

# Натурные измерения бистатистических характеристик отраженного водной поверхностью излучения с помощью модифицированного радиолокатора

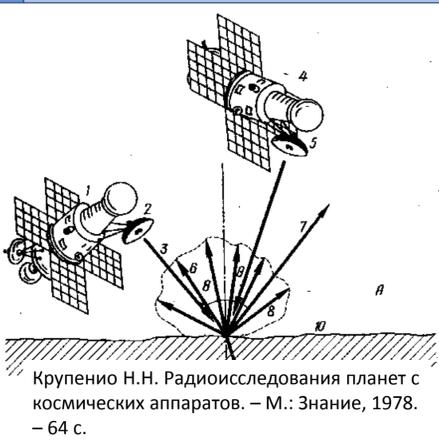


Институт прикладной физики РАН,  
Нижний Новгород, Россия

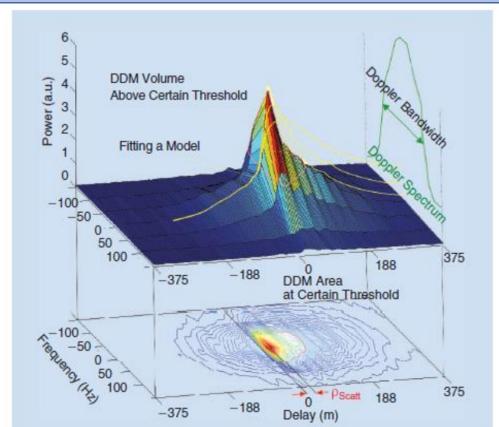
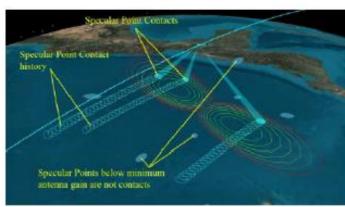
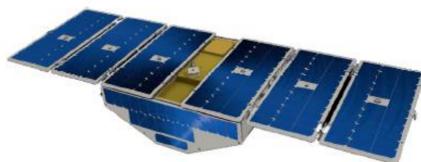
Титченко Ю.А., Караев В.Ю., Зуйкова Э.М.,  
Мешков Е.М., Панфилова М.А., Рябкова М.С.  
yuriy@ipfran.ru

1

## ВВЕДЕНИЕ



8 спутников NASA CYGNSS



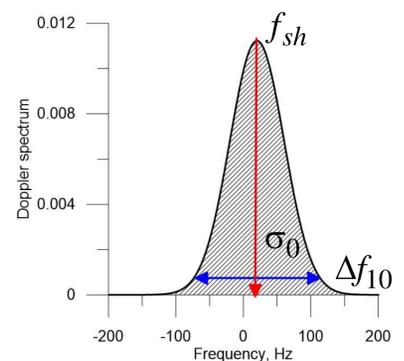
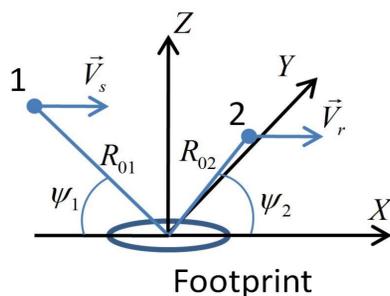
V. U. Zavorotny, S. Gleason, E. Cardellach and A. Camps, in *IEEE GRSM*, vol. 2, no. 4, pp. 8-45, Dec. 2014.

