

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С.Э. Григас, Д.Ц. Литовченко, А.А. Скорынин

ОАО «Корпорация «Комета»

stanislav.grigas@gmail.com

В настоящее время для исследования процессов, протекающих в океане, широко применяются методы дистанционного наблюдения Земли из космоса. Особое место среди них занимает активное зондирование морской поверхности радиолокаторами с синтезированной апертурой [1]. Важным преимуществом радиолокационных средств перед оптическими сенсорами является возможность получения информации вне зависимости от погодных условий, состояния атмосферы и освещенности. Развитие экспериментальных методов радиолокационного наблюдения морской поверхности требует наличия соответствующего теоретического аппарата.

Известно несколько аналитических способов решения задачи рассеяния электромагнитных волн (ЭМВ) взволнованной морской поверхностью, например, метод малых приближений и метод Кирхгофа [2]. Однако аналитические методы являются приближенными, что ограничивает область их применения и снижает точность расчетов. По этой причине для описания всего многообразия физических процессов, происходящих при взаимодействии электромагнитного излучения с поверхностью океана, широко используются возможности численного моделирования.

На практике для описания рассеяния ЭМВ на шероховатых поверхностях часто применяется техника численного решения уравнений Максвелла в интегральной форме с использованием метода моментов, подробно описанная, например, в [3]. В настоящей работе сделана попытка использования данной техники для анализа отражательных характеристик морской поверхности в радиодиапазоне.

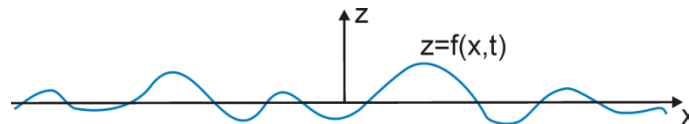


Рис. 1. Одномерная морская поверхность

В работе исследуются закономерности отражения ЭМВ от одномерной морской поверхности, основной характеристикой которой является величина $z=f(x,t)$ отклонения от среднего уровня (см. рис. 1). Эта величина может быть представлена в виде суперпозиции гармонических волн с частотами ω_n и проекциями волнового вектора k_{xn} :

$$f(x,t) = \frac{1}{L} \sum_n \tilde{f}(k_{xn}) \exp[-i(k_{xn}x - \omega_n t)], \quad (1)$$

где L – размер области моделирования. Спектр волнения $\tilde{f}(k_{xn})$ описывает конкретную реализацию морской поверхности связан со средним спектром мощности W следующим выражением:

$$\tilde{f}(k_{xn}) = \frac{\gamma_n}{\sqrt{2}} \sqrt{2\pi L} \sqrt{W(k_{xn})}, \quad (2)$$

где γ_n – комплексные амплитуды гармоник. Значения γ_n случайны и могут быть описаны средним спектром мощности W . Наиболее часто в литературе в качестве W используется спектр развитого морского волнения – спектр Пирсона-Московица, полученный в результате обобщения экспериментальных данных [4]. Он имеет следующий вид:

$$W(k_{xn}) = \frac{\alpha}{4k_{xn}^3} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{k_{xn}^2 U^4}\right), \quad (4)$$

где $\alpha=0.0081$, $\beta=0.74$, $g=9.81$ м/с², U – скорость ветра на высоте 19.5 м над средним уровнем морской поверхности. Спектр Пирсона-Московица хорошо описывает вклад длинных гравитационных волн в общую структуру морского волнения, но не содержит в себе информации о коротких капиллярных волнах. Так как гравитационными считаются волны на воде длиной 5 см и более, область применимости рассматриваемой математической модели рассеяния ЭМВ ограничивается дециметровым и более длинноволновыми диапазонами. В случае гравитационных волн на глубокой воде волновой вектор k связан с круговой частотой ω дисперсионным соотношением

$$\omega = \sqrt{kg}. \quad (5)$$

С использованием описанной математической модели проведен расчет зависимости удельной эффективной поверхности рассеяния (уЭПР) морской поверхности от угла скольжения при скоростях ветра от 5 до 10 м/с в моностатической схеме радиолокационного зондирования (приемная и передающая позиции совмещены в пространстве). Результаты расчетов, проведенных для горизонтальной поляризации излучения с длиной волны 15 см, представлены на рис. 2 сплошной линией. Также на рисунке приведены экспериментальные данные [5] (штриховой пунктир), а также эти же данные, но с разбросом ± 5 дБ (точечный пунктир). Результаты численного моделирования находятся в хорошем соответствии с экспериментальными значениями для широкого диапазона углов скольжения вплоть до 10° . Это позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемая модель верно предсказывает значение уЭПР морской поверхности для области квазизеркального и диффузного отражения, в то время как в области интерференции наблюдаются существенные расхождения с экспериментальными данными.

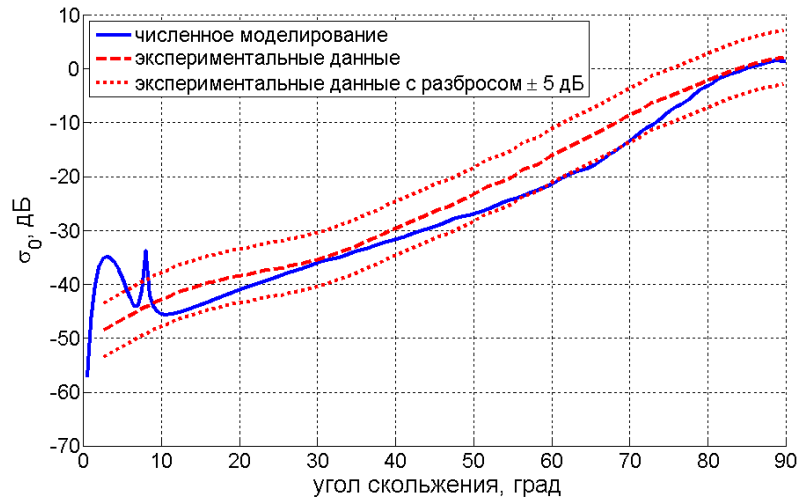


Рис. 2. Сплошная кривая - зависимость уЭПР σ_0 морской поверхности от угла скольжения. Данные усреднены по 1000 реализаций морской поверхности при скорости ветра от 5 до 10 м/с.

