

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

Доплеровский спектр радиолокационного
СВЧ-сигнала обратного рассеяния:
моделирование эксперимента на реке

Понур К.А.
Караев В.Ю.
Рябкова М.С.
Титченко Ю.А.

16 ноября 2021 г.

Двумерная модель поверхностного волнения

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

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, \vec{V}_s – вектор скорости течения.

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

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

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

Определение проекции поля уклонов

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

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

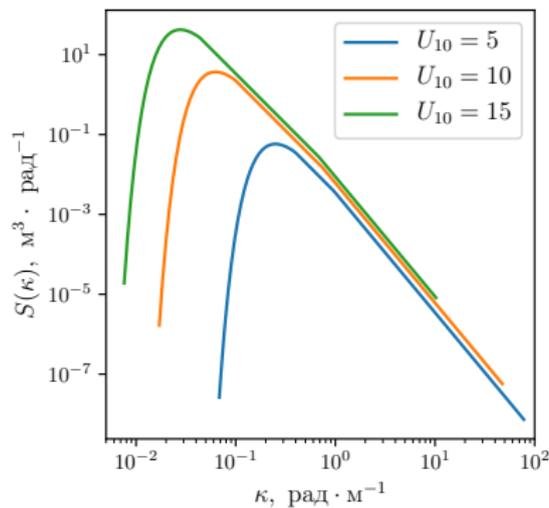
Определение вектора орбитальных скоростей $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$

$$v_x(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot \omega_n \cdot \frac{\kappa_{nx}}{|\kappa_n|} \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \cos \left(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \vec{V}_s \vec{\kappa}_n t + \psi_{nm} \right),$$

$$v_y(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot \omega_n \cdot \frac{\kappa_{ny}}{|\kappa_n|} \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \cos \left(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \vec{V}_s \vec{\kappa}_n t + \psi_{nm} \right),$$

$$v_z(\vec{r}, t) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot \omega_n \cdot F_{nm}(\kappa_n, \varphi_m) \sin \left(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r} + \vec{V}_s \vec{\kappa}_n t + \psi_{nm} \right)$$

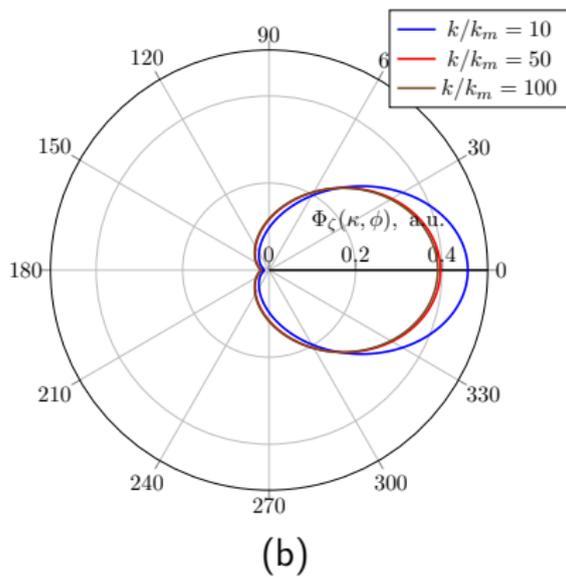
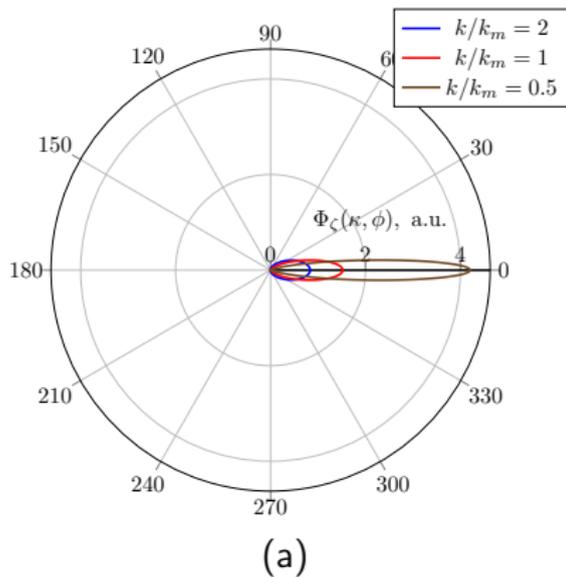
Спектр морского волнения



