



**Полуэмпирическая модель обратного
рассеяния электромагнитного излучения
при малых углах падения и задача
восстановления дисперсии уклонов
морской поверхности**

**В.Караев , М.Панфилова, Ю.Титченко,
М.Рябкова, Е.Мешков**

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация

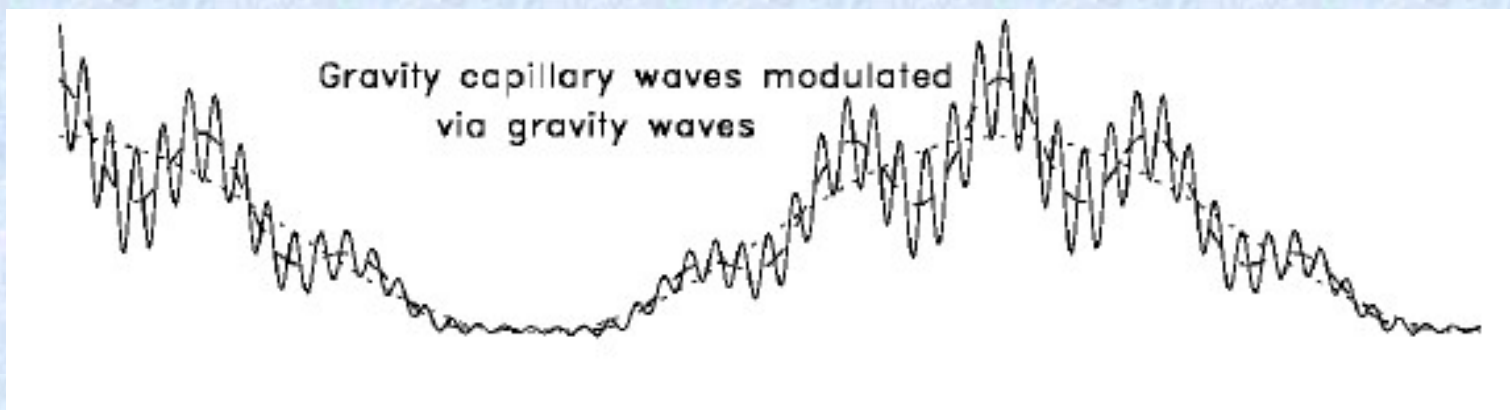
При анализе обратного рассеяния электромагнитных волн морской поверхностью в области средних углов падения было введено понятие модуляционной передаточной функции (МПФ), которая позволяет объяснить наблюдаемую в экспериментах азимутальную зависимость сечения обратного рассеяния. Последние исследования показали, что в области квазизеркального рассеяния (0-12 градусов) при углах падения больше 6 градусов в азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния начинает проявляться аналогичный эффект: сечение обратного рассеяния при зондировании навстречу ветру немного больше, чем при измерении по ветру.

В данной работе обсуждается новая полуэмпирическая модель рассеяния электромагнитного излучения морской поверхностью для малых углов падения. В отличие от традиционного подхода для описания зависимости дисперсии уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны радиолокатора, волнения от азимутального угла применяется особая модельная функция. В результате азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения отражает тот факт, что дисперсии уклонов по и против направления ветра немного отличаются. Это приводит к несимметричности азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния, наблюдаемой в экспериментах. Для проверки сделанных при построении полуэмпирической модели рассеяния предположений было проведено численное моделирование азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния. Полученные результаты подтвердили предположение, что применение новой модельной функции приближает азимутальную зависимость сечения обратного рассеяния к экспериментальным данным.

Введение

При построении теоретической модели обратного рассеяния в области средних углов падения вводится понятие модуляционной передаточной функции (МПФ), которая позволяет воспроизвести наблюдаемую в экспериментах азимутальную зависимость сечения обратного рассеяния. С точки зрения теории модуляция мощности отраженного радиолокационного сигнала обусловлена двумя эффектами:

- 1) модуляция уклонами длинных волн и 2) неравномерность распределения резонансной ряби вдоль профиля длинной волны (гидродинамическая модуляция).

