

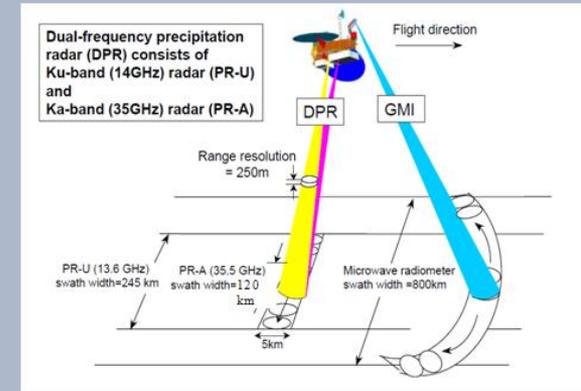


Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород

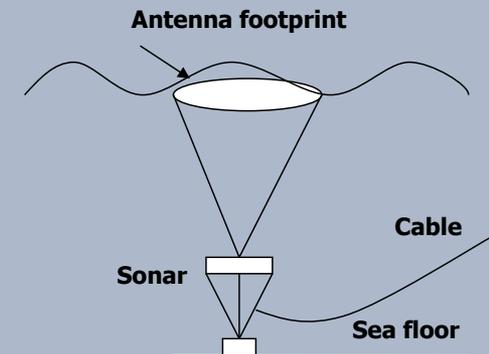
Использование доплеровского спектра отраженного излучения для восстановления параметров волнения и направления ветра

Титченко Ю.А., Караев В.Ю.

- В настоящее время существует и параллельно развиваются несколько подходов измерения параметров водной поверхности из космоса. Ставшие уже традиционными спутниковые альтиметры позволяют напрямую измерять высоту значительных волн. Не менее привычные спутниковые скатерометры с помощью регрессии могут оценивать скорость и направление ветра. Вместе с развитием моделей волнового климата скатерометры и альтиметры существенно улучшили безопасность судоходства и жизнедеятельности человека в прибрежных районах.
- Для развития данной области сейчас важным является разработка подходов измерения дополнительных параметров водной поверхности, помимо высоты волн.