(a)

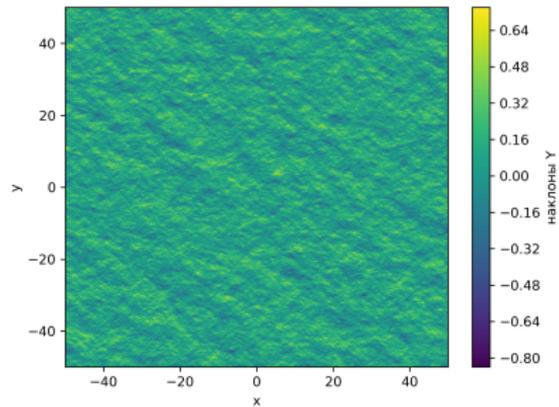
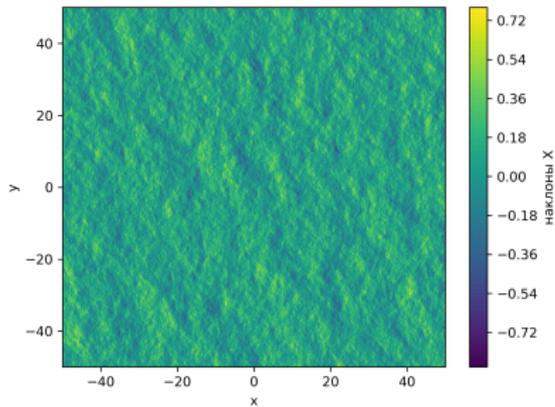
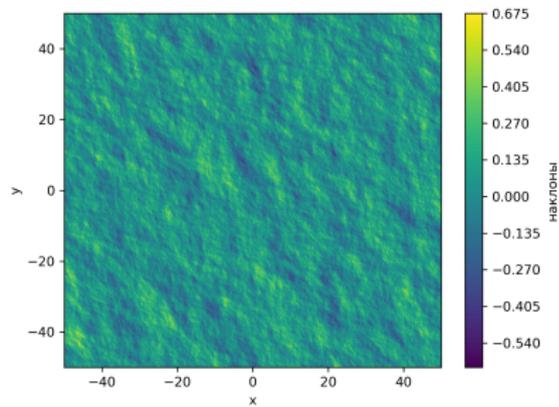
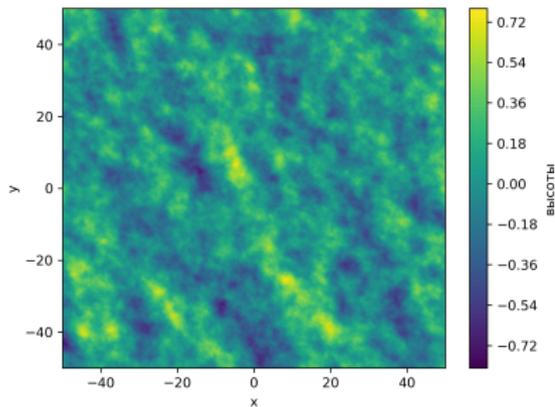
Спектр высот $S(\kappa)$ для разных скоростей ветра: синяя кривая - 5 м/с, красная кривая - 10 м/с, коричневая кривая - 15 м/с, Ки-диапазон.

