

Минобрнауки России федеральное государственное бюджетное научное
учреждение
«Федеральный Исследовательский Институт Прикладной Физики»

Влияние модели заостренной морской
поверхности на форму отраженного импульса и
эффективную площадь рассеяния

Понур К.А.
Караев В.Ю.

16 ноября 2020 г.

Двумерная модель поверхностного волнения

$$z(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \cos(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \psi_{nm}),$$

где ψ_{nm} – случайная фаза, равномерно распределенная в интервале от $-\pi$ до π ,
 $F_m(\kappa_n, \varphi_m)$ – азимутальное распределение для гармоники с волновым числом κ_n ,
 $\vec{\kappa}_n = (\kappa_{nx}, \kappa_{ny})$ – волновой вектор.

$$A_n(\kappa_n) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_{\Delta\kappa_n} 2S(\kappa) d\kappa},$$

где $S(\kappa)$ – спектральная плотность мощности,

$$F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) = \sqrt{\int_{\Delta\varphi_m} \Phi_\xi(\kappa_n, \varphi) d\varphi},$$

где $\Phi_\xi(\kappa_n, \varphi)$ – азимутальная плотность мощности

Теоретическая корреляционная функция

$$K(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\kappa) e^{i\kappa\rho} d\kappa$$

Корреляционная функция модельной поверхности

$$\tilde{K}(\rho) = \sum_{n=1}^N \frac{A_n^2}{2} \cos(\kappa\rho)$$

Критерий качества моделирования

$$\tilde{K}(\rho) \longrightarrow K(\rho)$$

$$z(\vec{r}, t) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \cos(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \psi_{nm}),$$

Определение проекции поля уклонов

$$\frac{\partial z(\vec{r}, t)}{\partial x} = \zeta_x = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot \kappa_{nx} \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \psi_{nm}),$$

$$\frac{\partial z(\vec{r}, t)}{\partial y} = \zeta_y = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot \kappa_{ny} \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \psi_{nm}),$$

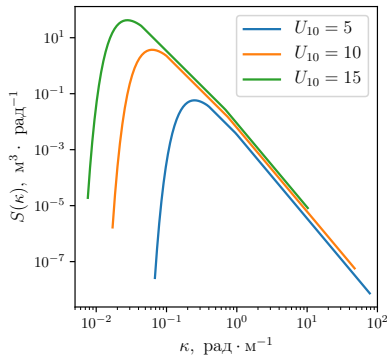
Определение поля полных уклонов

$$\zeta = \sqrt{\zeta_x^2 + \zeta_y^2}$$

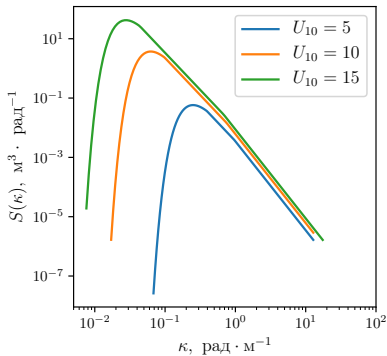
Определение поля орбитальных скоростей

$$\frac{\partial z(\vec{r}, t)}{\partial t} = v(\vec{r}, t) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot \omega_n \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \psi_{nm})$$

Спектр морского волнения



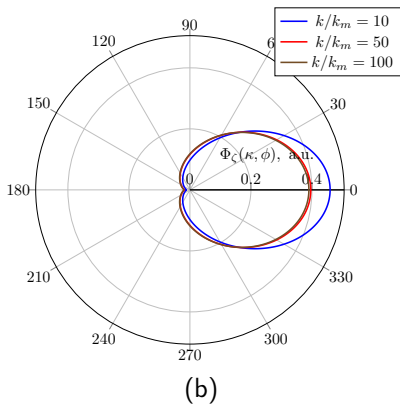
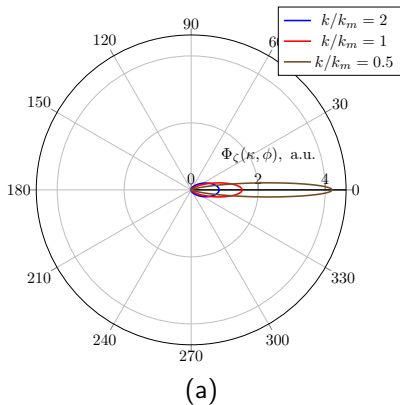
(a)



