех точек.



а) одномерная задача



б) двумерная задача

Рисунок 1. Задача определения видимости

Двумерный случай показан на рисунке 1 б. Из рисунка видна основная проблема, возникающая при определении видимости – за исключением кардинальных и порядковых направлений визирования (сплошные линии на рисунке 1 б, линии прямой видимости не проходят через узлы координатной сетки, в которых определены значения высот. Существуют несколько методов решения этой задачи, обзор и сравнение которых можно найти, например, в [11, 14, 15]. Рассмотрим два алгоритма, наиболее часто встречающихся в литературных источниках: R3 [11], XDraw [12].

Алгоритм R3 состоит из следующих шагов (рисунок 2 а):

1. Выбирается точка (точка 0;0) и высота наблюдения;
2. Проводится линия из точки наблюдения в интересующую точку. в рассматриваемом на рисунке 2 а примере, точка 2;3 (красный маркер);



может осуществляться по методу выбора максимума или минимума уклона, его среднего значения или линейной интерполяции [11]. Если линия прямой видимости проходит выше, чем высота рассматриваемой вершины, то вершина считается не видимой и уклон линии прямой видимости в этой вершине устанавливается равным уклону предыдущего слоя (с учетом метода аппроксимации), в противном случае вершина является видимой, а уклон линии прямой видимости для неё изменяется по аналогии с п. 3. для одномерного случая;

5. П. 4 выполняется для всех слоев.

Этот метод хорош тем, что для расчета видимости используется только информация о предыдущем слое. На рисунке 2 б приведен пример расположения точек, участвующих в расчете видимости точки (2;3).

### Модель морской поверхности

С позиций его спектрального анализа структуру волнового поля при ветровом волнении можно выразить на основе вероятностной модели Лонге-Хиггинса, как конечный результат сложной комбинации бесконечного числа элементарных составляющих, принимая за последние плоские, синусоидальные волны различных амплитуд, фаз и направлений распространения [16, 17]:

$$z(x, y, t) = \sum_{p=1}^{N_{\omega}} \sum_{q=1}^{N_{\theta}} \sqrt{2S(\omega_p, \theta_q) \cdot \Delta\omega \Delta\theta} \sin(k_p \cdot (x \cos(\theta_q) + y \sin(\theta_q)) - \omega_p t + \varepsilon_{p,q}),$$

где  $S(\omega, \theta)$  – двумерный энергетический спектр волнения;  $\omega$  – частота элементарной волны;  $\theta$  – угол между направлением распространения элементарной волны и направлением наблюдения, рад;  $k$  – волновое число, рад/с;  $\varepsilon$  – случайная фаза,  $N_{\omega}$  – число составляющих частотного спектра,  $N_{\theta}$  – число составляющих углового спектра,  $\Delta\omega$  – шаг по частоте, рад/с,  $\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_{\theta}}$  шаг по углу,  $x, y, t$  – текущие пространственно-временные координаты.

Двумерный энергетический спектр предоставляется произведением:

$$S(\omega, \psi) = S_f(\omega) \cdot S_d(\omega, \psi)$$

где  $S_f(\omega)$  – одномерный спектр волнения, показывающий распределение энергии морского волнения по частотам,  $S_d(\omega, \psi)$  – угловой спектр, показывающий распределение энергии по азимуту (угловое распределение).

Рассмотрим устоявшееся волнение, частотный спектр которого описывается спектром Пирсона-Московица. При моделировании будем использовать его запись через моменты спектра [18]:

$$S(\omega) = 7.04 \frac{m_0}{\bar{\omega}} \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^{-4}\right]$$

или, учитывая  $\omega_m = 0.71\bar{\omega}$ :

$$S(\omega) = 4,98 \frac{m_0}{\omega_m} \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^{-4}\right],$$

где:  $\omega_m = \frac{g}{U_{19,5}}$ ,  $U_{19,5}$  – скорость ветра на высоте 19,5 метров,  $m_0 = \frac{\bar{h}^2}{2\pi}$  – нулевой момент спектра,  $\bar{h}$  – средняя высота волн.

Средняя высота волнения может быть определена по формуле [19]:

$$\bar{h} = 1,16 \frac{U_{10}^2}{g} \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{1 + 1.04 \cdot 10^{-3} \left(\frac{gt}{U_{10}}\right)^{0.635}} \right]^2 \right\}$$

$t$  – продолжительность воздействия ветра,  $U_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 метров.