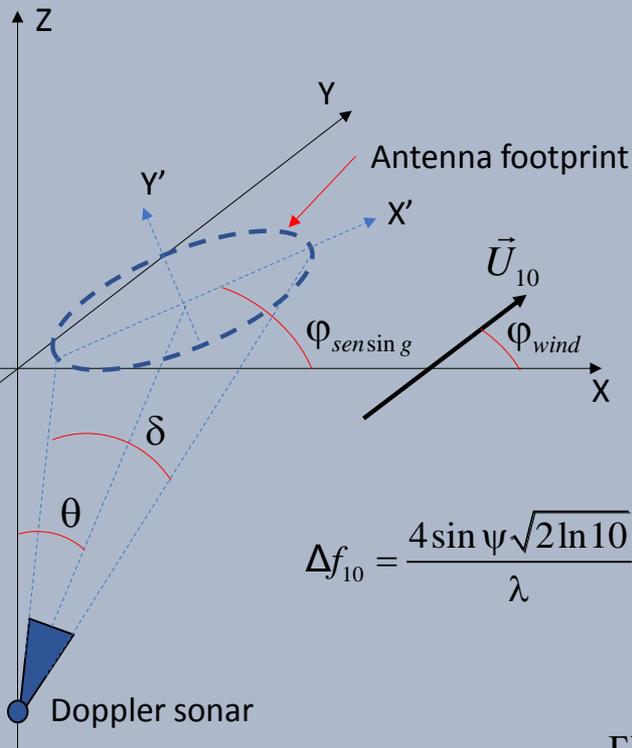


- Предыдущие исследования показывают, что одним из востребованных параметров является дисперсия уклонов, которая определяет площадь соприкосновения океана и атмосферы, а также позволяет точнее определять скорость ветра.
- Ряд работ предлагает измерять дисперсию уклонов с помощью существующих спутниковых систем: моностатического радара DPR, бистатических радар систем GNSS-R, оптических спутников.
- Однако наземная инфраструктура для проверки измерений дисперсии уклонов пока не создана. Традиционно для задач наземного измерения параметров водной поверхности используются буи. Но их габариты ограничивают возможности измерения коротковолновой части спектра волнения, вносящей наибольший вклад в дисперсию уклонов, измеряемую спутниковыми системами. Причем даже если бы была возможность измерения любых поверхностных волн любой длины, на сегодняшний день нет единого подхода определения дисперсии уклонов, влияющей на рассеяние и измеряемых спутниковыми системами.
- Одним из вариантов решения задачи контроля спутниковых измерений является расположения измерительной аппаратуры в нижнем полупространстве (под водой) при сохранении «спутниковых» методов решения обратной задачи.



Рассеяние волн взволнованной водной поверхностью

Схема измерений



$$\Delta f_{10} = \frac{4 \sin \psi \sqrt{2 \ln 10}}{\lambda} \sigma_{tt}^2$$

,где

$$\sigma_{x'x'}^2 = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial x'}, \frac{\partial \zeta}{\partial x'} \right\rangle, \quad \sigma_{y'y'}^2 = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial y'}, \frac{\partial \zeta}{\partial y'} \right\rangle, \quad \sigma_{tt}^2 = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\rangle$$

$$K_{x't} = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial x'}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\rangle, \quad K_{y't} = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial y'}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\rangle, \quad K_{x'y'} = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial x'}, \frac{\partial \zeta}{\partial y'} \right\rangle,$$

Используем метод касательной плоскости

Смещение доплеровского спектра (ДС):