(b)

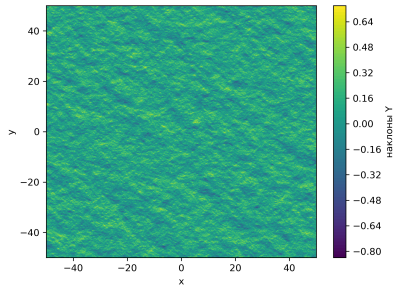
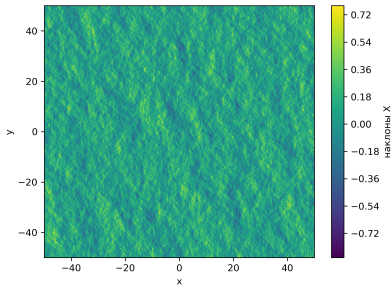
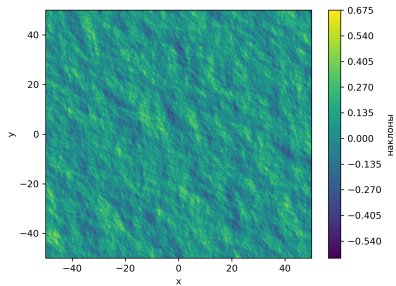
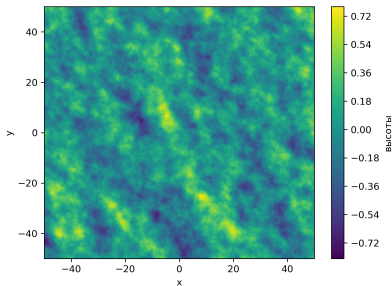
Спектр высот $S(\kappa)$ для разных скоростей ветра: синяя кривая - 5 м/с, красная кривая - 10 м/с, коричневая кривая - 15 м/с, (a) Ки-диапазон, (b) С-диапазон.

Азимутальное распределение



Азимутальная плотность мощности для разных соотношений $\frac{\kappa}{\kappa_m}$, где κ_m – координата пика спектра высот $S(\kappa)$

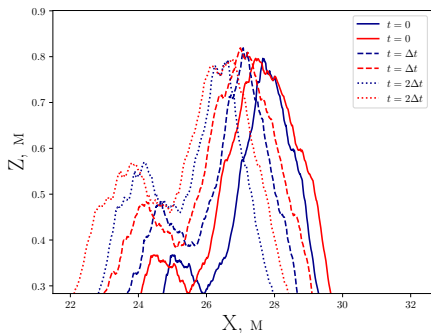
Изображение поверхностей



Модель заостренной поверхности

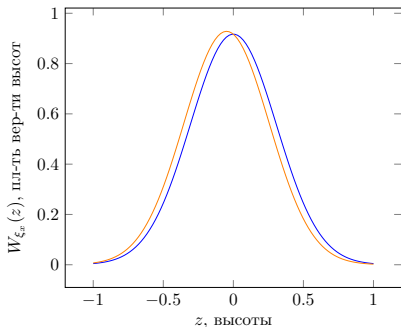
$$\begin{cases} z(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_m(\kappa_n, \varphi_m) \cos(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_{nm}), \\ x = x_0 - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_m(\kappa_n, \varphi_m) \sin \varphi_m \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_{nm}), \\ y = y_0 - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_m(\kappa_n, \varphi_m) \sin \varphi_m \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_{nm}), \end{cases}$$

где $\vec{\kappa}$ – двумерный волновой вектор, $\vec{r}_0 = (x_0, y_0)$, $\vec{r} = (x, y)$



