



Эффективный коэффициент отражения морской поверхности в Ки-диапазоне при малых углах падения

Караев В.Ю.¹, Титченко Ю.А.¹, Панфилова М.А.¹, Ли Сю.², Ковалдов
Д.А.¹, Мешков Е.М.¹

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

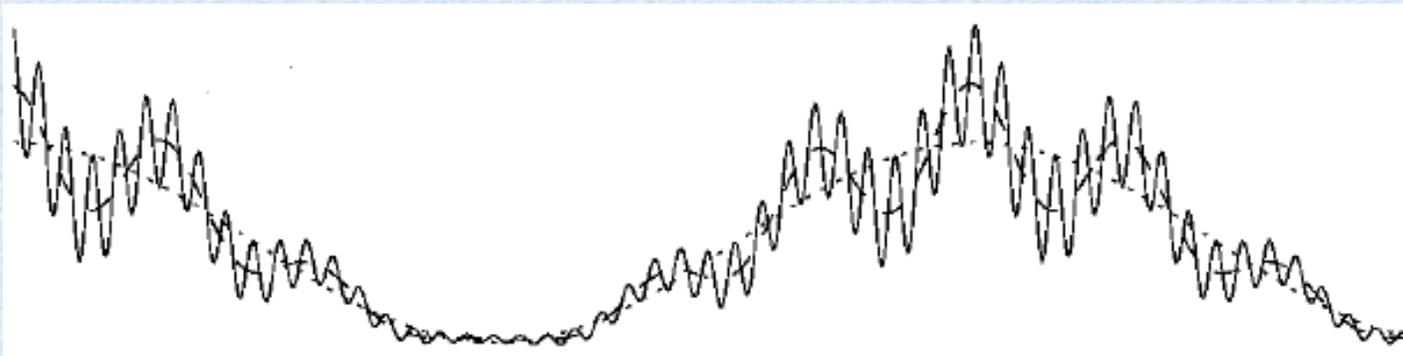
²*School of Marine sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China*

Аннотация

При малых углах падения доминирующим механизмом обратного рассеяния является квазизеркальное отражение. В этом случае мощность отраженного сигнала зависит от функции распределения уклонов крупномасштабных морских волн (по сравнению с длиной волны радара) и от эффективного коэффициента отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля. Обсуждается новый метод расчета эффективного коэффициента отражения по данным волнового скаттерометра SWIM. Впервые измерения проводятся радиолокатором под разными азимутальными углами при малых углах падения. Разработан оригинальный алгоритм обработки данных и определения полных среднеквадратических уклонов крупномасштабных морских волн и азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения. В результате последующей обработки восстановлена азимутальная зависимость эффективного коэффициента отражения. Обработка данных SWIM подтвердила работоспособность алгоритма. Вычислены коэффициенты азимутальной анизотропии для среднеквадратических уклонов крупномасштабных волн и эффективный коэффициент отражения.

Введение

При описании обратного рассеяния электромагнитного излучения СВЧ-диапазона морской поверхностью часто используют понятие «двухмасштабной модели» отражающей поверхности.



При малых углах падения доминирующим является квазизеркальный механизм обратного рассеяния и эффективный коэффициент отражения может быть вычислен, например, следующим образом.

$$\left| R_{eff} \right|^2 = \alpha \left| R_{fr} \right|^2 \quad \alpha = \exp \left[-4k^2 \sigma_h^2 \cos^2 \theta_{loc} \right]$$

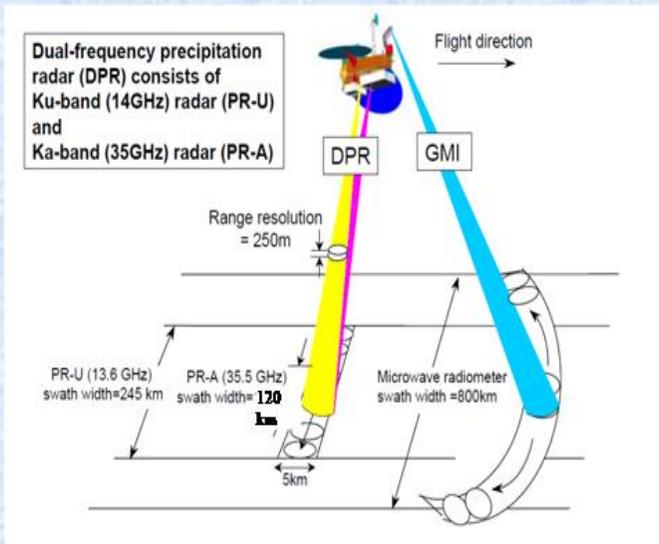
σ_h^2 - дисперсия высот мелкой ряби

R_{fr} - коэффициент Френеля

Введение

При малых углах падения для вычисления отраженного морской поверхностью радиолокационного сигнала можно использовать метод Кирхгофа (изотропное волнение):

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{eff}(0)|^2}{mss \cdot \cos^4 \theta} \exp \left[-\frac{\tan^2 \theta}{mss} \right]$$



где mss – дисперсия уклонов крупномасштабного волнения, R_{eff} – эффективный коэффициент отражения