- Для тестирования нового подхода расчета доплеровского спектра, отраженного водной поверхностью излучения в 2019 году были проведены первые натурные измерения на мосту через реку Ока в Нижнем Новгороде. В экспериментах использовалась уникальная схема измерений с одним радиолокатором позволяющая проводить бистатистические измерения. Впервые данный подход применен для измерения доплеровского спектра отраженного водной поверхностью излучения.
- Преимуществом бистатистических измерений является возможность проведения измерений на значительном удалении от места установки радиолокатора и при этом оставаться в квазизеркальной области отражения, которая хорошо описывается в теории. Кроме того, уровень мощности принимаемого сигнала в квазизеркальной области отражения значительно превосходит область резонансного рассеяния. Развитость теоретического описания позволяет для расчета прямой задачи пользоваться выражениями в явном виде, определяющими взаимосвязь характеристик рассеяния и параметров отражающей поверхности. Такие выражения в свою очередь позволяют создавать алгоритмы решения обратной задачи по восстановлению параметров поверхностных волн, влияющих на отраженное излучение.

2

## РАССЕЯНИЕ ВОЛН МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

$$\Sigma(r, t) = \zeta(r, t) + \xi(r, t)$$



- Ширина доплеровского спектра отраженного излучения

$$\Delta f_{10} = \frac{2\sqrt{2 \ln 10}}{\lambda} (\sin \psi_1 + \sin \psi_2) \left( \sigma_{\eta}^2 - \frac{(K_{yt})^2}{(\sigma_{yy}^2 + C_{Ry})} - \frac{K_{xt}^2 + 2\sqrt{C_{VRx} C_{Rx}} K_{xt} - \sigma_{xx}^2 C_{VRx}}{(\sigma_{xx}^2 + C_{Rx})} \right)^{1/2}$$

$\sigma_{xx}^2 = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right\rangle$ ,  $\sigma_{yy}^2 = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right\rangle$  - Дисперсии наклонов поверхности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;

$\sigma_{\eta}^2 = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\rangle$  - Дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости;

$K_{xt} = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\rangle$ ,  $K_{yt} = \left\langle \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right\rangle$  - Коэффициенты корреляции между наклонами и вертикальной составляющей орбитальной скорости;

$$C_{Rx} = \frac{(R_{02} \sin^2 \psi_1 + R_{01} \sin^2 \psi_2)^2 \delta_{Ex}^2 \delta_{Rx}^2}{5.52 (\sin \psi_1 + \sin \psi_2)^2 (R_{02}^2 \delta_{Rx}^2 \sin^2 \psi_1 + R_{01}^2 \delta_{Ex}^2 \sin^2 \psi_2)}, \quad C_{Ry} = \frac{(R_{02} + R_{01})^2 \delta_{Ey}^2 \delta_{Ry}^2}{5.52 (\sin \psi_1 + \sin \psi_2)^2 (R_{01}^2 \delta_{Ey}^2 + R_{02}^2 \delta_{Ry}^2)}, \quad C_{VRx} = \frac{(V_{1x} R_{02} \sin^2 \psi_1 + R_{01} V_{2x} \sin^2 \psi_2)^2 \delta_{Rx}^2 \delta_{Ex}^2}{5.52 (\sin \psi_1 + \sin \psi_2)^2 (R_{02}^2 \delta_{Rx}^2 \sin^2 \psi_1 + R_{01}^2 \delta_{Ex}^2 \sin^2 \psi_2)}$$

- Смещение доплеровского спектра отраженного излучения

$$f_{sh} = \frac{1}{\lambda} V_{1x} \cos \psi_1 - \frac{1}{\lambda} \cos \psi_2 V_{2x} - (\cos \psi_1 - \cos \psi_2) \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{C_{Rx} C_{VRx} + K_{xt}}{\sigma_{xx}^2 + C_{Rx}}}$$

$V_{eff}$  - эффективный коэффициент отражения. Дополнительно к физическим параметрам сред на границе зависит от интенсивности мелкомасштабной шероховатости и вводится в формулы для учета ослабления квазизеркальной компоненты сигнала из-за Брэгговского рассеяния.

