

Модель удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности при малых углах скольжения

В. Н. Михайлов

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

vnmikhaylov@etu.ru

Аннотация. Основным параметром, определяющим интенсивность отражения радиосигнала от морской поверхности, является удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР), которая зависит от большого числа различных факторов, таких как интенсивность морского волнения, направление и скорость ветра, угол падения, частота и поляризация электромагнитной волны. Существующие модели УЭПР за редким исключением в качестве параметра, определяющего интенсивность морского волнения, используют состояние моря по шкале Дугласа. Это обусловлено тем, что большая часть доступных экспериментальных данных, используемых для верификации моделей, также ранжирована в соответствии с этой шкалой. Тем не менее, в настоящее время основной шкалой для оценки волнения моря используется девятибалльная шкала Всемирной метеорологической организации (ВМО), что зачастую приводит к ошибкам и неточностям при использовании существующих моделей УЭПР для оценки мощности отраженных сигналов. В докладе предложена модель УЭПР для малых углов скольжения, которая в качестве параметра интенсивности морского волнения использует значимую высоту волн. Это позволяет использовать предложенную модель при оценке морского волнения как по шкале Дугласа, так и по шкале ВМО. Модель разработана таким образом, чтобы обеспечить минимальное среднее абсолютное отклонение от доступных экспериментальных данных при углах падения до 10 градусов. В дальнейшем будем называть предложенную модель моделью удельной эффективной поверхности рассеяния морской поверхности ETU.

Ключевые слова: удельная эффективная поверхность рассеяния, морская поверхность, модель отражения, значимая высота волн

I. ВВЕДЕНИЕ

При анализе публикаций, посвященных обзорам моделей УЭПР за последние годы, например, [1–7], видно, что различные модели охватывают различные диапазоны углов скольжения. А большинство моделей, охватывающих широкий диапазон углов, используют различные формулы расчета для различных значений углов. По тем же источникам можно выделить три области углов скольжения: область квазизеркального отражения (больших углов), область плато (средних углов) и область интерференции (малых углов). Границей между большими и средними углами угол, примерно равный 60 градусам. Угол, разделяющий средние и малые углы, приблизительно равен 10 градусам. В докладе будут рассмотрены модели УЭПР для малых углов скольжения (менее 10 градусов).

Подавляющее число существующих на сегодняшний день моделей УЭПР основаны на оценке морского волнения по шкале Дугласа. В настоящее же время обычно используется шкала Всемирной метеорологической организации, что делает применение существующих моделей затруднительным. В рамках доклада будет предложена модель, использующая оценку волнения моря с помощью значимой высоты волн $h_{1/3}$, определяемой как средняя высота волны высшей трети волны [1]. Для предложенной модели будет произведена оценка точности с использованием таблиц Натансона [8].

II. МОДЕЛЬ УДЕЛЬНОЙ ЭПР МОРЯ

Рассмотрим несколько наиболее распространенных моделей УЭПР.

Модель GIT (Georgia Institute of Technology) предложена в Технологическом институте Джорджии в 1978 году [9]. Модель GIT объединяет эмпирические факторы с математическими моделями различных механизмов рассеяния. Она учитывает многолучевое распространение электромагнитной волны, высоту и направление морских волн, а также силу ветра. Эта модель хорошо согласуется с данными Натансона при волнении моря в 4 и более баллов, однако, при меньшем волнении наблюдаются значительные расхождения с экспериментальными данными [1, 10].

Модель TSC (Technology Service Corporation) [11] структурно напоминает модель GIT и предполагает, что в зависимости от угла скольжения доминируют два различных механизма: квазизеркальное отражение при больших углах скольжения и диффузное рассеяние при малых углах скольжения, при этом полное обратное рассеяние представляет собой сумму этих двух составляющих.