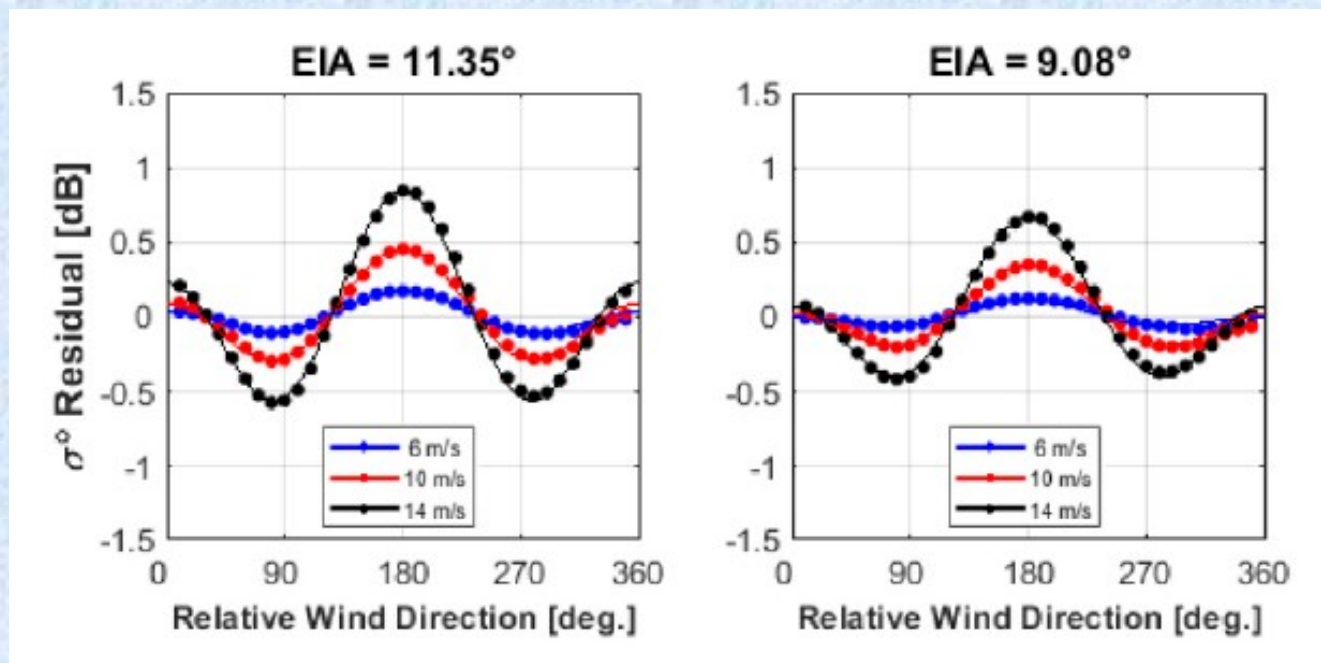


В первом случае на мощность отраженного сигнала оказывают влияние длинные волны, которые изменяют локальный угол падения электромагнитного излучения на морскую поверхность.

Сечение обратного рассеяния пропорционально спектральной плотности резонансной ряби, которая неравномерно распределена по профилю длинной волны (гидродинамическая модуляция). В совокупности оба эффекта позволяют объяснить, почему сечения обратного рассеяния при зондировании по ветру и против ветра различаются.

Введение

Последние исследования показали, что в области квазизеркального рассеяния (0-12 градусов) при углах падения больше 6 градусов в азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния проявляется аналогичный эффект: сечение обратного рассеяния при зондировании навстречу ветру больше, чем при измерении по ветру [1]. Разность составляет 0,1-0,3 дБ.