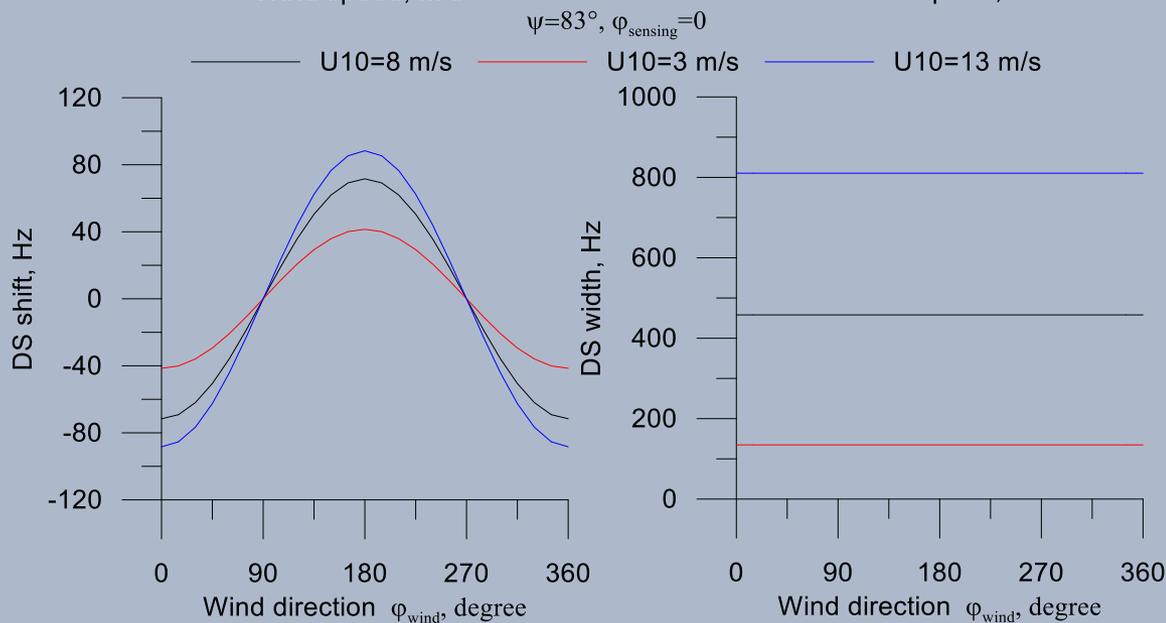
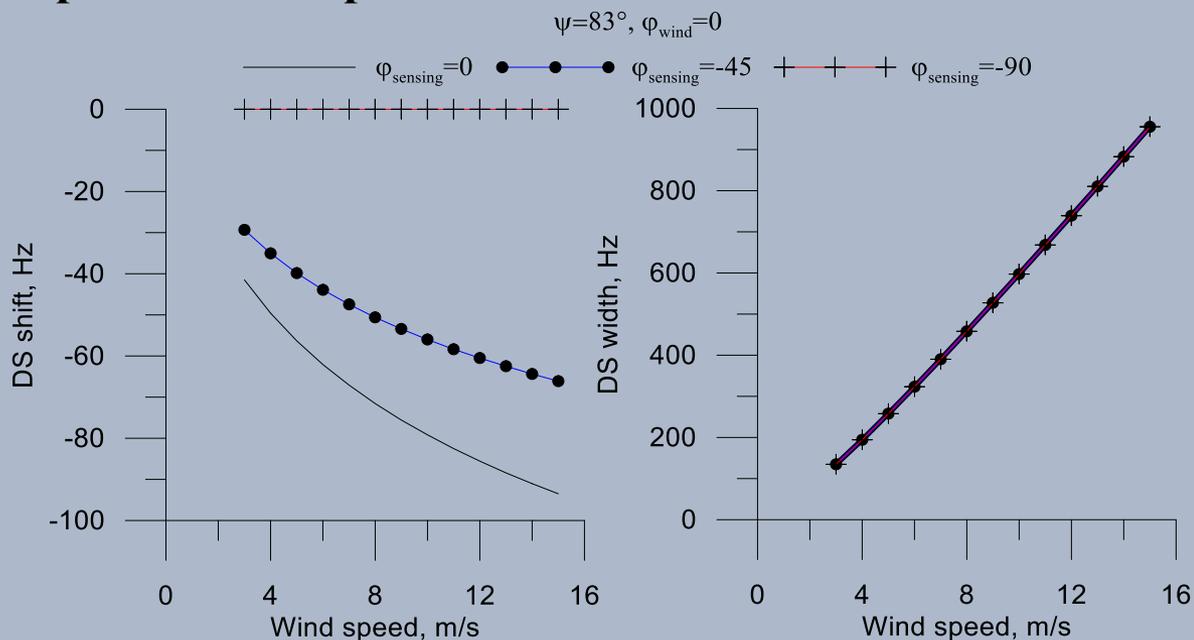
$$f_{sh} = \frac{-2}{\lambda} \cos \psi \frac{K_{x't} \left(\frac{\delta^2}{11,04 (\sin \psi)^2} + \sigma_{y'y'}^2 \right) + K_{y't} K_{x'y'}}{\left(\frac{\delta^2}{11,04 (\sin \psi)^2} + \sigma_{y'y'}^2 \right) \left(\sigma_{x'x'}^2 + \frac{\delta^2}{11,04} \right) - K_{x'y'}^2}$$

Ширина ДС:

$$\sqrt{\frac{K_{x't}^2 \left(\frac{\delta^2}{11,04 \sin^2 \psi} + \sigma_{y'y'}^2 \right) + K_{y't}^2 \left(\sigma_{x'x'}^2 + \frac{\delta^2}{11,04} \right) + 2 K_{x'y'} K_{x't} K_{y't}}{\left(\frac{\delta^2}{11,04 (\sin \psi)^2} + \sigma_{y'y'}^2 \right) \left(\sigma_{x'x'}^2 + \frac{\delta^2}{11,04} \right) - K_{x'y'}^2}}$$

ζ - Возвышения крупномасштабной поверхности

Зависимости ширины и смещения ДС от скорости и направления ветра



- Смещение ДС перпендикулярной к ветру антенны нечувствительно к скорости ветра и равняется 0. Этот эффект является критерием при определении направления антенны перпендикулярно к ветру.
- Ширина ДС не зависит от направления зондирования и ветра и полностью определяется скоростью ветра и углом падения.
- Смещение ДС показывает сильную азимутальную зависимость, однозначно показывая направление ветра.
- Азимутальная зависимость смещения ДС близка к гармонической, что позволяет полностью определить зависимость из трех измерений смещения ДС при разных углах зондирования.