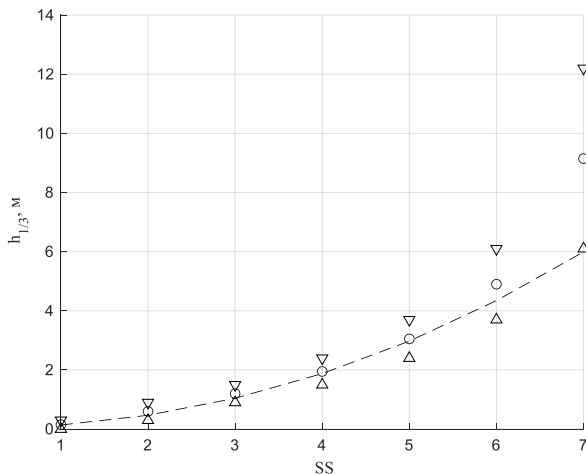
Модель NRL (Naval Research Laboratory) была предложена Вильгельмом Грегерсом-Хансеном и Раши Митталом в 2009. Она основана на аппроксимации значений из таблиц Натансона [10]. В 2012 году была предложена версия модели, отличающаяся меньшим числом составляющих [12].

Модель ETU (Electrotechnical University), представляемая в докладе также основана на аппроксимации экспериментальных данных Натансона. При создании модели ставились две основные задачи: входным параметром, определяющим интенсивность волнения, является значимая высота волн, точность аппроксимации экспериментальных данных должна быть не хуже, чем существующих моделей.

Сначала оценим значения значимой высоты морского волнения в зависимости от интенсивности волнения (рис. 1). Треугольниками показаны верхнее и нижнее значение значимой высоты для соответствующей шкалы [1], кругами – среднее значение (табл. 1). Пунктирной линией на графиках показана их аппроксимация в соответствии с формулами для шкалы Дугласа (1) и шкалы ВМО (2) [12]:

$$h_{1/3}^D = 0,04 + 0,1 \times SS_D^{2,1} \quad (1)$$

SS_D – состояние моря в баллах по шкале Дугласа,



Шкала Дугласа

Рис. 1. Значимая высота волн в зависимости от состояния моря

При создании модели были использованы зависимости, предложенные авторами модели NRL [10, 12]. Далее была проведена оптимизация структуры модели и ее коэффициентов. Критерием оптимизации было среднее отклонение результатов моделирования от данных Натансона при условии волнения моря от 1 до 6 баллов по шкале Дугласа, углах от 0,1 до 10 градусов и частотах от 0,5 до 35 ГГц. Значимая высота выбиралась, исходя из данных табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧИМЫЕ ВЫСОТЫ ВОЛН

SS	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_{1/3}^D$	0,15	0,6	1,2	1,95	3,05	4,9	9,15	–
$h_{1/3}^{WMO}$	0,05	0,3	0,875	1,895	3,27	5	7,5	11,5

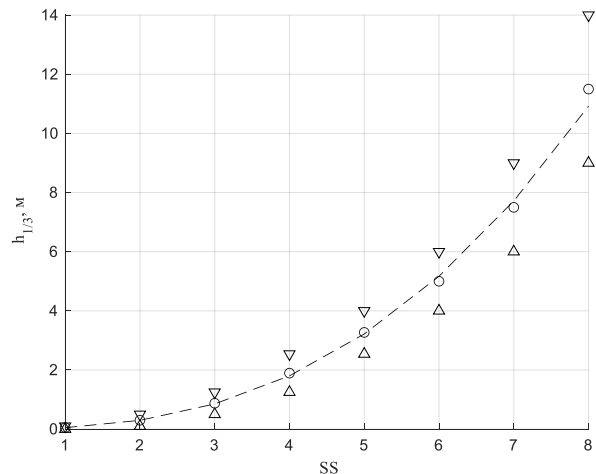
Итоговая формула модели ETU представлена выражением (3).

$$\sigma_0 = a \cdot \left(1 + 2,7 \sqrt{h_{1/3}}\right)^{\frac{1}{2+0,08(\Theta + \sqrt{h_{1/3}})}} + \frac{30+b \cdot \Theta}{1,1+\Theta} + c \cdot \log_{10}(\Theta) + 3 \cdot 10^{-3} \Theta - d \quad (3)$$

$$h_{1/3}^{WMO} = 0,049 + \times SS_{WMO}^{2,6} \quad (2)$$

SS_{WMO} – состояние моря в баллах по шкале ВМО.

Из графика видно, что аппроксимация для шкалы Дугласа при сильном волнении дает заниженные результаты, что не позволяет получить зависимость УЭПР от значимой высоты путем пересчета входного параметра с помощью (1).