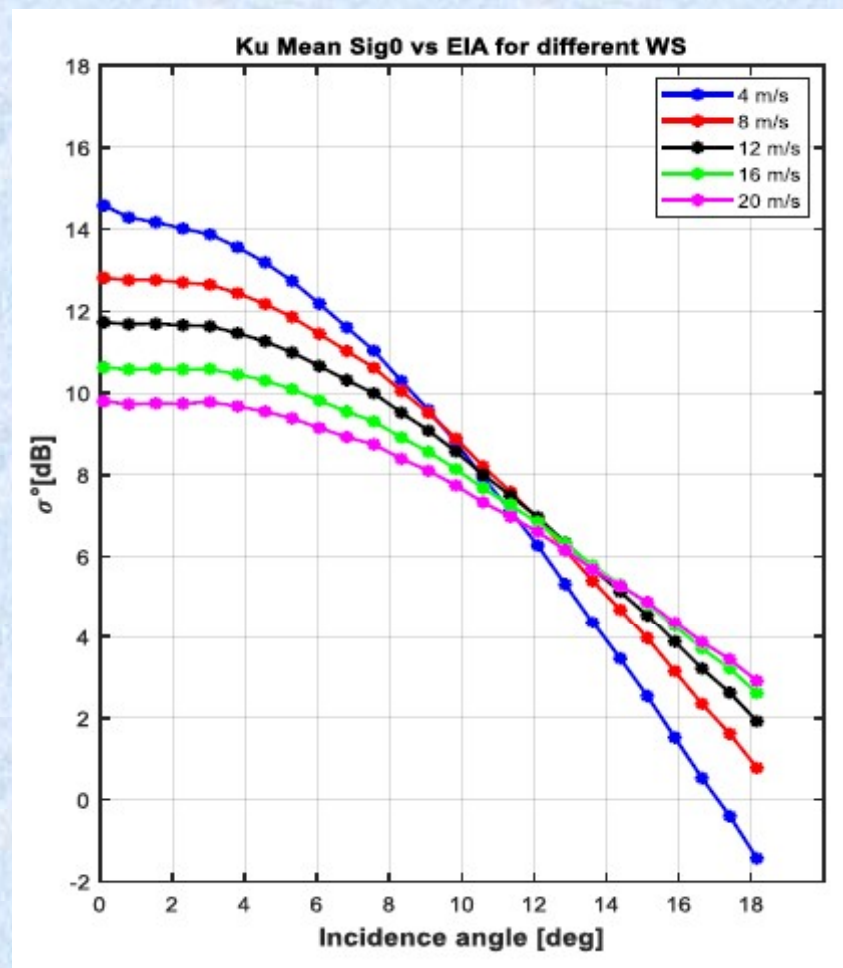
Азимутальная анизотропия сечения обратного рассеяния для трех скоростей ветра: синяя кривая – 6 м/с, красная кривая 10 м/с и черная кривая – 14 м/с

1. Hossan, A.; Jones, W.L. Kuand, Ka-Band Ocean Surface Radar Backscatter Model Functions at Low-Incidence Angles Using Full-Swath GPM DPR Data // Remote Sensing. 2021. V. 13. N 1569.
<https://doi.org/10.3390/rs13081569>

Введение

В области квазизеркального рассеяния глубина модуляции невелика, например, при угле падения 10° сечение обратного рассеяния больше 8 дБ и разность сечений обратного рассеяния переднего и заднего склона составляет примерно 0,1-0,3 дБ.

Однако эффект присутствует, поэтому необходимо уточнить модель рассеяния, чтобы она описывала экспериментальные данные.



Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для разных скоростей ветра: 4 м/с – синяя кривая, 8 м/с – красная кривая, 12 м/с – черная кривая, 16 м/с – зеленая кривая, 20 м/с – малиновая кривая

Модель рассеяния

При малых углах падения механизм обратного рассеяния является квазизеркальным и для вычисления отраженного поля можно использовать метод Кирхгофа.

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{eff}(0)|^2}{2 \cos^4 \theta \sqrt{mss_{xx} mss_{yy}}} \times \exp\left[-\frac{\tan^2 \theta}{2mss_{xx}}\right],$$

где mss_{xx} и mss_{yy} дисперсии уклонов крупномасштабного волнения вдоль осей X и Y соответственно; θ - угол падения; R_{eff} эффективный коэффициент отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть влияние мелкой ряби на амплитуду отраженного сигнала.

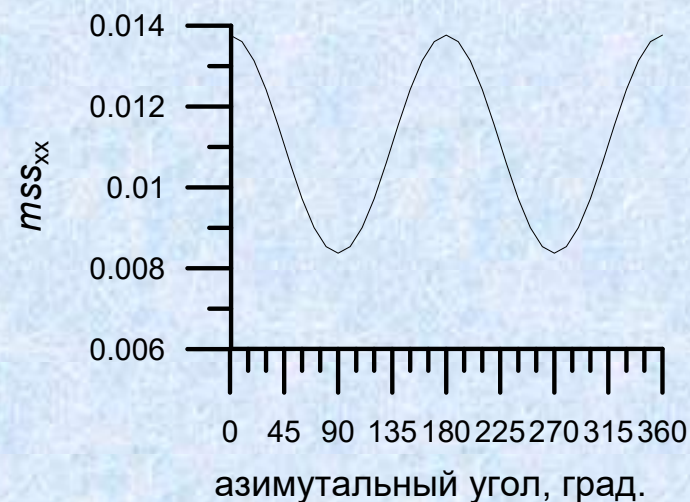
Для вычисления дисперсии уклонов обычно используют спектр волнения $S_\zeta(\kappa, \varphi)$ и формула имеет следующий вид:

$$mss_{xx} = \iint \kappa_x^2 S(\kappa, \varphi) d\kappa d\varphi,$$

где κ - волновое число.