Как видно, в расчетах используются скорости ветра на разных высотах. При расчетах для будем использовать следующее, связывающее их соотношение [20]:

$$U(h) = U_{10} \left( 1 + C \cdot \ln\left(\frac{h}{10}\right) \right), \quad C = 0.0573 \sqrt{1 + 0.15U_{10}}, \quad h = 19.5 \text{ м}$$

Есть множество вариантов представления углового спектра волнения, описанных, например, в [16, 21]. При моделировании будем использовать угловое распределение  $\cos\text{-}2s$  для ветровых волн [20, 21]:

$$S_\theta(\omega, \theta) = \frac{\Gamma(s+1)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(s+0,5)} \cdot \cos^{2s}\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad s = 15 \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^\mu, \quad \begin{matrix} \mu = 0,1 & \omega < \omega_m \\ \mu = -2 & \omega \geq \omega_m \end{matrix}.$$

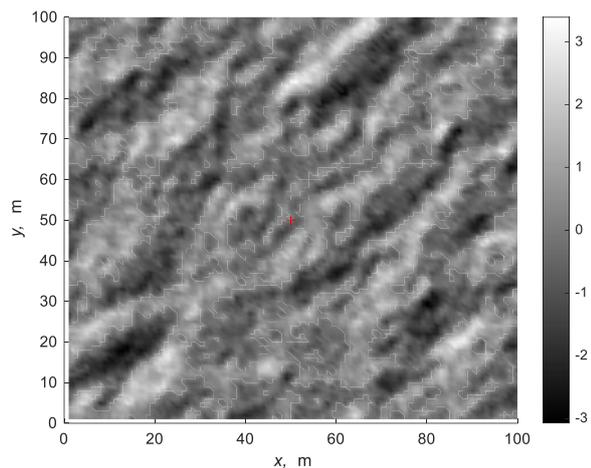
Пример реализации взволнованной морской поверхности, а также оценка видимости точек поверхности различными методами приведены на рисунке 3. Видимые участка поверхности выделены белым цветом, затененные – черным. Красным маркером обозначено положение наблюдателя.

Из рисунка видно, что методы дают большой разброс, вызванный, в первую очередь погрешностями аппроксимации. Для повышения точности моделирования и снижения его сложности перейдем к модели морской поверхности в полярной системе координат [22]:

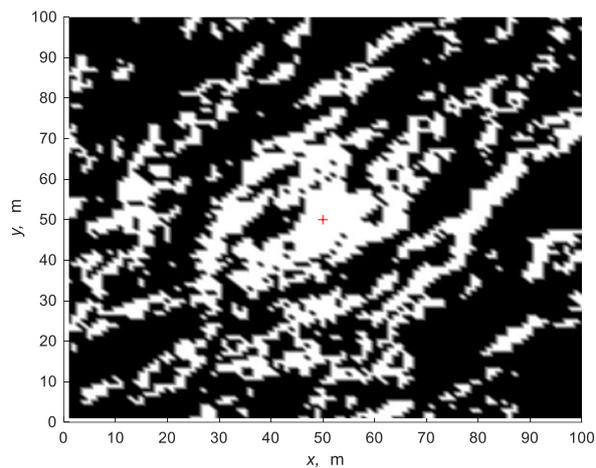
$$z(r, \theta, t) = \sum_{p=1}^{N_\omega} \sum_{q=1}^{N_\psi} \sqrt{2S_{p,q}} \cdot \Delta\omega\Delta\psi \sin(k \cdot (r \cos(\theta) \cos(\psi) + r \sin(\theta) \sin(\psi)) - \omega t + \varepsilon).$$

здесь  $r$  – дальность,  $\theta$  – азимут.

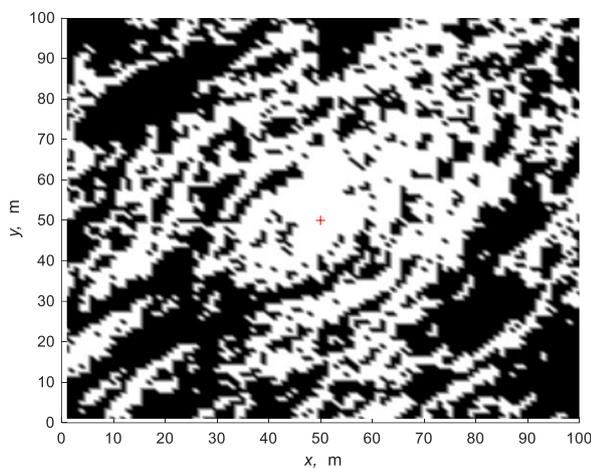
В этом случае для каждого азимута оценка видимости сводится к одномерному случаю без аппроксимации. Пример реализации морской поверхности и оценка видимости в полярных координатах приведены на рисунке 4.