Шкала ВМО

где: σ_0 – удельная ЭПР в дБ, $h_{1/3}$ – значимая высота волн в метрах, Θ – угол скольжения в градусах. Коэффициенты a, b, c, d представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. Коэффициенты модели ETU

Коэффициент	горизонтальная поляризация	вертикальная поляризация
a	25,45	21,6
b	8,8	0
c	20,8	26,4
d	109,5	96,5

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования (сплошные линии) и данные Натансона (крестики) показаны на рис. 2–6. В табл. 3 показано среднее отклонение для моделей GIT, TSC и NRL по данным [12] и предложенной модели ETU.

ТАБЛИЦА III. СРЕДНЕЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Модель	горизонтальная поляризация	вертикальная поляризация
GIT	13,4	12,0
TSC	7,9	10,1
NRL	2,3	2,2
ETU	2,2	2,1

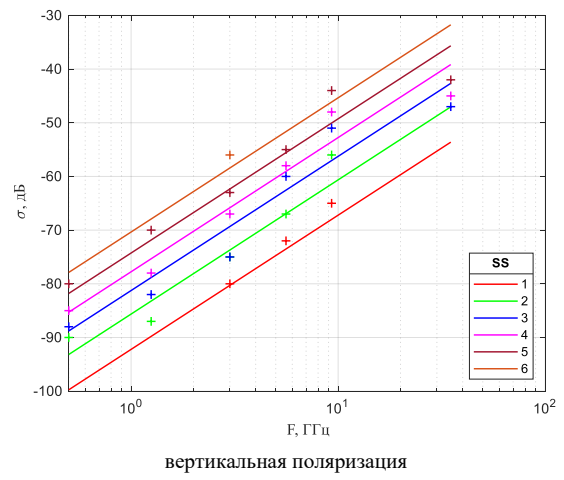
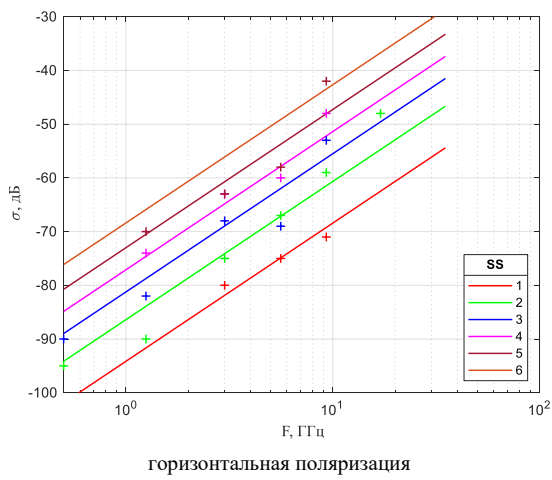


Рис. 2. Сравнение модели ETU с данными Натансона, угол скольжения $0,1^\circ$

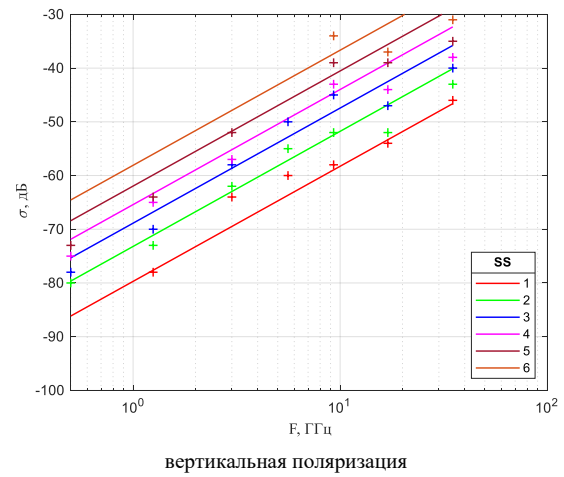
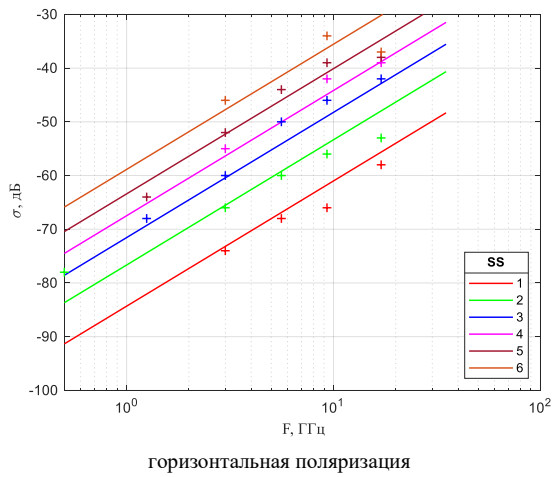


