

# SIMULATION MEASUREMENTS USING DUAL-FREQUENCY PRECIPITATION RADAR (DPR) ON A MODEL OF ROUGHNESS SEA SURFACE

Kirill Ponur, Vladimir Karaev, Mariya Panfilova

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences

## ABSTRACT

В данной работе было проведено моделирование схемы измерения радиолокатора DPR (Dual-frequency Precipitation Radar) спутника GPM (Global Precipitation Measurements) на взволнованной морской поверхности. При моделировании схемы измерения решалась задача обратного рассеяния электромагнитного излучения. Для её решения искалось отраженное от зеркальных точек поле вблизи приемной антенны, а затем моделировалось удельное сечение обратного рассеяния и исследовалось его зависимость от неявных параметров: безразмерного разгона и направлении распространения волнения относительно движения спутника.

## 1. INTRODUCTION

Моделирование морской поверхности является важным и развивающимся направлением, но несмотря на это остается ряд вопросов, которые требуют дальнейших исследований в приложении к решаемой задаче.

Для описания поверхностного волнения современные модели активно применяют уравнения гидродинамики. Наиболее известными в настоящее время являются модели третьего поколения WAM (WaveModel), SWAN (Simulation Waves Nearshore) и WaveWatch III [1–3], учитывающие взаимодействие между четырьмя волнами и процессы обрушения волн с образованием пены и брызг.

В данной работе на модельной морской поверхности будет решаться задача обратного рассеяния электромагнитного излучения и моделироваться схема измерения Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) спутника GPM. При её решении необходимо найти отраженное поля вблизи приемной антенны, а для этого необходимо выполнить интегрирование по всей рассеивающей площадке. Для получения точного результата в результате интегрирования необходимо обеспечить шаг по поверхности в несколько раз меньше длины волны излучения [4, 5].

Для типичного пятна DPR необходимо будет построить модель поверхности размером  $25 \text{ км}^2$  с разрешением порядка  $0.2 \text{ см}$ , вычисление на такой по-

верхности двумерного интеграла занимает слишком много времени на современной технике. К тому же само моделирование поверхности такого размера является сложной задачей для моделей, опирающихся на уравнения гидродинамики.

Поэтому для оценки эффективности работы радиолокационной аппаратуры больше подходит хорошо известный подход, опирающийся на модель спектра волнения, например, [6]. В этом случае морская поверхность представляется в виде набора гармоник, амплитуда которых вычисляется по спектру волнения. При таком подходе смоделированная морская поверхность утрачивает ряд свойств, присущих реальной морской поверхности, но становится более удобной для счета и моделирование может быть проведено на за приемлемое время. Именно этот подход выбран для моделирования морской поверхности в данной работе.

Однако смоделированная одними лишь гармоническими функциями будет симметрична и иметь нулевое среднее. Из экспериментов известно, что настоящая морская поверхность имеет более острые вершины и пологие впадины, по сравнению с синусоидами. Поэтому в данной работе используется модель заостренной поверхности (CWM) [7].

Надо отметить, что для выбранного подхода качество моделирования зависит от используемого спектра волнения и от численной реализации процедуры моделирования. Был выбран спектр [8], учитывающий короткие волны, играющие особую роль в задачах рассеяния.

## 2. MODEL OF ROUGHNESS SEA SURFACE

Обычный способ моделирования морской поверхности по известному спектру волнения заключается в суммировании гармоник с детерминированными амплитудами и случайными фазами. Поле возвышений в этом случае  $\zeta$  представляется в виде

$$\zeta(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N A_n(\vec{k}_{nm}) \cos(\omega_n t + \vec{k}_n \vec{r}_0 + \psi_n),$$