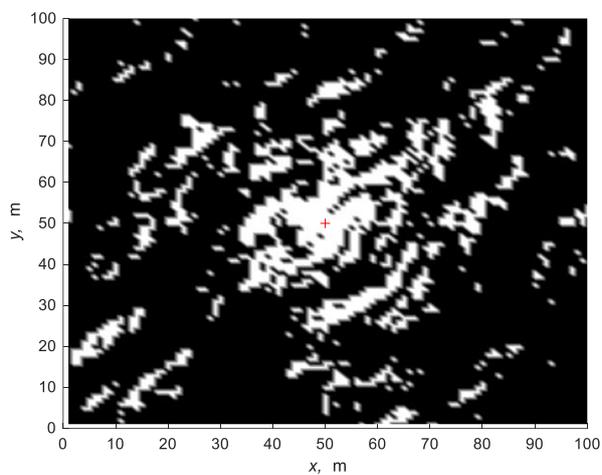
а) пример реализации морской поверхности



б) оценка видимости методом R3

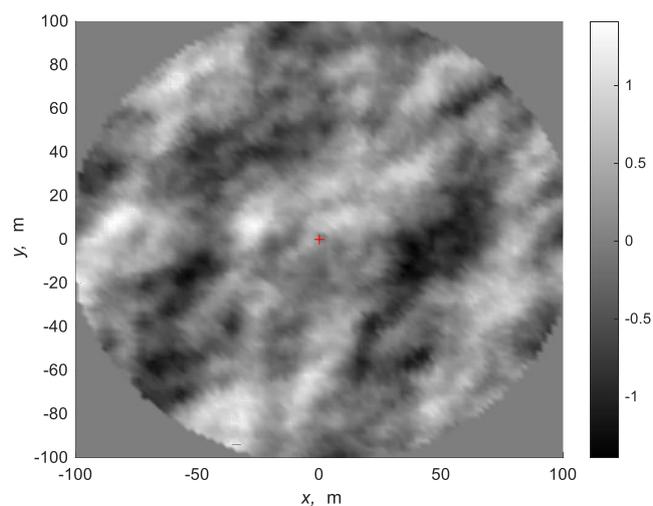


в) оценка видимости методом WDraw, аппроксимация методом минимума

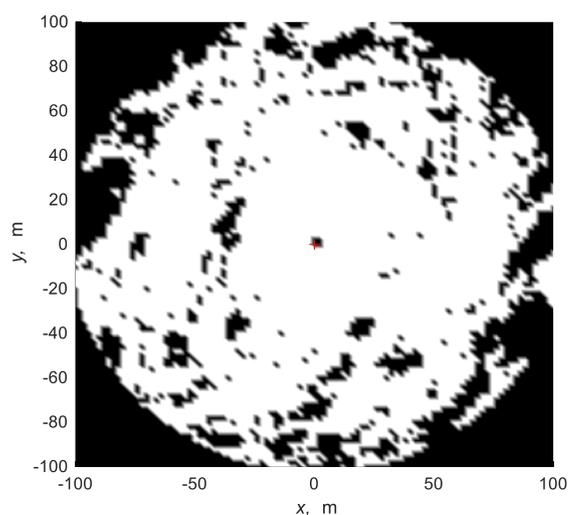


г) оценка видимости методом WDraw, аппроксимация методом максимума

Рисунок 3. Результаты оценки видимости участков морской поверхности в декартовой системе координат



а) пример реализации морской поверхности



б) оценка видимости

Рисунок 4. Результаты оценки видимости участков морской поверхности в полярной системе координат

### Модель удельной ЭПР

Для расчетов будем использовать модель NRL (Naval Research Laboratory), как наиболее точно аппроксимирующую экспериментальные данные Натансона [6, 7, 8]:

$$\bar{\sigma}_0 = c_1 + c_2 \log_{10} \sin \Phi + \frac{(27.5 + c_3 \Phi) \log_{10} f}{1 + 0.95 \Phi} + c_4 (1 + SS)^{(2 + 0.085 \Phi + 0.0335 SS)^{-1}} + c_5 \Phi^2,$$

где:  $\Phi$  – угол скольжения в градусах, равен арктангенсу отношения высоты наблюдателя к дальности,  $f$  – частота радиолокатора, ГГц,  $SS$  – волнение моря в баллах. Значение констант  $c_1 \dots c_9$  в децибелах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения констант модели NRL

Константа	Поляризация	
	Горизонтальная	Вертикальная
$c_1$	-73	-50,79
$c_2$	20,78	25,93
$c_3$	7,351	0,7093
$c_4$	25,65	21,58
$c_5$	0,00540	0,00211

Большинство моделей удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности, в том числе и NRL для оценки бальности волнения используют шкалу волнения Дугласа (таблица 2), приведенную, например, в [23, 24]. Значимая высота волны в таблице – это средняя высота самой высокой трети всех волн ( $h_{\frac{1}{3}}$ ), которая соотносится со средней высотой:  $\frac{\bar{h}}{h_{\frac{1}{3}}} \approx \frac{1,9}{3}$  [25].