Эволюция гребня морской поверхности. Красным цветом обозначена линейная поверхность, синим – заостренная. Разной штриховкой обозначены различные моменты времени

Характеристики заостренной поверхности

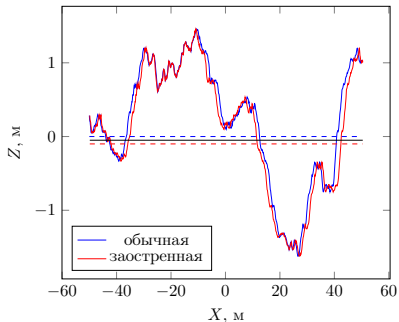


Плотность вероятности высот морской поверхности. Синяя линия – линейная поверхность, оранжевая – заостренная. Моделирование проводилось при скорости ветра 10 м/с и полностью развитого волнения.

$$\tilde{W}_\xi(z) = W_\xi(z) \left(1 + \frac{\Sigma_1}{\sigma_0^2} - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2} z - \frac{\Sigma_1}{\sigma_0^4} z^2 \right),$$

где $W_\xi(z)$ – гауссова плотность вероятности высот линейной поверхности, z – высоты морской поверхности.

Характеристики заостренной поверхности

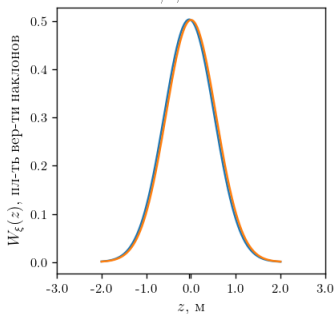


На рисунке показаны одномерные срезы двумерных поверхностей. Линейная поверхность – синяя линия, заостренная – красная линия, пунктиром обозначен средний уровень соответствующей поверхности. Черной линией обозначен медианный уровень заостренной поверхности.

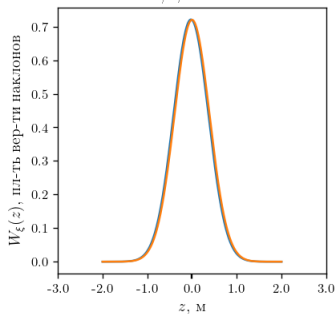
$$\begin{aligned}\langle z \rangle &= -\sigma_1^2, \\ \langle z^2 \rangle &= \sigma_0^2 - 2\Sigma_1, \text{ где} \\ \Sigma_1 &= \sigma_{111}^4 - \sigma_{201}^2 \sigma_{021}^2, \\ \sigma_{\alpha\beta\gamma}^2 &= \int \frac{\kappa_x^\alpha \kappa_y^\beta}{\kappa^\gamma} S(\vec{\kappa}) d\vec{\kappa}, \\ \sigma_n^2 &= \int \kappa^n S(\vec{\kappa}) d\vec{\kappa}\end{aligned}$$

В случае поля высот можно получить аналитические выражения, связывающие статистические характеристики заостренной и линейных поверхностей.

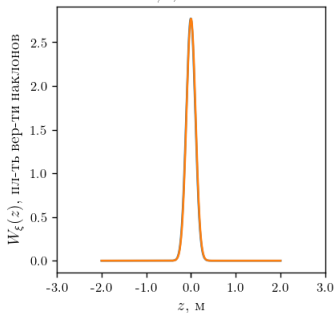
$U = 15 \text{ м/с}, z^* = -0.042 \text{ м}$