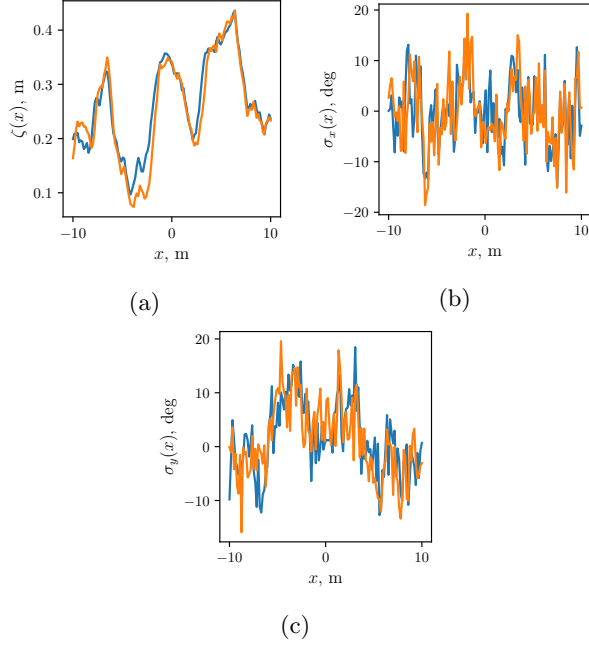


Fig. 1: (a) поле высот; (b) поле наклонов вдоль направления распространения волнения; (c) поле наклонов перпендикулярное направлению распространения волнения; Синей линией отмечена обычная поверхность, оранжевой – заостренная. Полностью развитое волнение  $\tilde{x} = 20170$ , скорость ветра  $U_{10} = 5$  м/с.

где  $\vec{\kappa}$  – двумерный волновой вектор,  $\vec{r}_0 = (x_0, y_0)$ ,  $\vec{r} = (x, y)$ ,  $\psi_{nm}$  – случайная фаза равномерно распределенная в интервале от 0 до  $2\pi$ ,

$A_n(\vec{\kappa}_n)$  – амплитуда гармоники с волновым вектором, вычисляемая по известному спектру волнения [8],  $\vec{\kappa}_n$  и временной частотой  $\omega_n(\kappa_{nm})$ .

Для перехода к модели заостренной поверхности необходимо ввести следующие преобразования координат [7], тем самым превращая моделирование независимыми гармоническими функциями в моделирование трохидами

$$\begin{aligned} x(\vec{r}, t) &= x_0 - \sum_{n=1}^N A_n(\vec{\kappa}_n) \frac{\vec{\kappa}_x}{\kappa} \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_n) \\ y(\vec{r}, t) &= y_0 - \sum_{n=1}^N A_n(\vec{\kappa}_n) \frac{\vec{\kappa}_y}{\kappa} \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_n) \end{aligned}$$

Сравнение основных характеристик обычной и заостренной морской поверхности приведено на рис. 1.

### 3. SCATTERING MODEL

Для точного вычисления УЭПР для всей морской поверхности слишком сложно и ресурсоемко, поскольку

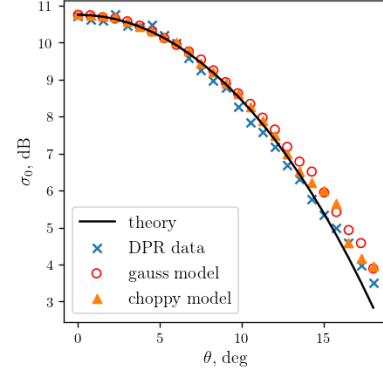


Fig. 2: Зависимость УЭПР  $\sigma_0$  от угла падения  $\theta$ ; черной линией обозначено теоретическое значение УЭПР, крестиками – значение, полученное по данным DPR, кружочками – значение, посчитанное по срезу обычной морской поверхности, треугольниками – значение, посчитанное по срезу заостренной морской поверхности

её точное вычисление требует счета двумерного интеграла по всей рассеивающей площадке.

Однако при малых углах падения, при которых работает DPR, основной вклад вносит механизм зеркального отражения, поэтому мы будем считать УЭПР только от точек, дающих максимальный вклад в отраженный сигнал.

Математически, мы заменяем интеграл по всей рассеивающей поверхности на сумму по выборке зеркальных точек. В случае достаточно большой выборки зеркальных точек для гауссовой морской поверхности будет мы получим распределение, совпадающее с теорией

$$\sigma_0 = \frac{|F(0)|^2}{\cos^4 \theta \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2(0)}} \exp \left\{ -\frac{\sigma_{xx}^2 \tan^2 \theta}{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2(0)} \right\}$$

Для валидации модели были получены данные спутника и произведено сравнение срезов трека с модельными данными в Ку-диапазоне (см. рис. 2).