Схема зондирования двухчастотного дождевого радиолокатора

Введение

В более общем случае сечение обратного рассеяния задается следующей формулой

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{eff}|^2 \exp\left[-\frac{\tan^2 \theta}{2mss_{xx}}\right]}{2 \cos^4 \theta \sqrt{mss_{xx} mss_{yy}}}$$

Впервые полная дисперсии уклонов морской поверхности

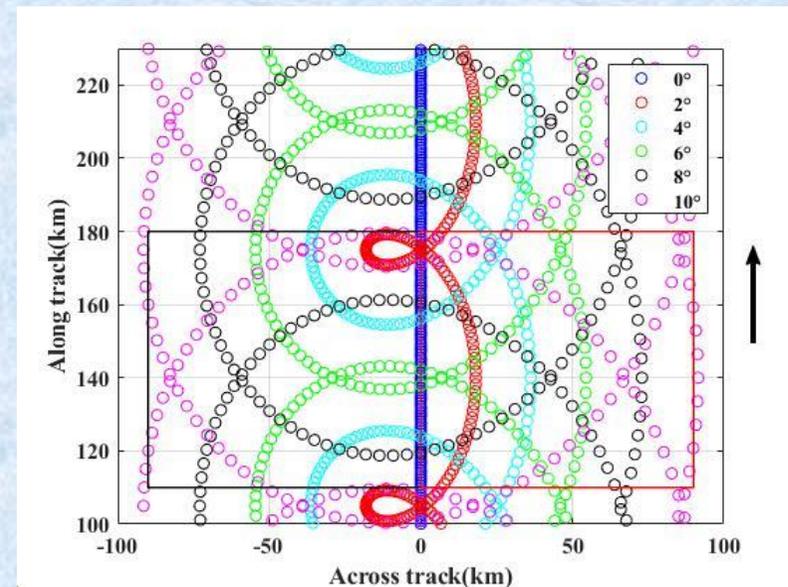
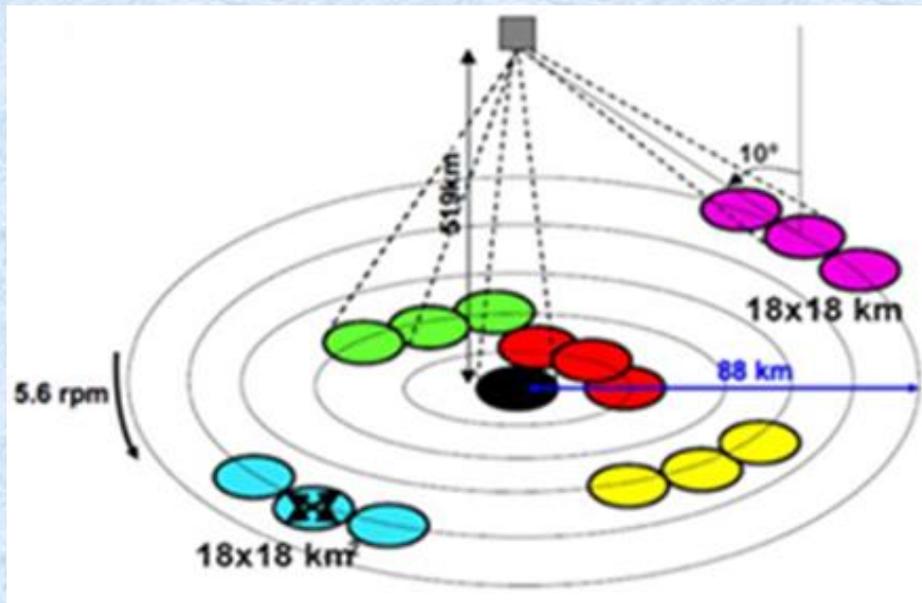
$$mss_{total} = mss_{xx} + mss_{yy}$$

была восстановлена по данным дождевого радиолокатора в работе М.Панфиловой с помощью оригинального подхода.

M.Panfilova, V.Karaev, L.Mitnik, Yu.Titchenko, M.Ryabkova, E.Meshkov, Advanced view at the Ocean Surface, Journal of Geophysical Research, Oceans, v. 125, November 2020, e2020JC016531.

Введение

Вопрос о зависимости дисперсии уклонов от азимутального угла оставался открытым пока не был запущен спутник CFOSAT с волновым скаттеромом SWIM. Схема измерения приведена ниже.



Scheme of measurement of SWIM: altitude 519 km; incidence angles: 0°, 2°, 4°, 6°, 8°, 10°; antenna aperture 2° x 2°.