Таблица 2. Интенсивность волнения по шкале Дугласа

Состояние моря, баллы	Описание волнения	Значимая высота волн		Скорость ветра		Разгон ветра		Время действ. ветра, часы
		футы	метры	узлы	метры в секунду	морск. мили	километры	
1	отсутствует	< 1	< 0,3	0 – 6	0 – 3,1			
2	слабое	1 – 3	0,3 – 0,9	6 – 12	3,1 – 6,2	50	93	5
3	умеренное	3 – 5	0,9 – 1,5	12 – 15	6,2 – 7,7	120	222	20
4	жесткое	5 – 8	1,5 – 2,4	15 – 20	7,7 – 10,3	150	278	23
5	очень жесткое	8 – 12	2,4 – 3,7	20 – 25	10,3 – 12,9	200	370	25
6	сильное	12 – 20	3,7 – 6,1	25 – 30	12,9 – 15,4	300	556	27
7	очень сильное	20 – 40	6,1 – 12,2	30 – 50	15,4 – 25,7	500	926	30
8	исключительное	> 40	> 12,2	> 50	> 25,7	700	1296	35

### Учет затенения

Для определения влияния затенения необходимо определить вероятность видимости каждого участка. Эта вероятность показывает, во сколько раз ЭПР единичной волны может превышать средний уровень ЭПР морской поверхности на этой дальности при длительном усреднении во времени. Чтобы определить вероятности, используем статистическое моделирование, опираясь на методы формирования морской поверхности и определения видимости ее участков, рассмотренные выше. Предложенная модель морской поверхности предполагает симметричность статистических характеристик относительно направления распространения волн или, что в рамках модели то же самое, направления ветра. На рисунке 5 приведены примеры зависимостей вероятности видимости волн при углах скольжения 1 и 5 градусов, усредненные по 500 реализаций и их полиномиальная аппроксимация, на рисунке  $\Delta\theta$  – угол между направлением ветра и линией визирования. Расхождения между углами 0 и 360 градусов вызваны краевыми эффектами. На рисунке 6 показаны зависимости вероятности видимости от угла скольжения для состояния моря от 3 до 6 баллов по шкале Дугласа, полученные по 10000 реализациям. Высота антенны над уровнем моря при моделировании равнялась 10 метрам.

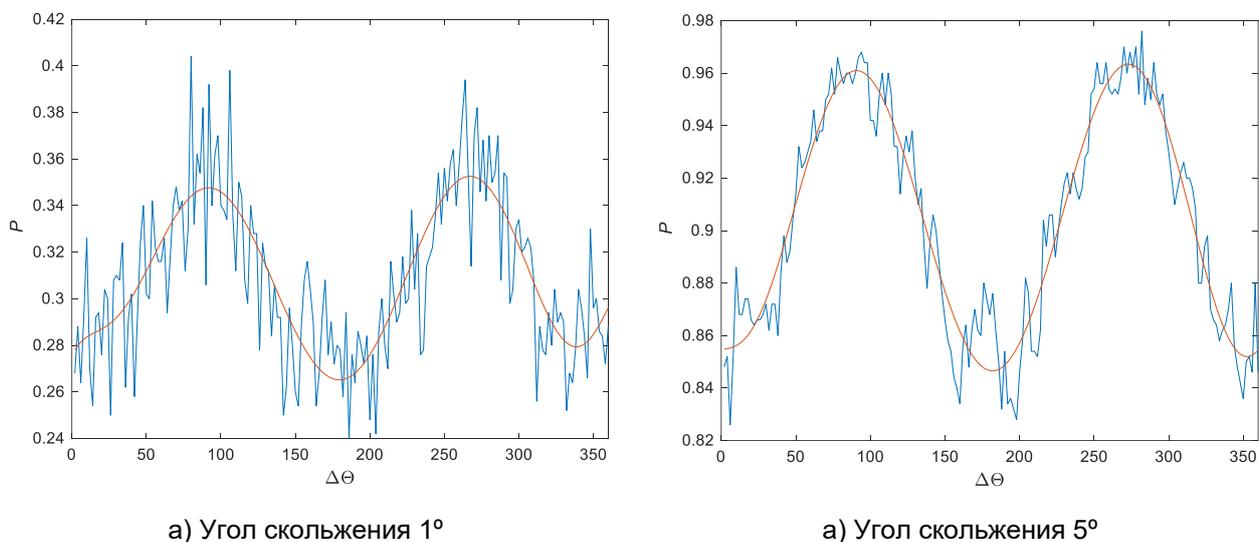
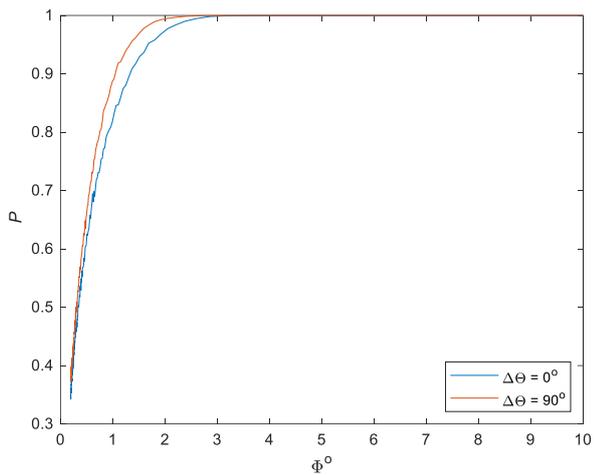
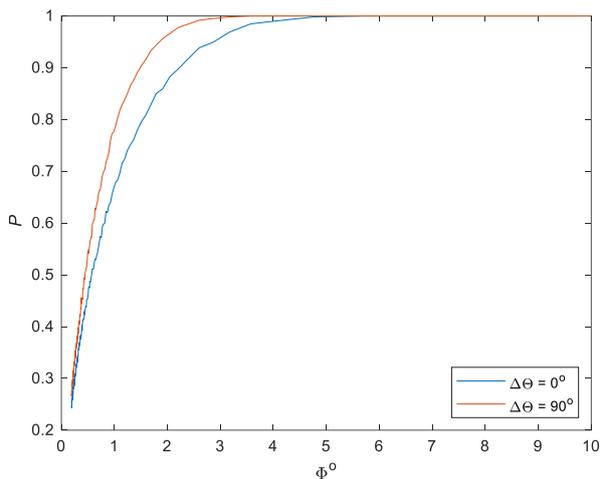