$U = 10 \text{ м/с}, z^* = -0.026 \text{ м}$



$U = 5 \text{ м/с}, z^* = -0.006 \text{ м}$



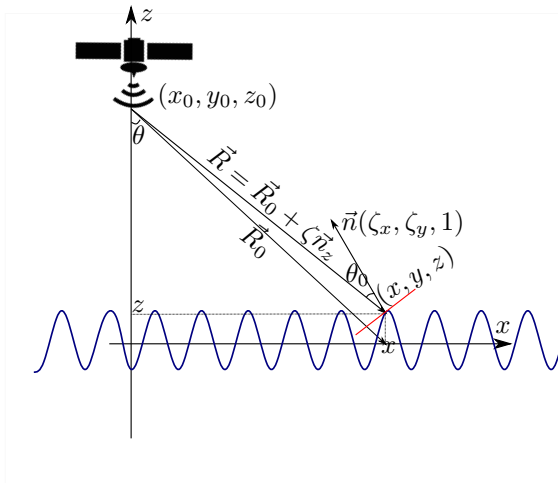
Сравнение характеристик
заостренной поверхности при
различных скоростях ветра

$U_{10}, \text{ м/с}$	5	10	15
Среднее, см	-1	-4.8	-8.2
Медиана, см	-0.6	-3	-4.2
H_s , см	57	221	317

U_{10} – скорость ветра на высоте 10

метров над поверхностью H_s –
высота значительного волнения

Геометрия задачи для взволнованной поверхности



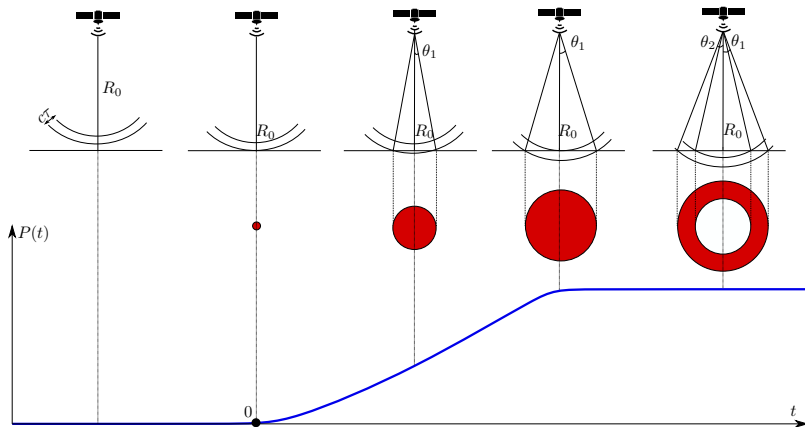
(x_0, y_0, z_0) – координаты радиовысотомера

(x, y, z) – координата точки на поверхности

ζ_x, ζ_y – уклоны поверхности по осям x и y

$$\cos \theta_0 = \frac{\vec{R}\vec{n}}{|\vec{R}||\vec{n}|} - \text{локальный угол падения}$$

Форма импульса отраженного от плоской поверхности



$$E = \sum_{i=1}^M \frac{E_0}{R_i^2} \exp\{-2i\vec{k}\vec{R}_i\} \sigma_i^o G^2(\theta_i), \text{ где}$$

R_i – радиус-вектор от радиовысотомера к рассеивающей площадке,
 $G(\theta)$ – диаграмма направленности антенны,
 σ^o – сечение обратного рассеяния площадки.

Формула Брауна

Формула Брауна аналитически описывает форму отраженного импульса при малых углах падения для модели гауссовской случайной поверхности

$$P(t) = Ae^{-v}(1 + \operatorname{erf}(u)), \text{ где}$$

$$A = A_0 \exp\left\{\frac{-4}{\gamma} \sin^2 \xi\right\}, \quad u = \frac{t - \alpha\sigma_c^2}{\sqrt{2}\sigma_c}, \quad v = \alpha\left(t - \frac{\alpha}{2}\sigma_c^2\right)$$

в которых

$$\alpha = \delta - \frac{\beta^2}{4} = \frac{4}{\gamma} \cdot \frac{c}{h} \left(\cos 2\xi - \frac{\sin^2 2\xi}{\gamma} \right),$$

$$\gamma = \frac{\ln 2}{2} \sin^2 \theta_{-3dB}, \quad \sigma_c^2 = \sigma_p^2 + \frac{\sigma^2}{c^2},$$

$\xi \ll 1$ – малое отклонение антенны от надира,

θ_{-3dB} – ширина диаграммы направленности антенны на уровне $-3dB$,

h – высота радиолокатора над поверхностью земли,

c – скорость света в вакууме,

σ^2 – дисперсия высот взволнованной морской поверхности.