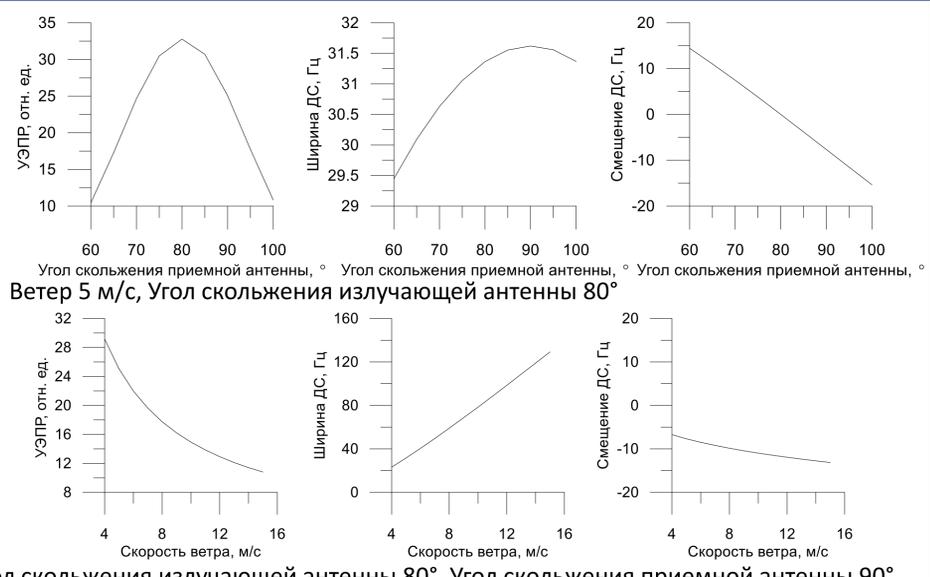
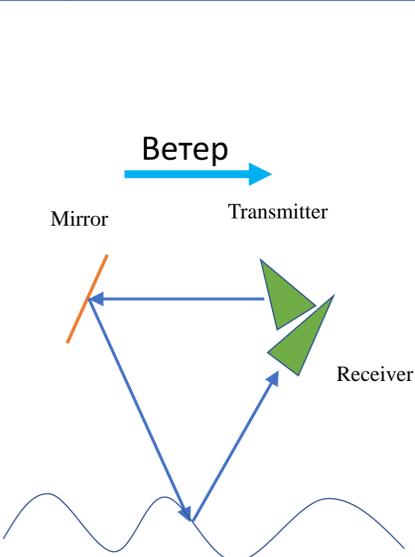
- Нормированное сечение бистатистического рассеяния:

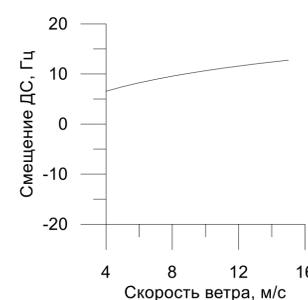
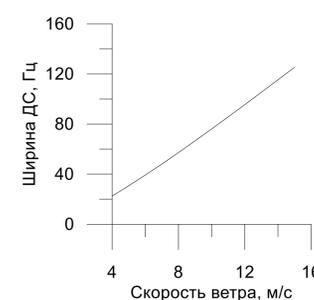
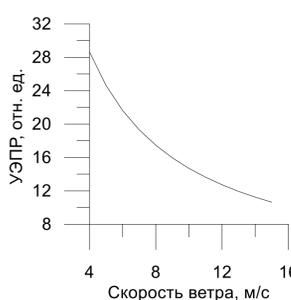
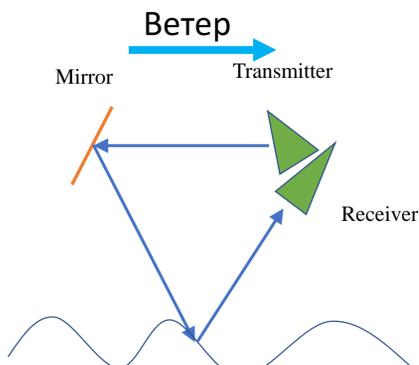
$$\sigma_0 = \frac{|V_{eff}^2| \exp\left(-tg^2\left(\frac{\psi_1 - \psi_2}{2}\right)\right) / 2 (\sigma_{xx}^2 + C_{Rx})}{2 \cos^4 \frac{\psi_1 - \psi_2}{2} \sqrt{(\sigma_{yy}^2 + C_{Ry})(\sigma_{xx}^2 + C_{Rx})}}$$