Поскольку при моделировании учитывалось только зеркальное отражение и исключалось влияние брэгговского рассеяния, то это позволяет производить моделирование при углах отклонения антенны более чем  $12^\circ$ .

### 4. NUMERICAL EXPERIMENT WITH DPR IN KU-BAND

С помощью предложенной модели взволнованной морской поверхности был поставлен численный эксперимент и исследованы зависимости УЭПР от безразмер-

ного разгона волнения и направлении распространения волнения относительно движения спутника.

На рис. 4а представлена симуляция трека DPR при скорости приводного ветра  $U_{10} = 7$  м/с и меняющемся безразмерном разгоне волнения. Одномерные срезы панорамного изображения представлены на рис. 3б, 3с. Результат моделирования несложно интерпретировать: увеличение разгона «сглаживает» морскую поверхность, убирая коротковолновую составляющую спектра, поэтому при надирном зондировании УЭПР развитого волнения немного превосходит УЭПР развивающегося. Также, увеличивающийся разгон делает поверхность более пологой из-за увеличения длин доминантных волн, в результате для средних углов падения  $\theta > 15^\circ$  зеркальных площадок становится меньше и УЭПР уменьшается.

Более интересная зависимость представлена на рис. 3а, построенном при скорости приводного ветра  $U_{10} = 7$  м/с и меняющемся направлении распространения волнения  $\phi_0$  относительно движения спутника. Одномерные срезы панорамного изображения представлены на рис. 3б, 3с. На рис. 3б видно, что при малых углах наблюдения морская поверхность для радиолокатора выглядит почти одинаково вне зависимости от направления волнения, однако с увеличением угла наблюдения большую роль играет дисперсия наклонных вдоль направления зондирования  $\sigma_y y^2$ , а она принимает минимальные значения при  $\phi_0 = 0^\circ$  и максимальные при  $\phi_0 = 90^\circ$ .

## 5. CONCLUSION

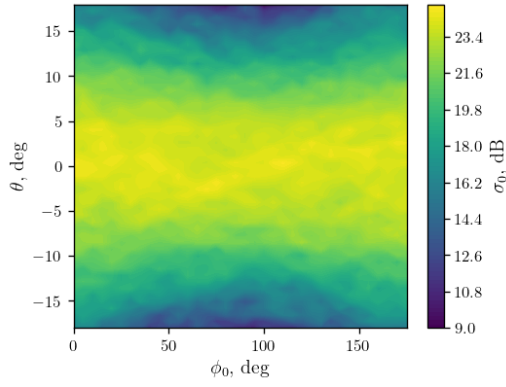
В данной работе было проведено моделирование схемы измерения DPR спутника GPM на взволнованной морской поверхности. При моделировании схемы измерения решалась задача обратного рассеяния электромагнитного излучения. Для её решения искалось отраженное от зеркальных точек поле вблизи приемной антенны, а затем моделировалось удельное сечение обратного рассеяния.

Морская поверхность представляла собой сумму независимых трохоид со случайными фазами, амплитуда которых вычислялась по известному спектру волнения. Для оценки работоспособности модели было проведено сравнение с данными радиолокатора DPR проекта Global Precipitation Measurements (GPM). В пределах углов отклонения антенны от надира  $\theta \leq \pm 12^\circ$  построенная модель хорошо согласуется с теорией и полученными экспериментальными данными.

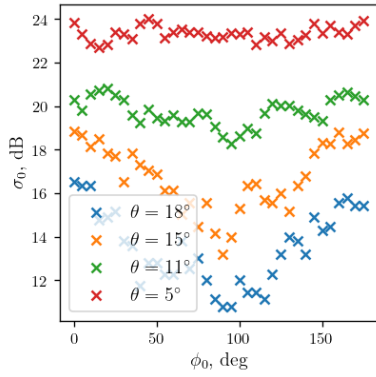
This work was funded by the Russian Science Foundation (Project RSF 20-17-00179). The DPR data are presented by the JAXA (JAXA Satellite Project Research (Non-Funded)PI N ER2GPN108).