Рисунок 5. Вероятность видимости в зависимости от угла визирования

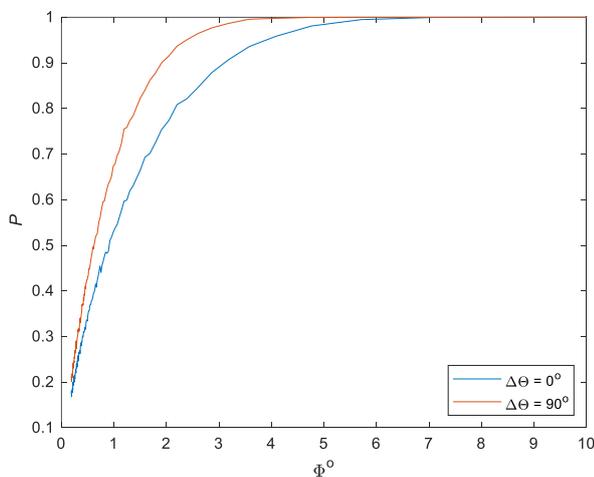
Далее сравним значения средней удельной ЭПР, полученной в соответствии с моделью NRL и мгновенные значения удельной ЭПР видимых волн. Результаты представлены на рисунке 7. Как и следовало ожидать, разница между средним и мгновенными значениями удельной ЭПР увеличиваются с ростом волнения, максимальная разница составляет до 4,5 дБ для волнения в три балла и до 9 дБ при волнении в 6 баллов.