- Важно отметить, что в работе не рассматривается когерентная компонента отраженного излучения. В случае присутствия когерентной составляющей представленные формулы справедливы только для флуктуационной компоненты отраженного излучения.

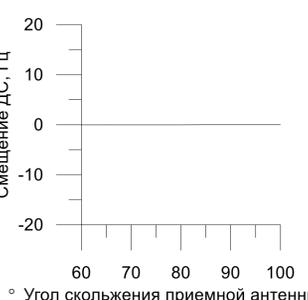
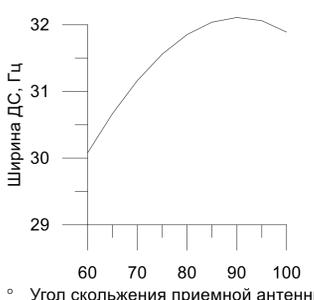
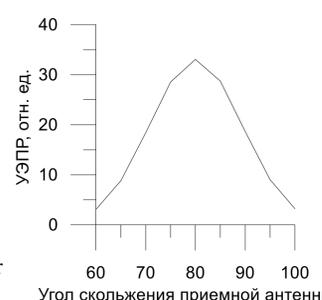
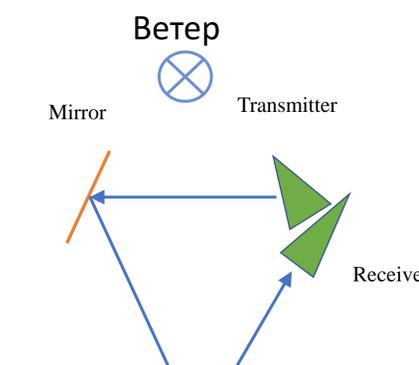
3

## УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

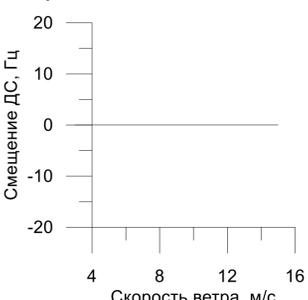
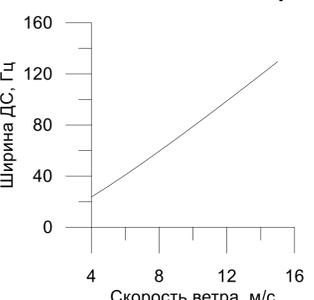
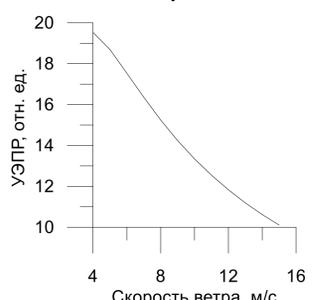




Угол скольжения излучающей антенны  $80^\circ$ , Угол скольжения приемной антенны  $70^\circ$ .



Ветер  $5 \text{ м/с}$ , Угол скольжения излучающей антенны  $80^\circ$



Угол скольжения излучающей антенны  $80^\circ$ , Угол скольжения приемной антенны  $90^\circ$  и  $70^\circ$ .

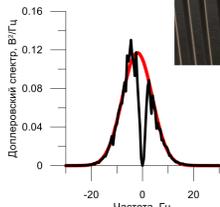
За основу взят доплеровский радиолокатор X-диапазона, разработанный в ИПФ РАН, в котором с помощью направленного ответвителя, коаксиально-волноводных переходов, СВЧ-кабеля, а так же дополнительного рупора и отражателя были организованы две отдельные приемная и излучающие антенны, свободно поворачивающиеся друг относительно друга.