Параметры волнения

Вторые статистические моменты крупномасштабной поверхности можно рассчитать из спектра волнения:

$$\sigma_{xx}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_x^2 S(\kappa, \phi) d\kappa d\phi$$

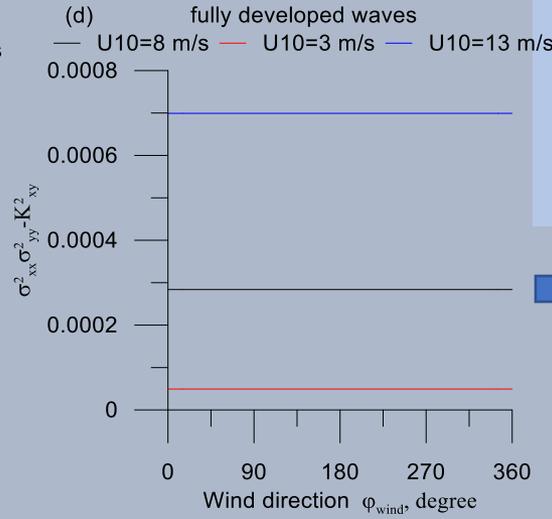
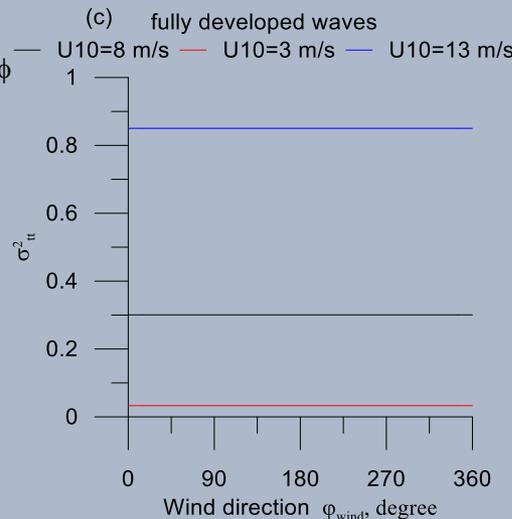
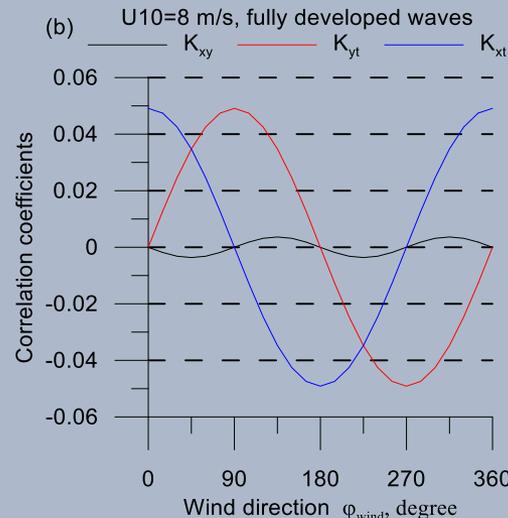
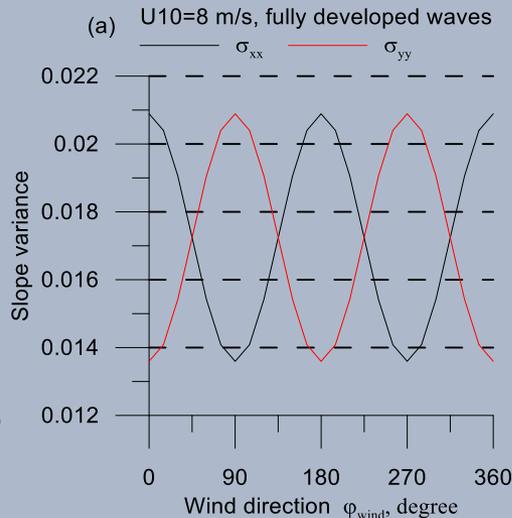
$$\sigma_{yy}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_y^2 S(\kappa, \phi) d\kappa d\phi$$