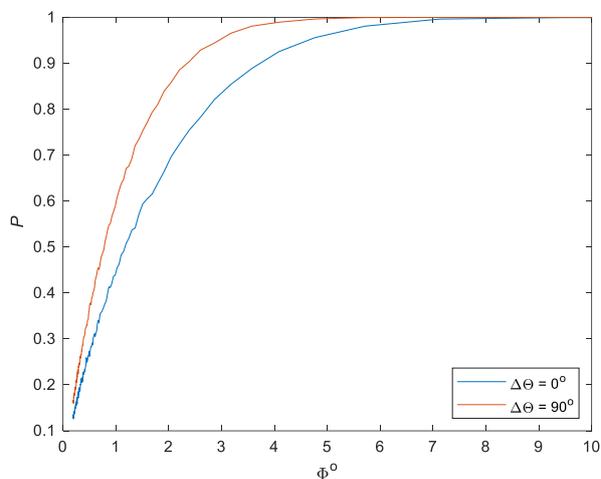
а) волнение 3 балла



б) волнение 4 балла

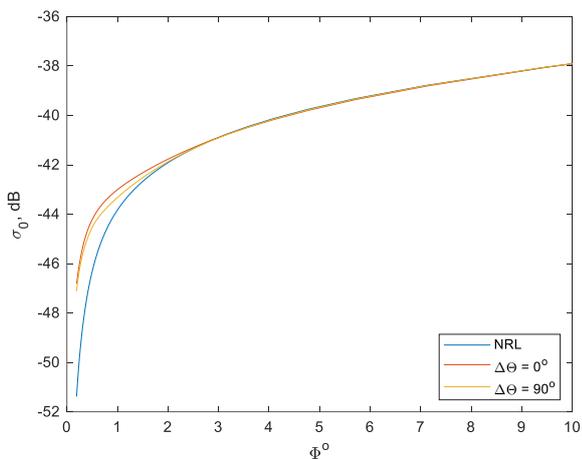


в) волнение 5 баллов

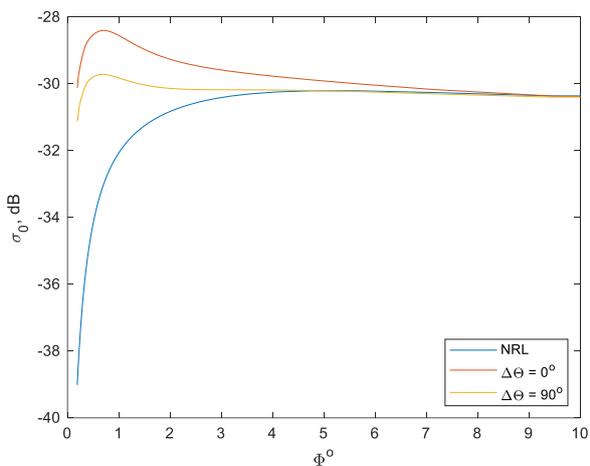


г) волнение 6 баллов

Рисунок 6. Вероятность видимости в зависимости от угла скольжения



а) волнение 3 балла



б) волнение 6 баллов

Рисунок 7. Сравнение средней и мгновенной удельной ЭПР

### Заключение

На основе проведенных исследований было показано, что мгновенные значения отражений от морской поверхности в области малых углов скольжения на 4–9 дБ выше, чем принятые в литературе средние значения. Наибольшая разница достигается при направлении визирования вдоль направления ветра при сильном волнении. Предложенный метод может использоваться для оценки отражений от морской поверхности при решении задач обнаружения и сопровождения малых надводных объектов, решении задач навигации и мониторинга акваторий.

### Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме Министерства науки и высшего образования № FSEE-2020-0002.

### Список литературы

1. Masuko H., Okamoto K., Shimada M., Niwa S. Measurement of Microwave Backscattering Signatures of the Ocean Surface Using X Band and Ka Band Airborne Scatterometers // Journal of Geophysical Research. 1986. 91(C11). 13065-13083. DOI: 10.1029/JC091IC11P13065
2. Herselman P. L., Baker C. J. Analysis of calibrated sea clutter and boat reflectivity data at C- and X-band in South African coastal waters // Radar Systems, 2007: IET International Conference. The Institution of Engineering and Technology on Radar Systems, Edinburgh, 2007. P. 1-5. DOI: 10.1049/cp:20070616
3. Stacy N. J. S., Crisp D., Goh A., Badger D., Preiss M. Polarimetric Analysis of Fine Resolution X-Band SAR Sea Clutter data // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05, 29-29 July 2005. Seoul (Korea), 2005. P. 2787–2790. DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1525646
4. Stacy, N. J. S., Preiss M., Crisp D. Polarimetric Characteristics of X-Band SAR Sea Clutter // IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 31 July 2006–04 August 2006. Denver, CO, USA. 2006. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.1030
5. Nathanson, F. E., Reilly J. P., Cohen M. N. Radar Design Principles. Second Edition. SciTech Publishing, 1999. 720 p. (English, this is a reprinting of the 1991 edition originally published by McGraw-Hill).
6. Gregers V., Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // IEEE National Radar Conference, 4–8 May. Pasadena, CA, USA, 2009. P. 1-5. DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977006
7. Gregers V., Mittal R. An Improved Empirical Model for Radar Sea Clutter Reflectivity. Memorandum Report, Naval Research Laboratory // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012. 48(4). 3512-3524. DOI: 10.1109/TAES.2012.6324732
8. Rosenberg L., Watts S. Radar Sea Clutter: Modelling and target detection // The Institute of Engineering Technology. SciTech Publishing, 2022. 383 p.
9. Минаков Е. И., Мешков А. В., Польшинкин А. В. Моделирование отражения радиолокационного сигнала от морской поверхности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. 12-2. 164-170
10. Кутузов В. М., Михайлов В. Н. Методика расчета ЭПР отражений от морской поверхности при оценке зоны видимости морской РЛС // Системы

радиолокационного мониторинга / Radar Monitoring Systems-2017 (RMS'2017): материалы международной конференции, 21-23 ноября, 2017 г., Ханой (Вьетнам), 2017. С. 23-32.