Эффективный коэффициент отражения

В самом общем виде формула для сечения обратного рассеяния имеет следующий вид

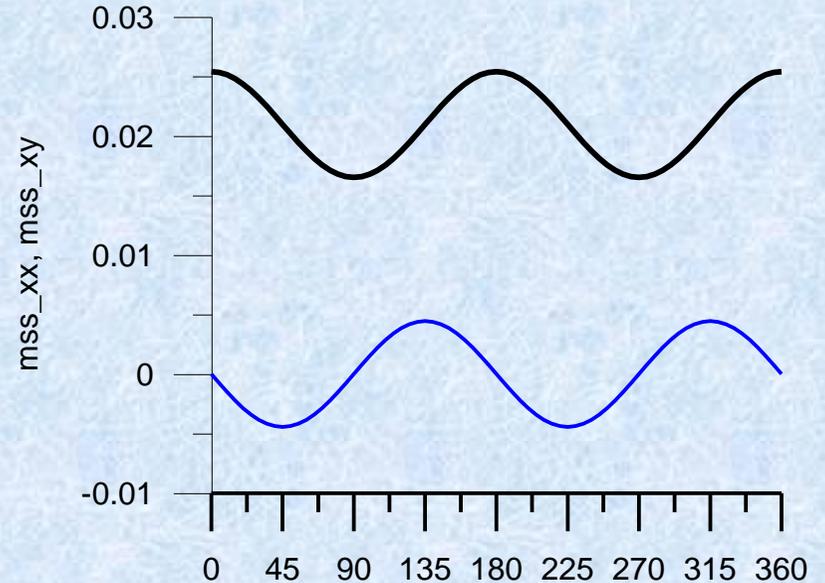
$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{eff}|^2 \exp\left[-\frac{\tan^2 \theta}{2constA} mss_{yy}\right]}{2 \cos^4 \theta \sqrt{constA}}$$

где

$$constA = mss_{xx} mss_{yy} - mss_{xy}^2$$

и

$$mss_{xy} \ll mss_{xx}, mss_{yy}$$



Азимутальная зависимость mss_{xx} (черная кривая) и mss_{xy} (синяя кривая)

Моделирование

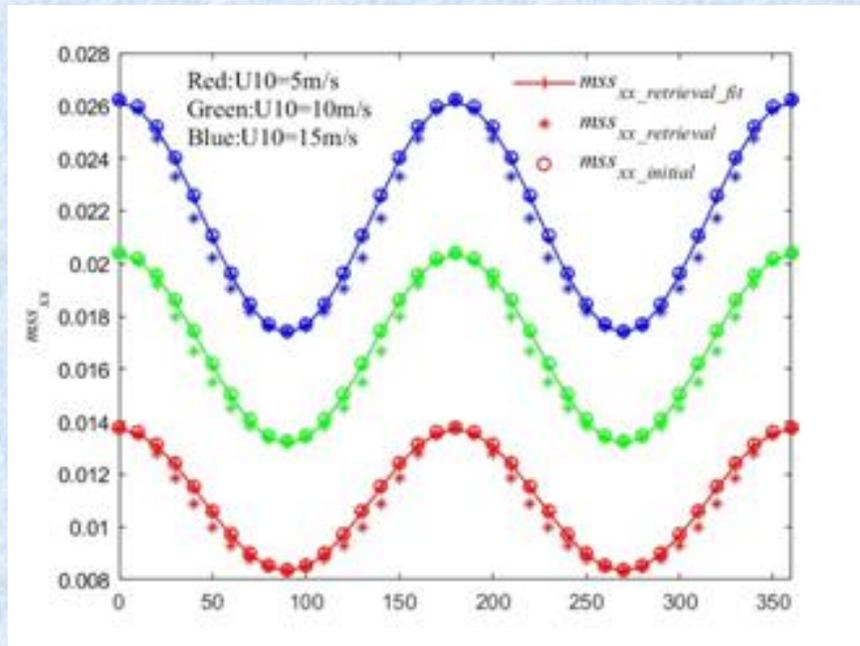
$$mss_{xx} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\kappa_c} \kappa^2 \cos^2 \varphi \cdot S(\kappa, \varphi_0 - \varphi) \kappa d\kappa d\varphi$$

$$mss_{xy} = - \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\kappa_c} \kappa^2 \cos \varphi \sin \varphi \cdot S(\kappa, \varphi_0 - \varphi) \kappa d\kappa d\varphi$$

$$mss_{yy} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\kappa_c} \kappa^2 \sin^2 \varphi \cdot S(\kappa, \varphi_0 - \varphi) \kappa d\kappa d\varphi$$

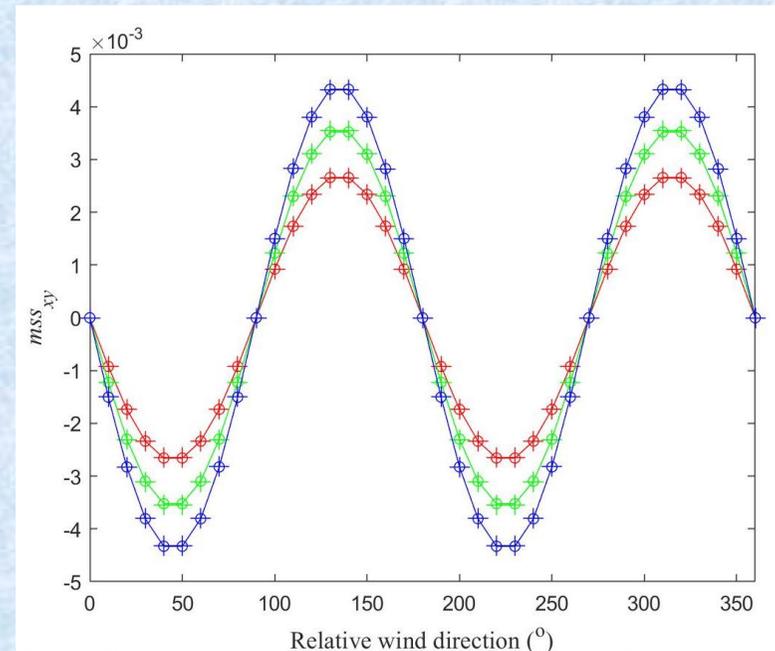
$$mss_{total} = \int_0^{\kappa_c} \kappa^2 S(\kappa) \kappa d\kappa = mss_{xx} + mss_{yy}$$