Рис. 3. Сравнение модели ETU с данными Натансона, угол скольжения $0,3^\circ$

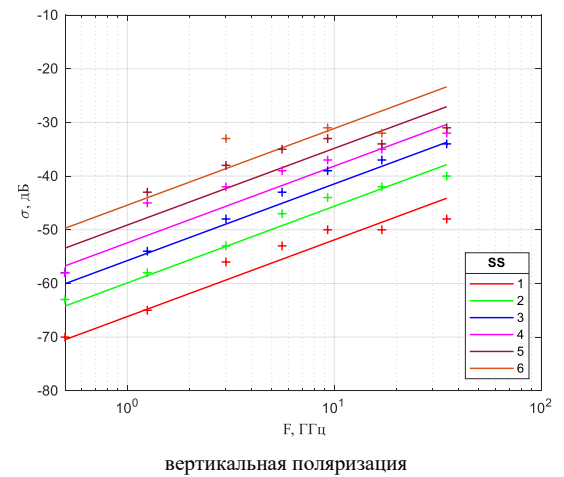
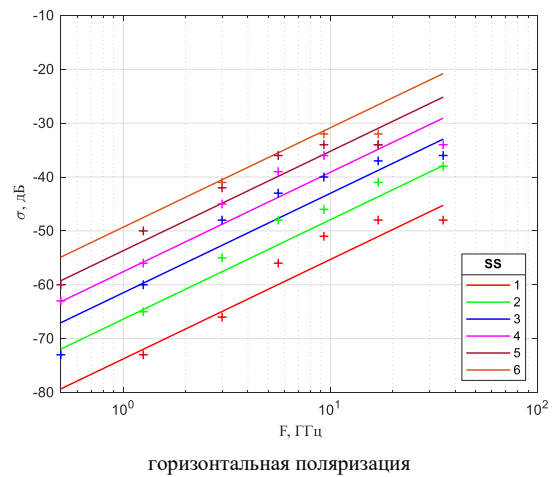


Рис. 4. Сравнение модели ETU с данными Натансона, угол скольжения 1°

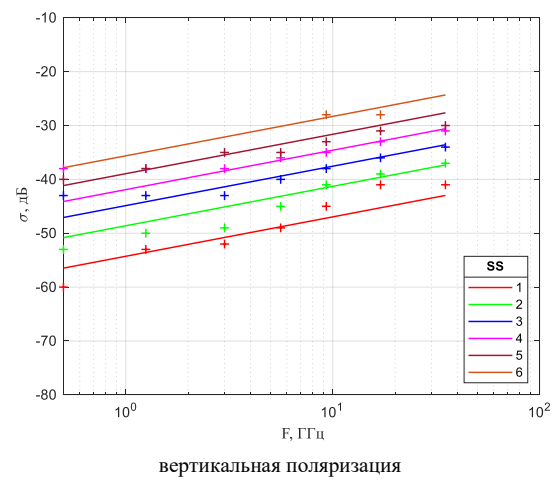
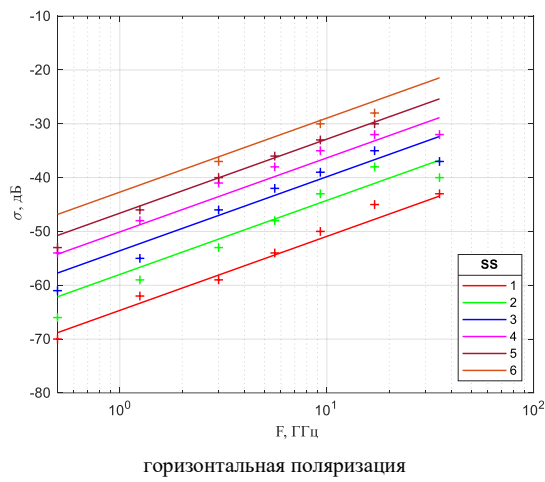