11. Franklin W., Ray C., Mehta S. Geometric algorithms for siting of air defense missile batteries // Research Project for Battle. 1994, 2756.

12. Carabaño, J., Sarjakoski T., Westerholm J. Efficient Implementation of a Fast Viewshed Algorithm on SIMD Architectures. The 23rd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing // IEEE, 2015. P. 199-202. DOI: 10.1109/PDP.2015.62

13. Kim Y.-H., Rana S., Wise S. Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques // Computers & Geosciences. 2004. 30(9). 1019-1032. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.07.008

14. Wu C., Guan L., Xia Q., Chen G., Chen B. PDERL: an accurate and fast algorithm with a novel perspective on solving the old viewshed analysis problem // Earth Science Informatics. 2021. 14. 619-632. DOI: 10.1007/s12145-020-00545-7

15. Wu Z., Wang Y., Gan W., Zou Y., Dong W., Zhou S., Wang M. A Survey of the Landscape Visibility Analysis Tools and Technical Improvements // International Journal Environmental Research Public Health. 2023. 20(3). 1788. DOI: 10.3390/ijerph20031788

16. Абузьяров З. К. Морское волнение и его прогнозирование. Ленинград, Гидрометеиздат, 1981. 166 с.

17. Massel, S. R. Ocean surface wave: their physics and prediction. Singapore, River Edge, NJ, World Scientific, 1996. 491 p.

18. Бородай И. К., Нецветаев Ю. А. Мореходность судов: методы оценки. Ленинград, Судостроение, 1982. 288 с.

19. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения: утвержден Документом регулирования производственной деятельности морских портов Минтранса России: введен в действие с 1 января 2002. Москва, СОЮЗМОРНИИПРОЕКТ, 2001. 77 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/379/4294817487.pdf> (Дата обращения: 14.05.2023).

20. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2006. 214 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/91f/4293747775.pdf> (Дата обращения: 25.04.2023).

21. Hauser D., Kahma K., Krogstad H. E., Lehner S., Monbaliu J. A. J. Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves. European cooperation in science and technology. Luxembourg: Publications Office, 2005. 465 p. Available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3318b2ad-dfa1-4b8f-8bed-632221bfa26d/language-en> (Дата обращения: 16.05.2023).

22. Михайлов В. Н., Пыко Н. С., Богачев М. И., Кутузов В. М. Флуктуационный анализ моделей морской поверхности // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 129-145. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145

23. Rosenberg L., Watts S. High Grazing Angle Sea-Clutter Literature Review // Defence Science and Technology Organisation Australia. Fairbairn, Canberra (Australia), 2013. 53 p.

24. Ward K. D., Tough R. J. A., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London, The Institution of Engineering and Technology, 2006. 474 p. DOI: 10.1049/PBRA020E

25. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. Ленинград, Гидрометеиздат, 1985. 256 с.