$$\sigma_{tt}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \omega^2 S(\kappa, \phi) d\kappa d\phi$$

$$K_{xt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_x \omega S(\kappa, \phi) d\kappa d\phi$$

$$K_{yt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_y \omega S(\kappa, \phi) d\kappa d\phi$$

$$K_{xy} = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\kappa_b} \kappa_x \kappa_y S(\kappa, \phi) d\kappa d\phi$$



Мы представляем параметры волнения через азимутальные углы зондирования и направления ветра:

$$\sigma_{y'y'}^2 = 0.5\sigma_{\Sigma}^2 - 0.5\sigma_{\Delta}^2 \cos(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})$$

$$\sigma_{x'x'}^2 = 0.5\sigma_{\Sigma}^2 + 0.5\sigma_{\Delta}^2 \cos(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})$$

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{x'x'}^2 + \sigma_{y'y'}^2$$

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{\sigma_{x'x'}^2 - \sigma_{y'y'}^2}{\cos(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})}$$

$$K_{x't} = K_{t0} \cos(\varphi_{wind} - \varphi_{sensin g})$$

$$K_{y't} = K_{t0} \sin(\varphi_{wind} - \varphi_{sensin g})$$

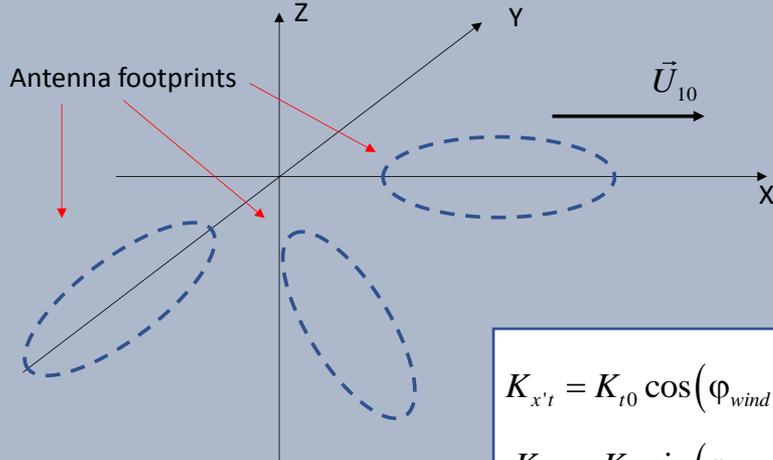
$$K_{x'y'} = K_{x'y'0} \sin(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})$$

$$\sigma_{x'x'}^2 \sigma_{y'y'}^2 - K_{x'y'}^2 = const(\varphi)$$

$$K_{x'y'0} = -0.5\sigma_{\Delta}^2$$

Получим, что для нахождения 6 неизвестных параметров в таком представлении достаточно найти 5.