Основные параметры импульса

$$P(t) = A \exp\left\{S_T\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right\} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{t - \tau}{\sigma_L}\right), \text{ где}$$

S_T – коэффициент наклона заднего фронта импульса,

τ – эпоха,

σ_L – ширина переднего фронта импульса,

σ_0 – удельное сечение обратного рассеяния,

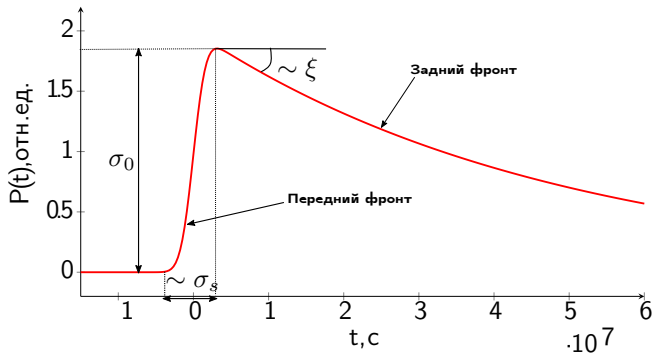


Рис.: Качественная форма импульса с обозначением основных параметров.

Удельная эффективная площадь рассеяния

Для линейной морской поверхности известно аналитическое выражение для УЭПР

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

θ – угол падения,

$F(0)$ – коэффициент Френеля,

$\sigma_{xx}^2, \sigma_{yy}^2$ – дисперсии наклонов,

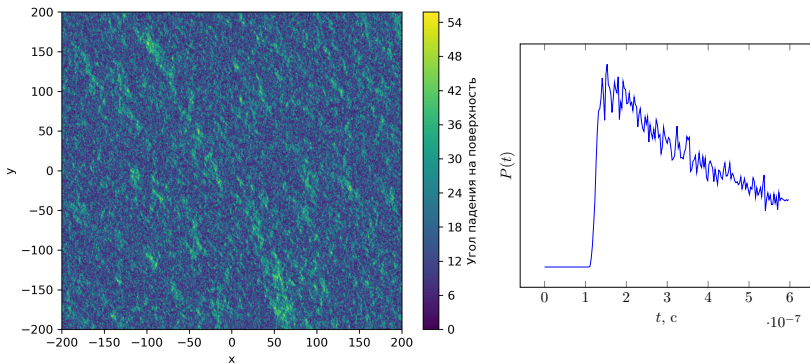
$\sigma_{xy}^2 = \sigma_{yx}^2$ – взаимная корреляция наклонов

Для заостренной морской поверхности УЭПР будем считать по определению

$$\sigma_0 = 4\pi \sum_{i=1}^M R_i^2 \frac{E_{i\text{отр}}^2}{E_{i\text{пад}}^2},$$

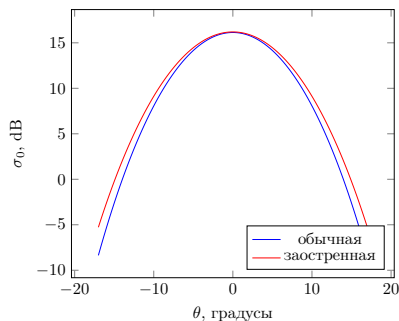
R_i – расстояние до рассеивающей площадки

Моделирование отраженного импульса

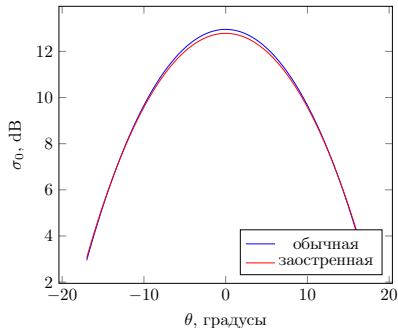


Вычисление локального угла падения для радиовысотомера, находящегося в точке с координатами $(0, 0)$ на высоте 1000 км над уровнем моря. Точки, градусная мера которых меньше $\theta < 1^\circ$ в дальнейшем будут считаться зеркальными и они будут участвовать в формировании отраженного импульса.