Азимутальное распределение



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

Изображение поверхностей



1 Изменяется скорость ветра

$$U_{10eff} = \sqrt{(U_{10} \cos \varphi_w - V_s \cos \varphi_s)^2 + (U_{10} \sin \varphi_w - V_s \sin \varphi_s)^2},$$

где U_{10} - скорость ветра, φ_w - направление ветра, V_s - скорость течения, φ_s - направление течения

$$\varphi_{eff} = \arctan \frac{U_{10effX}}{U_{10effY}}$$

2 Изменяется дисперсионное соотношение

$$\tilde{\omega}(\kappa) = \omega(\kappa) + \vec{\kappa} \vec{V}_s,$$

$\omega(\kappa)$ - дисперсионное соотношение без течения

Модель доплеровского спектра

$$S_d \sim \sum_i^M \frac{\tilde{2}v_{ri}}{\lambda} G(\varphi_i, \theta_i),$$

где суммирование подразумевается по всем зеркальным отражающим точкам поверхности,

S_d - доплеровский спектр,

\tilde{v}_r - проекция орбитальной скорости на радиальное направление,

λ - длина волны излучения,

G - диаграмма направленности антенны,

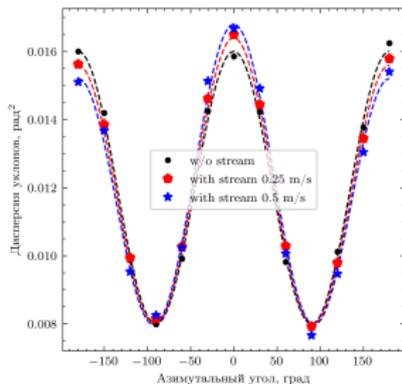
φ - азимутальный угол,

θ - угол элевации

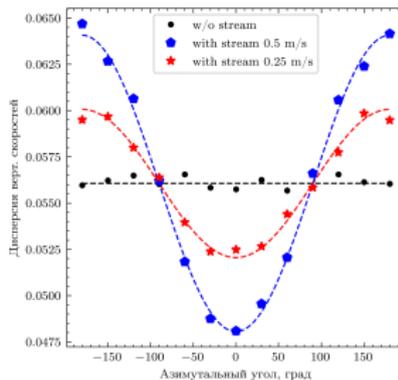
Схема измерения:

- 1 Азимутальный угол φ на графиках соответствует изменению направления ветра от -180° до 180°
- 2 Направления течения постоянно и равно $\varphi_s = -180^\circ$

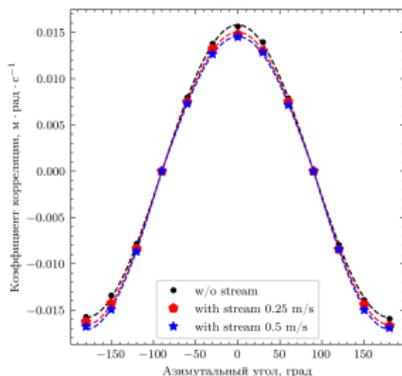
Основные статистические моменты



(a)



(b)



(c)

Зависимость (a) дисперсии уклонов вдоль оси X σ_{xx}^2 , (b) дисперсии вертикальных скоростей σ_{tt}^2 (b) и (c) коэффициента корреляции K_{xt} (c) от направления ветра. Пунктирной линией отмечены теоретические значения полученные по модели Рябковой (см. [1]), точками отмечены результаты численного моделирования

Параметры моделирования

- 1 Скорость ветра $U_{10} = 5$ м/с
- 2 Безразмерный разгон $\tilde{x} = 4000$
- 3 Скорость течения $V_s = 0, 0.25, 0.5$ м/с
- 4 Угол падения 0°