Рис. 5. Сравнение модели ETU с данными Натансона, угол скольжения 3°

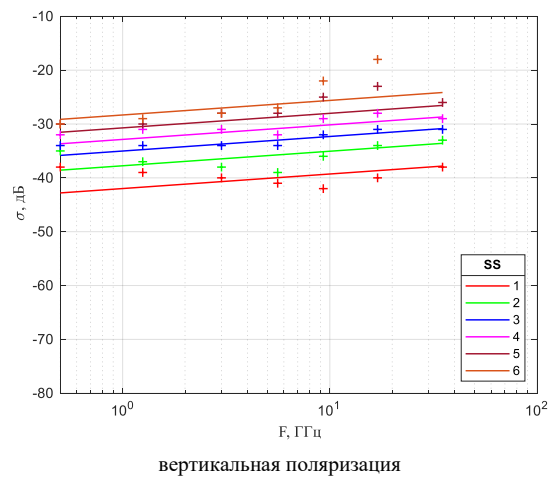
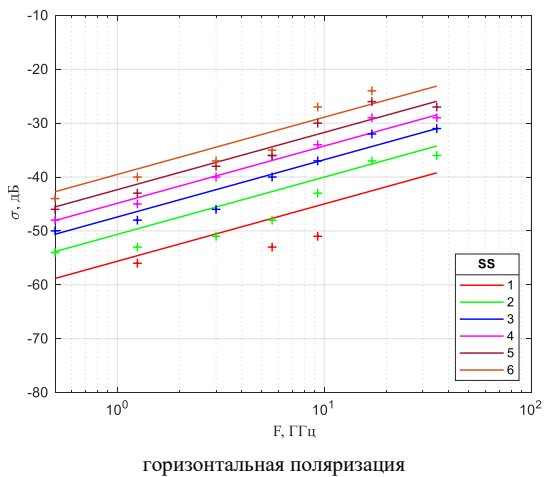


Рис. 6. Сравнение модели ETU с данными Натансона, угол скольжения 10°

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель ETU, предложенная в докладе обеспечивает среднее отклонение относительно экспериментальных данных 2,1–2,2 дБ при углах скольжения от 0,1 до 10 градусов и частотах от 0,5 до 35 ГГц при значимой высоте волн до 5 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rosenberg L., Watts S. Radar Sea Clutter: Modelling and target detection. The Institute of Engineering Technology, 2022. 349 p.
- [2] Yang B., Jiang M., Wang J. Performance analysis of empirical models of sea surface reflectivity based on measured data // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. pp. 1-7. doi 10.1088/1742-6596/2290/1/012098
- [3] Zhao J., Gao H., Jiang R., Wang X. An Improved SASS Model for Sea Clutter Reflectivity at Ku-band // International Conference on Computational Modeling, Simulation and Optimization. 2019. pp. 28-35. doi 10.12783/dtcse/cmso2019/33589
- [4] Watts S., Rosenberg L. Challenges in radar sea clutter modelling // IET Radar Sonar Navig. 2022. 16(9). pp. 1403–1414. doi.org/10.1049/rsn2.12272
- [5] Wu G., Fan J., Zhang F., Lu F. Semi-empirical model of sea clutter based on Zero Memory Nonlinearity // IEEE Access. 2019. V.7. pp. 18125-18137. doi 10.1109/ACCESS.2019.2897781
- [6] Ward K., Tough R., Watts S. Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006. 452 p.
- [7] Rosenberg L., Watts S. High Grazing Angle Sea-Clutter Literature Review. Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organization, 2013. 44 p.
- [8] Nathanson F.E., Reilly J.P., Cohen M. Radar Design Principles, 2ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 720 p.
- [9] Horst M.M., Dyer F.B., Tuley M.T. Radar sea clutter model // IEEE International Conference of Antennas and Propagation, 1978. N 169, pp. 5–10.
- [10] Vilhelm G.-H. and Mittal R. An empirical sea clutter model for low grazing angles // IEEE National Radar Conference – Proceedings. 2009. pp. 1-5. doi:10.1109/RADAR.2009.4977006
- [11] Technology Service Corporation. Backscatter from sea. Radar Workstation, 1990. V.2: p. 177-186.
- [12] Vilhelm G.-H. and Mittal R. An improved empirical model for radar sea clutter reflectivity: Washington: Naval Research Laboratory. 2012. 45 p.