Сечение рассеяния заостренной поверхности



(a)

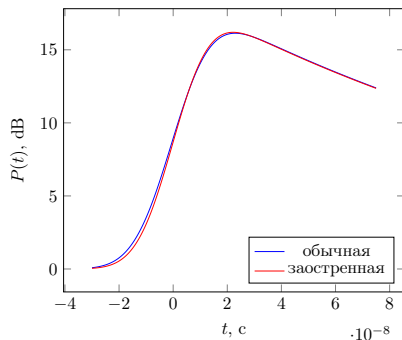


(b)

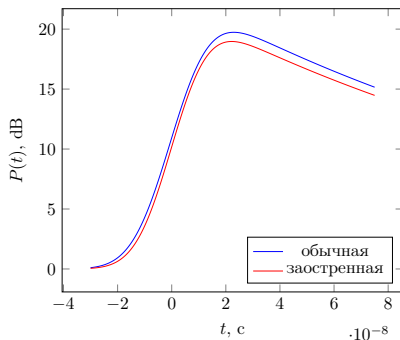
Рис.: УЭПР для разных типов поверхностей. Синей линией обозначена УЭПР для линейной поверхности, аналитически посчитанная по ранее приведенным формулам, красной линией – смоделированная УЭПР заостренной поверхности

(a) скорость ветра $U_{10} = 3$ м/с, (b) скорость ветра $U_{10} = 10$ м/с

Отраженный импульс от заостренной поверхности



(a)

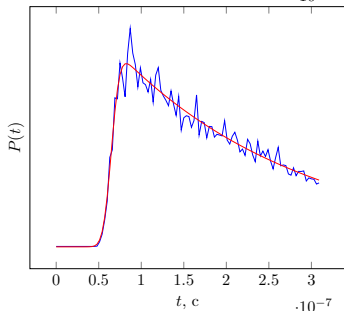
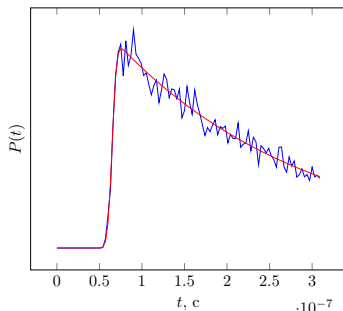
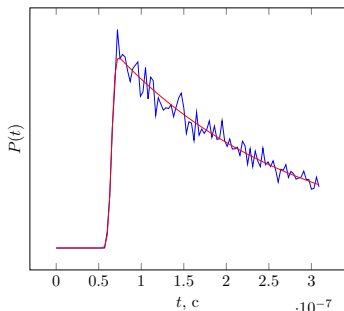


(b)

Рис.: Форма отраженного импульса для разных типов поверхностей: синим цветом обозначена форма импульса для линейной поверхности, описываемая формулой Брауна, красной линией – смоделированная форма импульса для заостренной поверхности.

Модельный импульс представляет собой кривую, усредненную по нескольким реализациям заостренных поверхностей
(a) скорость ветра $U_{10} = 3$ м/с, (b) скорость ветра $U_{10} = 10$ м/с

Ретрекинг модельных импульсов



$H_s, \text{ м}$	0.83	1.36	5.14
$\tilde{H}_s, \text{ м}$	0.65	1.49	4.9

Высота значительного волнения H_s – такая высота, больше которой в данном режиме волнения может оказаться не более $\frac{1}{3}$ всех волн.
 H_s – известна из моделирования поверхности
 \tilde{H}_s – получена из численного эксперимента