Азимутальная зависимость mss_{xx}



$$mss_{xx}(\phi) = 0.5 \cdot mss_{total} + 0.5 \cdot \Delta mss \cdot \cos(2\phi - 2\phi_0)$$

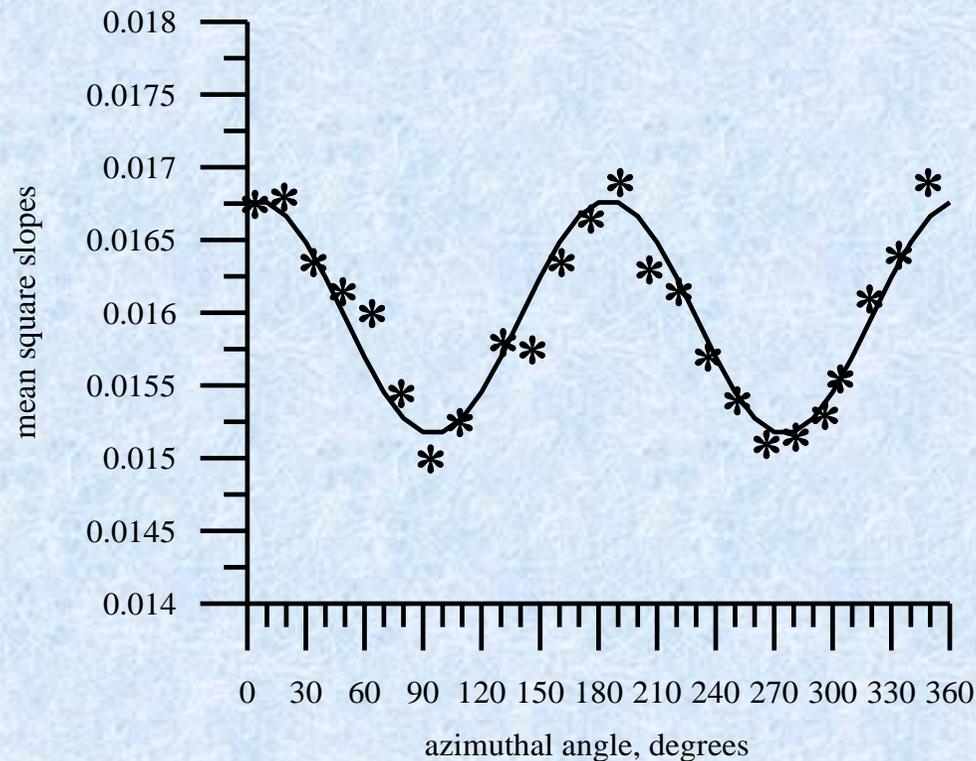
Азимутальная зависимость mss_{xy}



$$mss_{xy}^2(\phi) = mss_{xx}(\phi) \cdot mss_{yy}(\phi) - constA$$

Алгоритм обработки

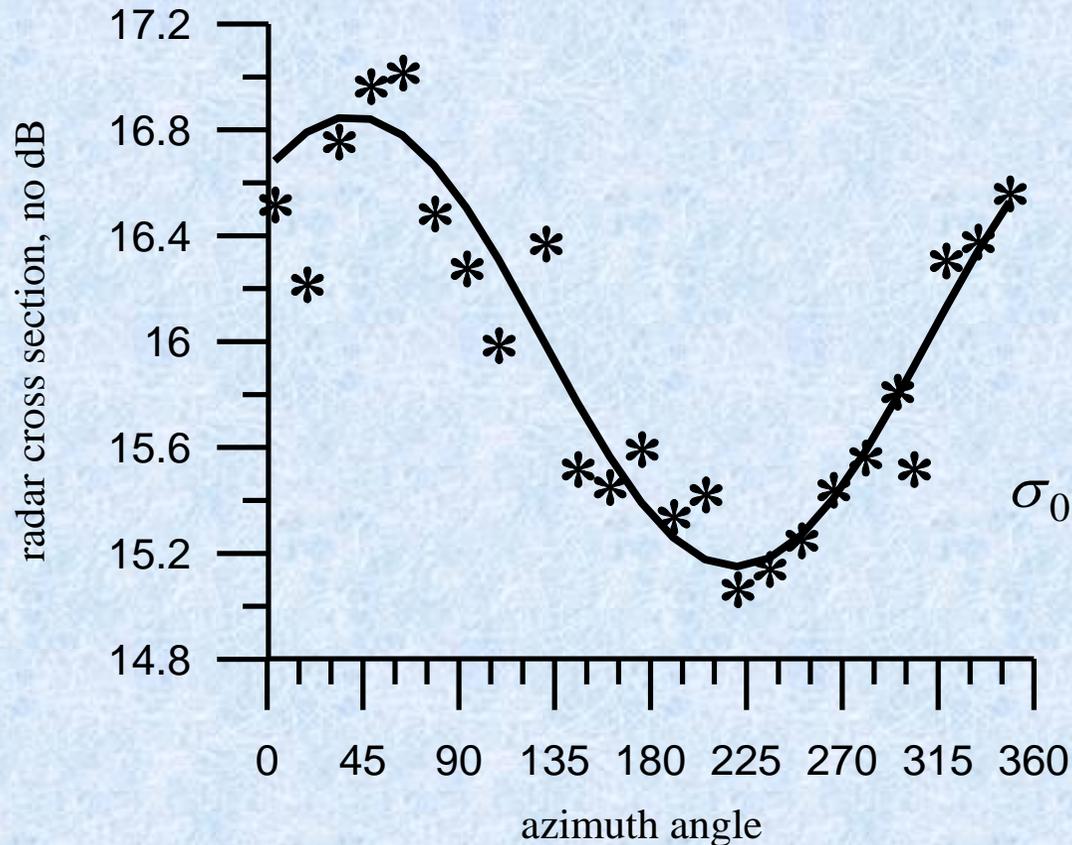
SWIM выполняет измерения под 24 азимутальными углами (сектор 15 градусов). В результате определяется дисперсия уклонов под этими азимутальными углами.



Азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения: звездочки – восстановленные значения и кривая - модель

Алгоритм обработки

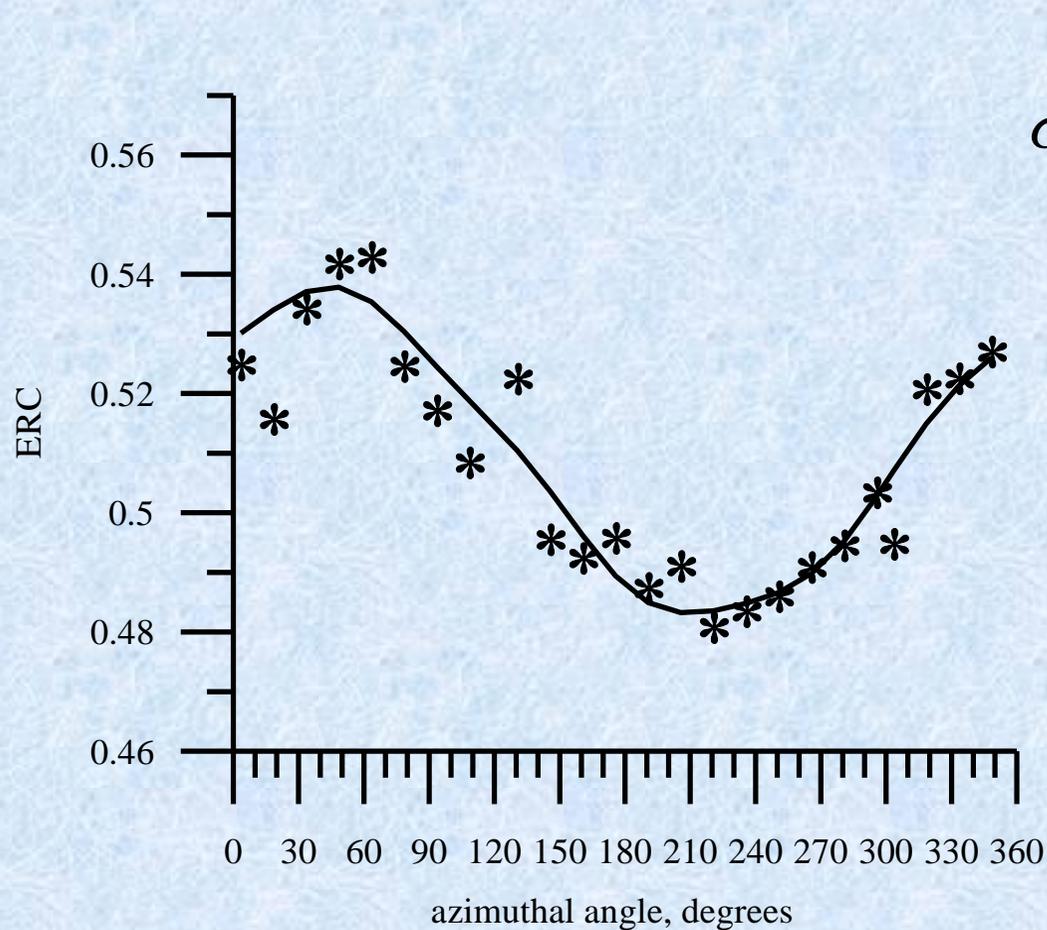
$$\sigma_0(\varphi) = A_0 + C_0 \cos(\varphi_0 - \varphi)$$



$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{eff}|^2 \exp\left[-\frac{\tan^2 \theta}{2constA} mss_{yy}\right]}{2 \cos^4 \theta \sqrt{constA}}$$

Зависимость сечения обратного рассеяния от азимутального угла при надирном зондировании (нат. един.)