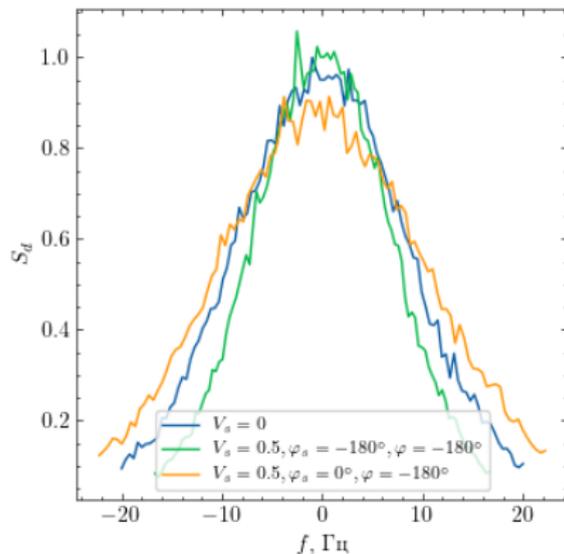
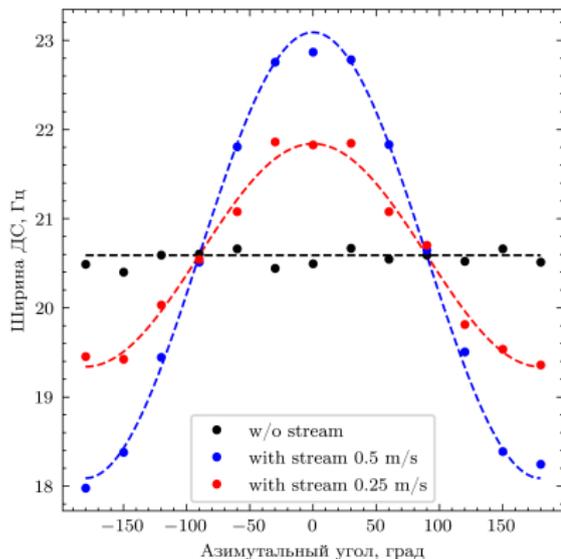
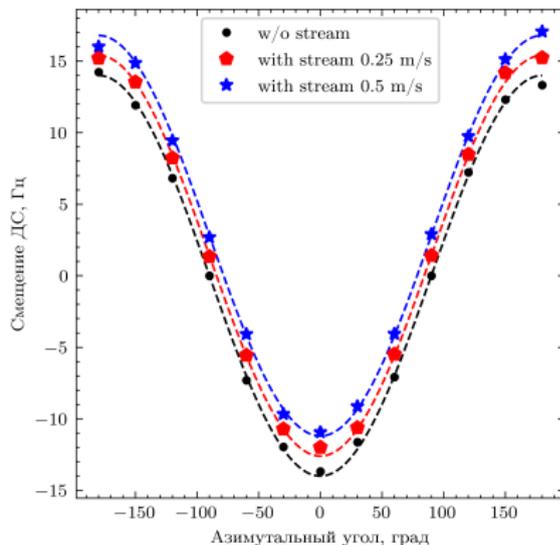


Рис.: Пример получаемого доплеровского спектра для скорости ветра $U = 5$ м/с, $\varphi = -180^\circ$ $\tilde{x} = 4000$ и направлениях ветра $\varphi_s = -180^\circ$, $\varphi_s = 0^\circ$

Результаты моделирования



(a)



(b)

Рис.: Зависимость (а) ширины ДС и (б) смещения ДС от направления ветра. Точками отмечены результаты численного моделирования, пунктирными линиями теоретически значения из работы Рябковой (см. [1])

- 1 Проведено моделирование схемы измерения доплеровского радиолокатора с учетом течения
- 2 Получены зависимости основных статистических характеристик: $\sigma_{xx}^2, \sigma_{tt}^2, K_{xt}$, влияющих на доплеровский спектр от скорости и направления течения
- 3 Получены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от скорости и направления течения
- 4 Сравнение результатов численного моделирования с теоретической моделью подтвердило достоверность моделирования

[1] "К вопросу о влиянии речного течения на доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала при малых углах падения М.С. Рябкова и др. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 175-187

Спасибо за внимание!