## 6. REFERENCES

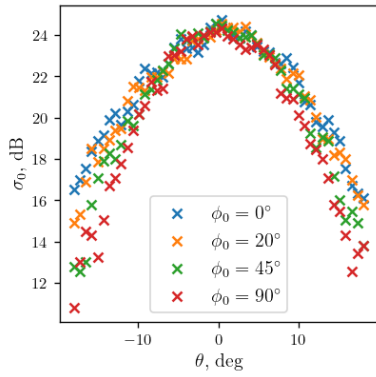
- [1] U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration National Weather Service, User manual and system documentation of WAVEWATCH III, 2016.
- [2] University of Technology, SWAN – user manual, 2006.
- [3] Gunter, S. Hasselman, and Jansen P., The WAM model cycle 4, University of Technology, 1992.
- [4] J. Toporkov and G. Brown, “Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 4, pp. 1616–1625, 2000.
- [5] J. Toporkov and G. Brown, “Numerical study of the extended kirchhoff approach and the lowest order small slope approximation for scattering from ocean-like surfaces: Doppler analysis,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 50, no. 4, pp. 417–425, 2002.
- [6] M. Longuet-Higgins, “The statistical analysis of a random, moving surface,” Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol. 249, pp. 321 – 387, 1957.
- [7] Frédéric Nougier, C-A Guérin, and Chapron Bertrand, “choppy wave” model for nonlinear gravity waves,” Journal of Geophysical Research ( JGR ) - Oceans (0148-0227) (American Geophysical Union), 2009-09 , Vol. 114 , N. C09012 , P. 1-16, vol. 114, 09 2009.
- [8] M. Ryabkova, V. Karaev, J. Guo, and Yu. Titchenko, “A Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface,” Journal of Geophysical Research: Oceans, vol. 124, no. 10, pp. 7104–7134, 2019.



(a)

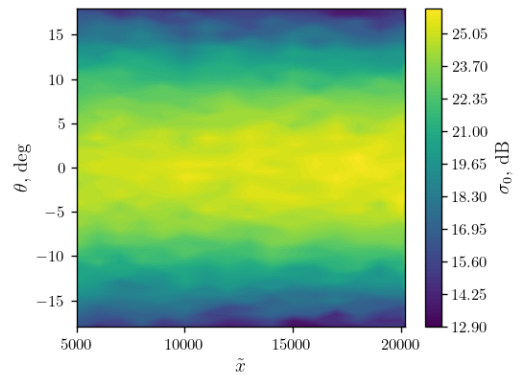


(b)

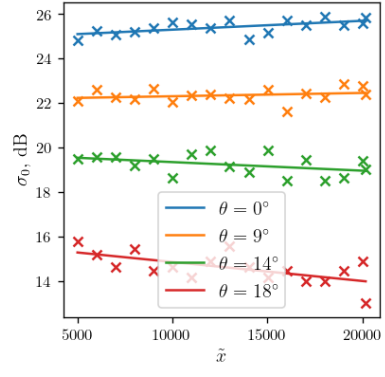


(c)

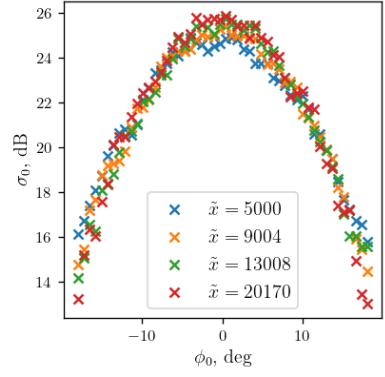
Fig. 3: Моделирование трека DPR на взволнованной морской поверхности при скорости ветра  $U_{10} = 7$  м/с.  
 (a) Панорамное изображение УЭПР в зависимости от направления распространения волнения  $\phi_0$  и угла отклонения антенны от надира  
 (b) Срез панорамного изображения вдоль фиксированного отклонения антенны  
 (c) Срез панорамного изображения вдоль фиксированного направления распространения волнения



(a)



(b)



(c)

Fig. 4: Моделирование трека DPR на взволнованной морской поверхности при скорости ветра  $U_{10} = 7$  м/с.  
 (a) Панорамное изображение УЭПР в зависимости от безразмерного разгона ветрового волнения  $\tilde{x}$  и угла отклонения антенны от надира  
 (b) Срез панорамного изображения вдоль фиксированного отклонения антенны  
 (c) Срез панорамного изображения вдоль фиксированного значения безразмерного разгона волнения