## References

1. Masuko H., Okamoto K., Shimada M., Niwa S. Measurement of Microwave Backscattering Signatures of the Ocean Surface Using X Band and Ka Band Airborne Scatterometers // *Journal of Geophysical Research*. 1986. 91(C11). 13065-13083. DOI: 10.1029/JC091IC11P13065
2. Herselman P. L., Baker C. J. Analysis of calibrated sea clutter and boat reflectivity data at C- and X-band in South African coastal waters // *Radar Systems, 2007: IET International Conference. The Institution of Engineering and Technology on Radar Systems, Edinburgh, 2007*. P. 1-5. DOI: 10.1049/cp:20070616
3. Stacy N. J. S., Crisp D., Goh A., Badger D., Preiss M. Polarimetric Analysis of Fine Resolution X-Band SAR Sea Clutter data // *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05, 29-29 July 2005. Seoul (Korea), 2005*. P. 2787–2790. DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1525646
4. Stacy, N. J. S., Preiss M., Crisp D. Polarimetric Characteristics of X-Band SAR Sea Clutter // *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium, 31 July 2006–04 August 2006. Denver, CO, USA. 2006*. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.1030
5. Nathanson, F. E., Reilly J. P., Cohen M. N. *Radar Design Principles*. Second Edition. SciTech Publishing, 1999. 720 p. (English, this is a reprinting of the 1991 edition originally published by McGraw-Hill).
6. Gregers V., Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // *IEEE National Radar Conference, 4–8 May. Pasadena, CA, USA, 2009*. P. 1-5. DOI: 10.1109/RADAR.2009.4977006
7. Gregers V., Mittal R. An Improved Empirical Model for Radar Sea Clutter Reflectivity. Memorandum Report, Naval Research Laboratory // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. 48(4). 3512-3524. DOI: 10.1109/TAES.2012.6324732
8. Rosenberg L., Watts S. *Radar Sea Clutter: Modelling and target detection* // The Institute of Engineering Technology. SciTech Publishing, 2022. 383 p.
9. Minakov E. I., Meshkov A. V., Polynkin A. V. Modelirovaniye otrazheniya radiolokatsionnogo signala ot morskoy poverkhnosti [Modeling of radar signal reflection from the sea surface] // *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2016. 12-2. 164-170.
10. Kutuzov V. M., Mikhailov V. N. Metodika rascheta EPR otrazheniy ot morskoy poverkhnosti pri otsenke zony vidimosti morskoy RLS [Methodology for calculating the EPR of reflections from the sea surface when assessing the visibility zone of a marine radar] // *Radar Monitoring Systems-2017 (RMS'2017): Proceedings of the international conference, November 21–23, 2017, Hanoi (Vietnam), 2017*. P. 23-32.
11. Franklin W., Ray C., Mehta S. Geometric algorithms for siting of air defense missile batteries // *Research Project for Battle*. 1994, 2756.
12. Carabaño, J., Sarjakoski T., Westerholm J. Efficient Implementation of a Fast Viewshed Algorithm on SIMD Architectures. The 23<sup>rd</sup> Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing // *IEEE*, 2015. P. 199-202. DOI: 10.1109/PDP.2015.62
13. Kim Y.-H., Rana S., Wise S. Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques // *Computers & Geosciences*. 2004. 30(9). 1019-1032. DOI: 10.1016/j.cageo.2004.07.008

14. Wu C., Guan L., Xia Q., Chen G., Chen B. PDERL: an accurate and fast algorithm with a novel perspective on solving the old viewshed analysis problem // *Earth Science Informatics*. 2021. 14. 619-632. DOI: 10.1007/s12145-020-00545-7
15. Wu Z., Wang Y., Gan W., Zou Y., Dong W., Zhou S., Wang M. A Survey of the Landscape Visibility Analysis Tools and Technical Improvements // *International Journal Environmental Research Public Health*. 2023. 20(3). 1788. DOI: 10.3390/ijerph20031788
16. Abuzyarov Z. K. Morskoye volneniye i yego prognozirovaniye [Sea agitation and its forecasting]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 166 p.
17. Massel, S. R. Ocean surface wave: their physics and prediction. Singapore, River Edge, NJ, World Scientific, 1996. 491 p.
18. Borodai I. K., Netsvetaev Yu. A. Morekhodnost' sudov: metody otsenki [Seaworthiness of ships: assessment methods]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1982. 288 p.
19. Ukazaniya po raschetu nagruzok i vozdeystviy ot voln, sudov i l'da na morskoye gidrotekhnicheskoye sooruzheniya [Instructions for calculating loads and impacts from waves, ships and ice on marine hydraulic structures]: approved by the Document for regulating the production activities of seaports of the Ministry of Transport of Russia: entered into force on January 1, 2002. Moscow: SOYUZMORNII PROEKT Publ., 2001. 77 p. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/379/4294817487.pdf> (Accessed: 14.05.2023).
20. Spravochnyye dannyye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiyskogo morey [Reference data on the wind and wave regime of the Barents, Okhotsk and Caspian Seas] // Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2006. 214 p. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/91f/4293747775.pdf> (Accessed: 25.04.2023).
21. Hauser D., Kahma K., Krogstad H. E., Lehner S., Monbaliu J. A. J. Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves. European cooperation in science and technology. Luxembourg: Publications Office, 2005. 465 p. Available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3318b2ad-dfa1-4b8f-8bed-632221bfa26d/language-en> (Accessed: 16.05.2023).
22. Mikhailov V. N., Pykov N. S., Bogachev M. I., Kutuzov V. M. Fluktuatsionnyy analiz modeley morskoy poverkhnosti [Fluctuation analysis of models of the sea surface] // *Vestnik of NovSU*. 2023. 1(130). 129-145. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).129-145
23. Rosenberg L., Watts S. High Grazing Angle Sea-Clutter Literature Review // Defence Science and Technology Organisation Australia. Fairbairn, Canberra (Australia), 2013. 53 p.
24. Ward K. D., Tough R. J. A., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London, The Institution of Engineering and Technology, 2006. 474 p. DOI: 10.1049/PBRA020E
25. Davidan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. Wind waves in the World Ocean. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 256 p.

#### Информация об авторах

*Михайлов Вячеслав Николаевич* – старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-8155-9310, [vmikhailov@etu.ru](mailto:vmikhailov@etu.ru)