Для бистатики



Для обратного отражения



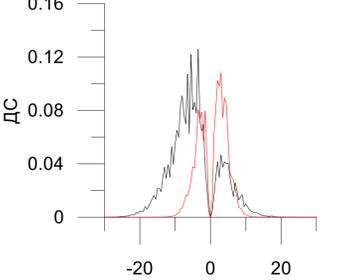
Зеркало



Последовательное отклонение зеркала

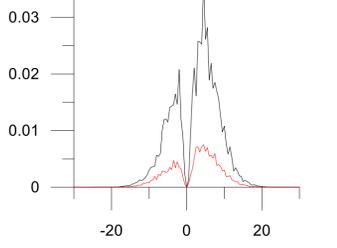
Обратное рассеяние  $87^\circ$

Бистатика, приемная антенна  $85^\circ$



Зеркало  $55^\circ$

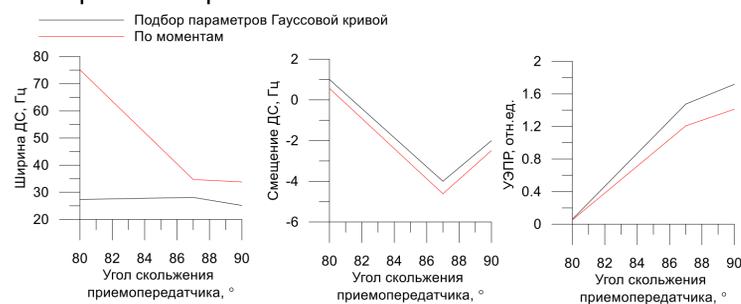
Зеркало  $0^\circ$ , не отражает



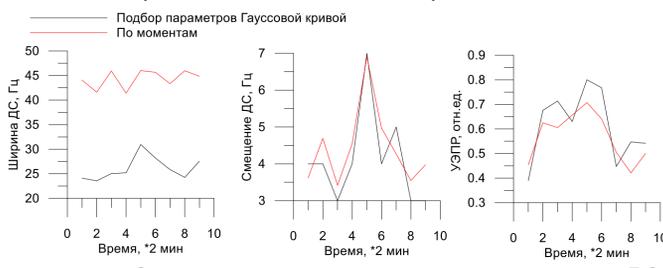
Меняем угол скольжение приемника, при угле скольжения излучателя  $73^\circ$ , Зеркало  $44^\circ$  от горизонта



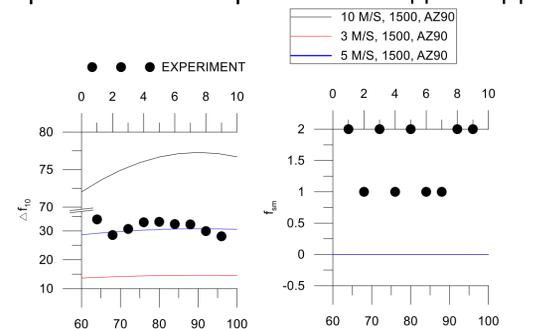
Обратное отражение



Поперечные волны от катера



Сравнение эксперимента с моделью ДС



В результате получены измерения доплеровского спектра отраженного водной поверхностью сигнала в бистатической постановке задачи. Измерения выполнены при различных условиях формирования волнения (скорость и направление ветра), а также при различных углах падающего и принимаемого излучения (наблюдение в квазизеркальной области отражения). Сравнение натуральных измерений с теоретическими расчетами подтверждает работоспособность предлагаемого подхода описания доплеровского спектра отраженного излучения в бистатической постановке задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-35-20057 мол\_а\_вед).