Рассмотрим схему измерений с тремя гидролокаторами



$$K_{x't} = K_{t0} \cos(\varphi_{wind} - \varphi_{sensin g})$$

$$K_{y't} = K_{t0} \sin(\varphi_{wind} - \varphi_{sensin g})$$

$$\sigma_{y'y'}^2 = 0.5\sigma_{\Sigma} - 0.5\sigma_{\Delta} \cos(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})$$

$$\sigma_{x'x'}^2 = 0.5\sigma_{\Sigma} + 0.5\sigma_{\Delta} \cos(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})$$

$$K_{x'y'0} = -0.5\sigma_{\Delta}$$

$$K_{x'y'} = K_{x'y'0} \sin(2\varphi_{wind} - 2\varphi_{sensin g})$$

$$\sigma_{tt}^2 = \lambda^2 \frac{\frac{\Delta f_{10}^2(-90^\circ)\Delta f_{10}^2(0^\circ)}{f_{sh}^2(0^\circ)(4\sqrt{\ln 10})^2} - \frac{\Delta f_{10}^2(-90^\circ)\delta^2}{22,08} - \left(\frac{\Delta f_{10}^2(0^\circ)}{f_{sh}(0^\circ)(4\sqrt{\ln 10})}\right)^2}{(4\sqrt{\ln 10})^2 \sin^2 \psi \left(\frac{\Delta f_{10}^2(-90^\circ) - \Delta f_{10}^2(0^\circ)}{f_{sh}^2(0^\circ)8\ln 10} - \frac{\delta^2}{11,04}\right)}$$

$$\leftarrow K_{t0} = \frac{-2\cos\psi}{\lambda f_{sh}(0^\circ)} \left(\sigma_{tt}^2 - \frac{(\lambda\Delta f_{10}(0^\circ))^2}{32\ln 10(\sin\psi)^2} \right)$$

$$\sigma_{\Sigma} = 2B - \frac{2\delta^2}{11,04}$$

$$\sigma_{\Delta} = 2Z - 2B$$

$$B = \frac{Z^2 \left(2 \left(\frac{\lambda\Delta f_{10}(-45^\circ)}{8\sin\psi\sqrt{\ln 10}} \right)^2 - \sigma_{tt}^2 \right) - \left(\frac{f_{sh}(0^\circ)\lambda Z}{2\cos\psi} \right)^2 \left(\frac{\delta^2}{22,08(\tan\psi)^2} - Z \right)}{\left(\frac{\delta^2}{11,04(\tan\psi)^2} + 2Z \right) \left(2 \left(\frac{\lambda\Delta f_{10}(-45^\circ)}{8\sin\psi\sqrt{\ln 10}} \right)^2 - \sigma_{tt}^2 \right) + 2 \left(\frac{-f_{sh}(0^\circ)\lambda Z}{2\cos\psi} \right)^2}$$

$$Z = \left(\frac{2\cos\psi}{f_{sh}(0^\circ)\lambda} \right)^2 \left(\sigma_{tt}^2 - 2 \left(\frac{\lambda\Delta f_{10}(0^\circ)}{8\sin\psi\sqrt{\ln 10}} \right)^2 \right)$$

- Для каждого гидролокатора ширина и смещение ДС может быть измерена. В результате мы получим систему из 6 уравнений и 5 неизвестных.
- Решая эту систему аналитически мы получим выражения для последовательного расчёта всех параметров волнения.

Заключение

- В результате работы проведено теоретическое исследование характеристик ДС от скорости и направления ветра. Представлены зависимости параметров поверхностного волнения от направления и скорости ветра.
- Параметры волнения представляются в зависимости от азимутального направления зондирования и направление ветра. Такое представление параметров волнения позволило уменьшить число неизвестных параметров входящих в систему уравнений для решения обратной задачи.
- Решена обратная задача по восстановлению всех неизвестных параметров волнения по измерениям ширины и смещения ДС.
- Несмотря на то, что решение обратной задачи рассмотрено для одного случая направления ветра, из вида зависимостей для ширины и смещения ДС от направления ветра можно сделать вывод о том, что этот подход может использоваться для любого направления ветра и направление ветра может быть определено..
- Важным преимуществом полученных формул является отсутствие необходимости измерения сечения обратного рассеяния, требующего сложной процедуры калибровки.
- Особенностью всех приведенных рассуждений является их схожесть как для гидроакустических, так и для радиолокационных измерений.