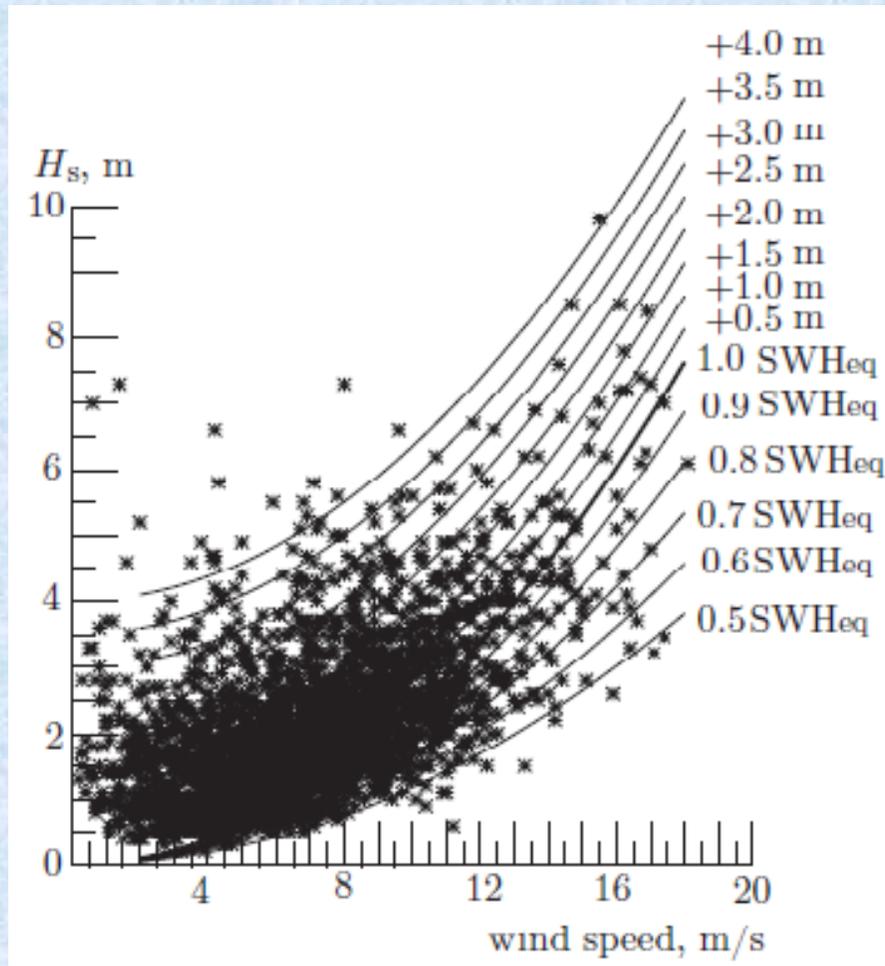
Алгоритм обработки



$$\sigma_0(0) = \frac{|R_{eff}|^2}{2\sqrt{constA}}$$

Зависимость эффективного коэффициента отражения от азимутального угла: звездочки – по измеренным значениям. Для построения кривой использовались модельные зависимости mss и RCS.

Обработка данных



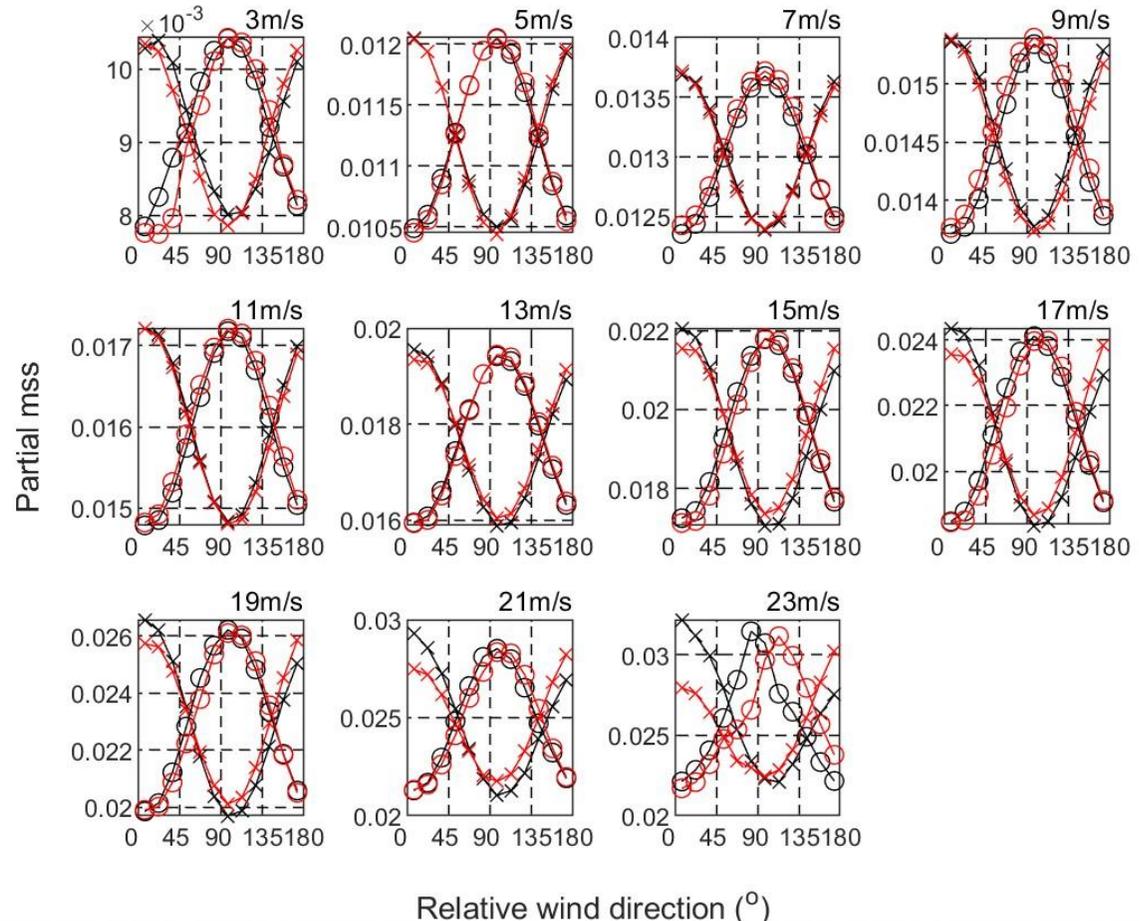
В 2022 год SWIM выполнил более 1,7 млн. измерений (boxes) и после выделения состояния полностью развитого ветрового волнения осталось более 117 тыс. точек.