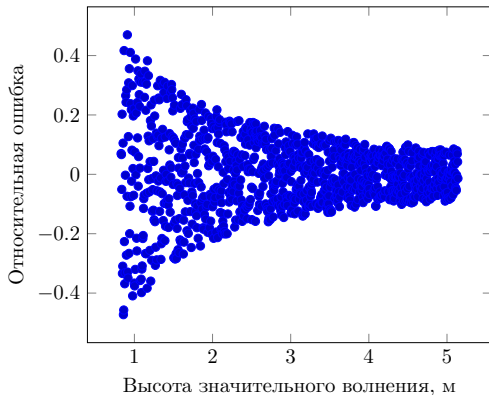


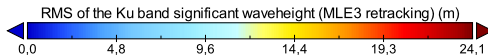
Рис.: Относительная ошибка восстановления высоты значительного волнения для известного из моделирования высоты значительного волнения

Абсолютная ошибка определения высоты значительного волнения приблизительно равна

$$\delta h = \frac{\tau}{2} c, \quad \tau - \text{длительность импульса}$$

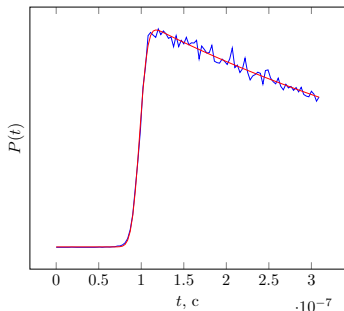
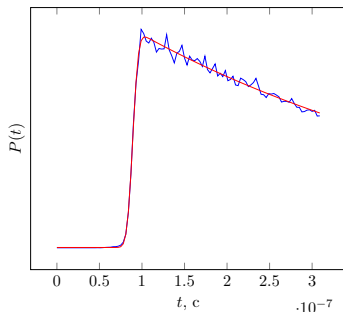
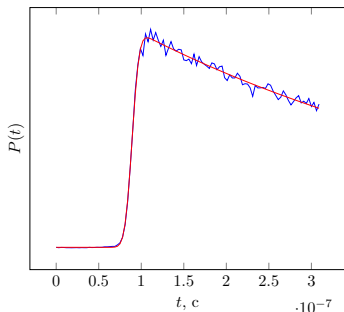
Ретрекинг импульсов с Jason-3

RMS of the Ku band significant waveheight (MLE3 retracking)



Data Min = 0,0, Max = 24,1

Ретрекинг импульсов с Jason-3



H_s , м	0.937	0.699	1.075
\tilde{H}_s , м	0.931	0.703	1.081

H_s – высота, полученная
NASA

\tilde{H}_s – высота, полученная
предложенным методом
Усредненная по 100

импульсам относительная
погрешность измерения
составляет $< 5\%$.

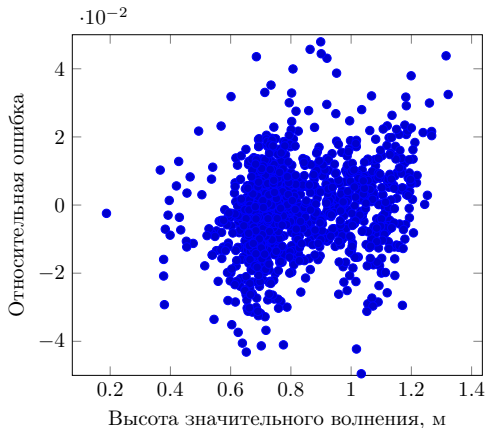


Рис.: Сравнение результатов восстановления высоты значительного волнения по данным спутника Jason-3 для штатного алгоритма обработки и для предложенного метода

- 1 построена модель морской поверхности по известному спектру волнения
- 2 предложены способы приближения модельной поверхности к реальной морской поверхности
- 3 проведено моделирование схемы измерения радиовысотомера
- 4 проведен численный эксперимент с радиовысотомером

Применение модели:

- 1 тестирование и разработка алгоритмов восстановления океанографической информации
- 2 оценка возможностей новых радиолокаторов

Спасибо за внимание!

Презентация подготовлена в издательской
системе LaTeX с использованием пакетов
PGF/TikZ и Beamer