Как отмечается в [5], высокий уровень отраженного назад сигнала при углах падения, близких к вертикальному, обусловлен зеркальными отражениями от facets, ориентированных перпендикулярно линии визирования радиолокационной станции (РЛС). По мере того, как волнение моря усиливается и поверхность становится более шероховатой, увеличивается величина среднеквадратичного наклона поверхности воды – все меньше facets оказывается ориентированными в направлении РЛС и уровень отраженного сигнала уменьшается [5]. Этим объясняется характер зависимости уЭПР морской поверхности от скорости ветра при нормальном падении излучения, приведенной на рис. 3а.

В области плато (углы скольжения 10° - 40°) происходит обратное явление: в результате того, что с усилением ветра поверхность становится более шероховатой, диффузное рассеяние от нее увеличивается и уЭПР возрастает [5]. Как отмечается в [5], шероховатость поверхности с усилением ветра возрастает до тех пор, пока не происходит насыщение при скорости ветра 15 м/с. При более сильном ветре его скорость превышает среднюю фазовую скорость волн, поэтому дальнейшее усиление ветра сопровождается передачей энергии волнам большой длины. Очень высокие фазовые скорости и относительно пологие формы этих волн не дают вклада в шероховатость поверхности. Следовательно, рост уЭПР с увеличением скорости ветра также должен испытывать насыщение при скорости ветра около 15 м/с [5]. Эта закономерность наблюдается на рис. 3б, на котором приведена зависимость уЭПР морской поверхности от угла падения при различных значениях скорости ветра. Согласно результатам численных расчетов, насыщение роста уЭПР при увеличении скорости ветра наступает не при 15 м/с, а уже при 7-8 м/с. Причины такого расхождения, по-видимому, заключаются в том, что в модели рассматривается одномерная, а не двухмерная морская

поверхность, а также не учитывается рассеяние излучения на коротких капиллярных волнах.

Таким образом, рассматриваемая модель позволяет наблюдать основные закономерности рассеяния ЭМВ взволнованной морской поверхностью и может быть использована для оценки ее отражательных характеристик. Качественно результаты численных расчетов хорошо соотносятся с экспериментальными данными, однако имеются некоторые количественные различия, обусловленные неполнотой описания динамической морской поверхности.

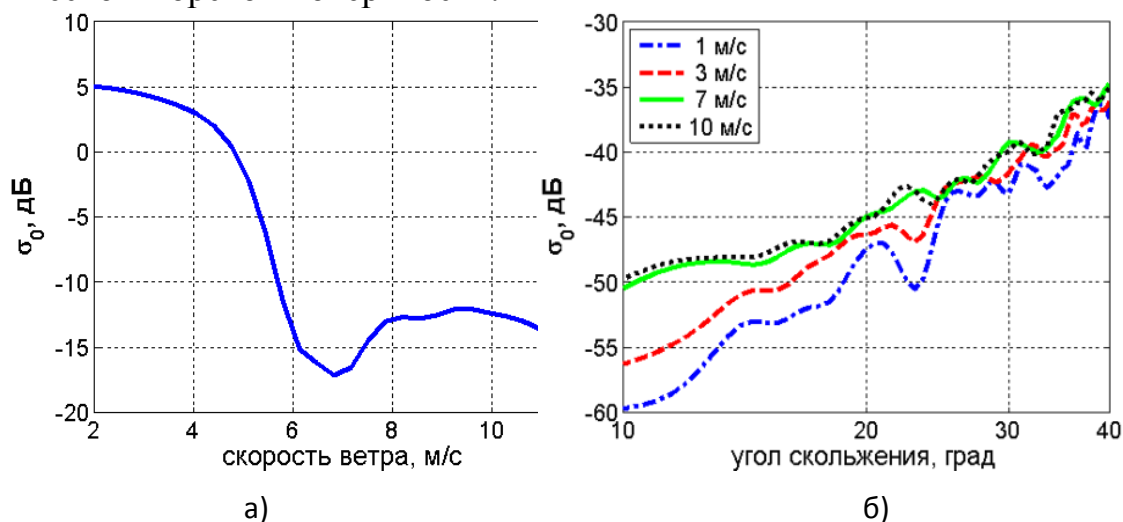


Рис. 3. а) Зависимость уЭПР морской поверхности σ_0 от скорости ветра при нормальном падении излучения с длиной волны 1.5 м с горизонтальной поляризацией. б) Зависимость σ_0 от угла скольжения при различной скорости ветра для горизонтальной поляризации падающего излучения с длиной волны 24 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Robinson I.S. Measuring the Oceans from Space: The Principles and Methods of Satellite Oceanography. // Springer. 2004.
2. Tsang L. et al. Scattering of Electromagnetic Waves, Theories and Applications. // John Wiley & Sons. 2004.
3. Tsang L. et al. Scattering of Electromagnetic Waves, Numerical Simulations. // John Wiley & Sons. 2004.
4. Pierson W.J., Moskowitz L. // J. Geophys. Res. 1964. V. 69, Is. 24. P. 5181.
5. Skolnik M.I. Radar Handbook. // McGraw-Hill. 1970.