$$0.95 H_{sfd}(U_{10}) < H_S < 1.1 H_{sfd}(U_{10})$$

Зависимость высоты значительного волнения от скорости ветра U_{10} (данные NDBC буев)

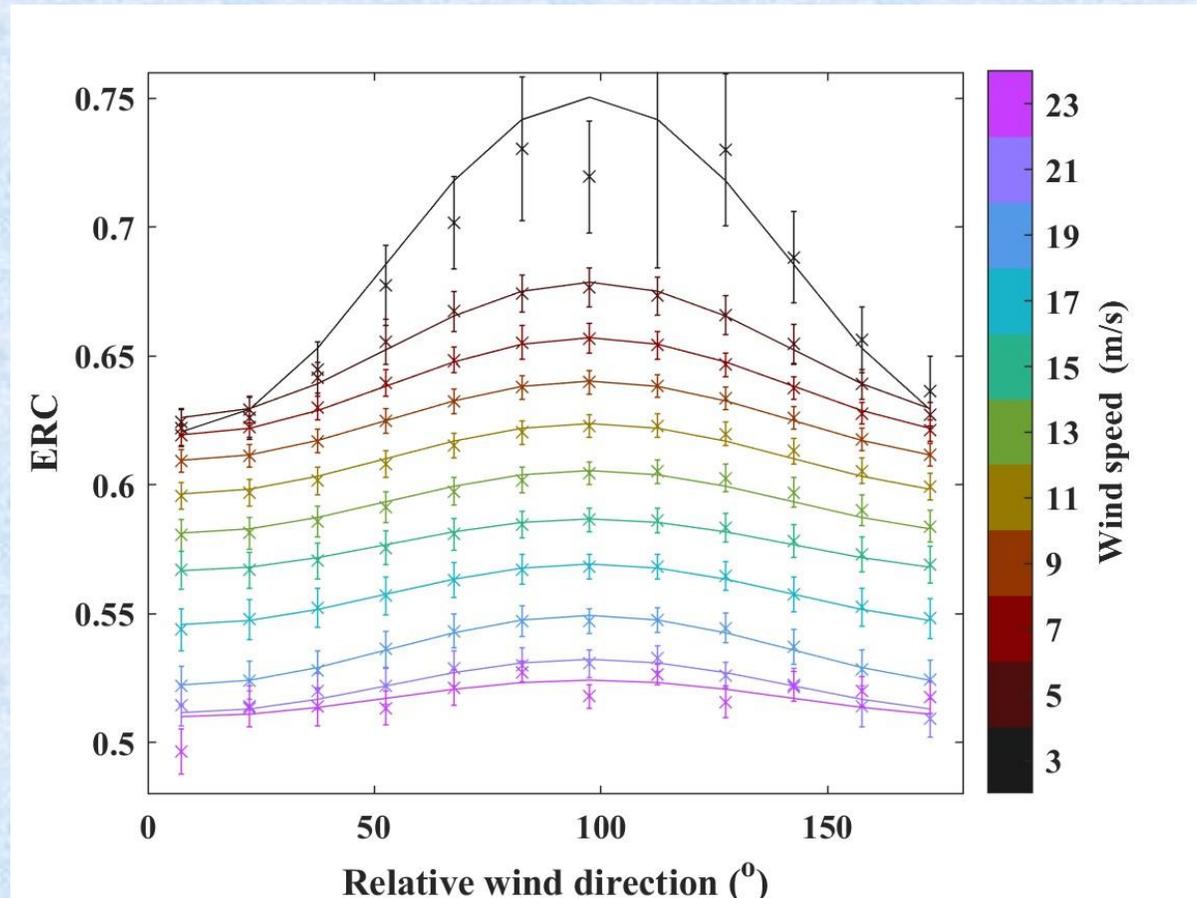
Обработка данных

Чтобы минимизировать влияние пространственной неоднородности волнения рассматривалось два сектора углов: 0° — 180° и 180° — 360° (слева и справа от трека).



Азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения: звездочки — mss_{xx} и кружки — mss_{yy}

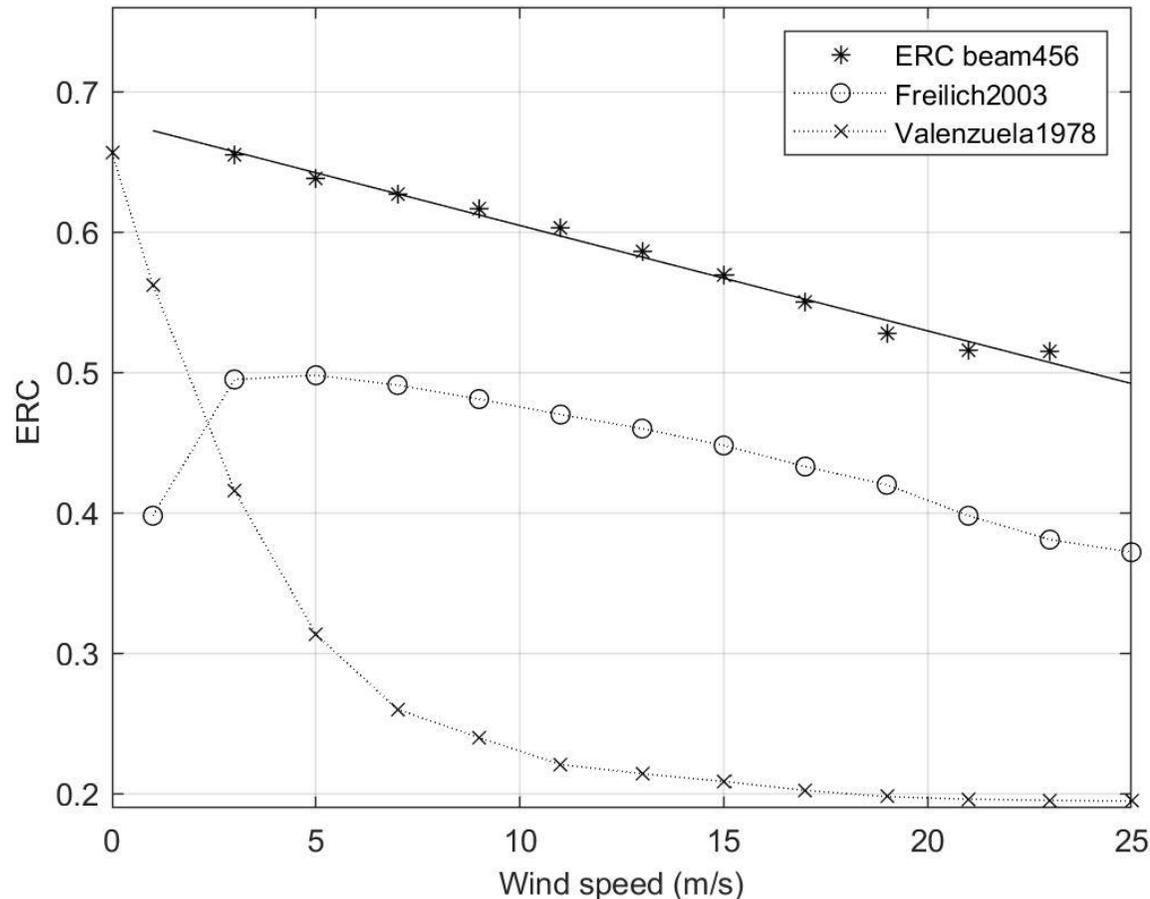
Обработка данных



Зависимость эффективного коэффициента отражения (ERC) от азимутального угла (90° – поперек ветра). Крестики обозначают ERC для сектора азимутальных углов (15°), а линии — регрессия. Вертикальные линии показывают доверительный интервал.

Обработка данных

Сравнение ERC с известными зависимостями. ERC456 — данное исследование. Зависимость Freilich2003 получена в [1], а Valenzuela1978 взята из [2].



[1] M. H. Freilich and B. A. Vanhoff, "The relationship between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM precipitation radar measurements," *Journal of atmospheric and oceanic technology*, vol. 20, pp. 549-562, 2003.

[2] G. R. Valenzuela, "Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review," *Boundary Layer Meteorology*, vol. 13, pp. 61-85, 1978.

Выводы

Построена зависимость эффективного коэффициента отражения от скорости ветра для случая полностью развитого ветрового волнения. Эффективный коэффициент отражения уменьшается с увеличением скорости ветра.

Эффективный коэффициент отражения незначительно растет с увеличением угла падения, т.е. изменяется вдоль профиля крупномасштабного волнения

Эффективный коэффициент отражения обладает азимутальной зависимостью и находится в противофазе с сечением обратного рассеяния. Максимум соответствует 90 градусам, когда интенсивность ряби минимальна.

Впервые был измерен коэффициент корреляции уклонов в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Информация полезна для уточнения функции углового распределения спектра волнения.