В результате $mss_{xx}(\varphi_w = 0^\circ) = mss_{xx}(\varphi_w = 180^\circ)$, т.е.

дисперсии уклонов по ветру и против ветра будут одинаковыми, что видно на рисунке. Это приведет к равенству сечений обратного рассеяния.



Модель рассеяния

В рамках метода Кирхгофа азимутальную асимметрию сечения обратного рассеяния можно объяснить, если использовать предположение о неравенстве уклонов крупномасштабного волнения переднего и заднего склонов волны.

При построении модельной функции уклонов опираемся на следующие предположения:

1) полная дисперсия уклонов $mss_{total} = mss_{xx} + mss_{yy}$ сохраняется

2) для описания азимутальной зависимости дисперсии уклонов mss_{xx} используется следующая функция

$$mss_{xx} = A_x + B_x * \cos(\varphi_w) + C_x * \cos(2\varphi_w)$$

3) дисперсия уклонов вдоль любого направления является суммой, т.е.

$$mss_{xx} = 0,5 * mss_{xx}(\varphi_w) + 0,5 * mss_{xx}(\varphi_w + 180)$$

4) дисперсия уклонов в перпендикулярном направлении вычисляется по следующей формуле:

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

Модель рассеяния

Для оценки работоспособности предложенного подхода смоделируем полностью развитое ветровое волнение (скорость ветра 8 м/с) и вычислим дисперсию уклонов mss_{xx} – синяя кривая на рисунке.

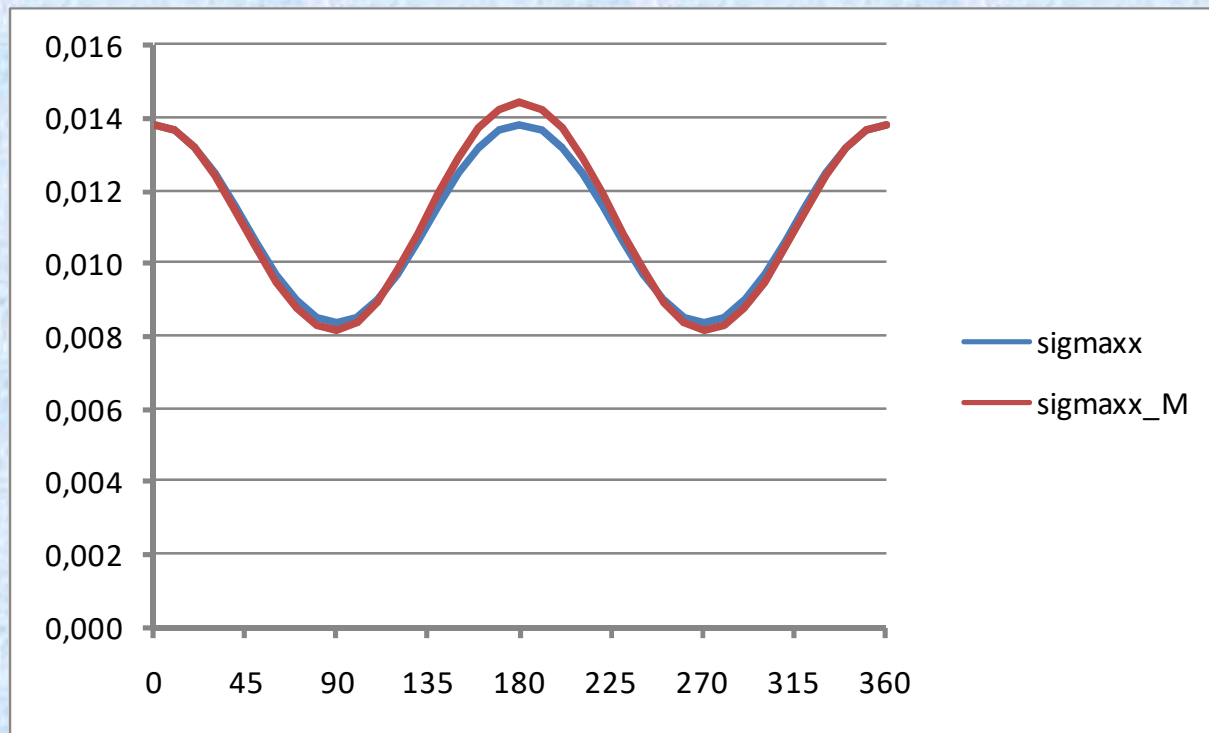
Для новой модели азимутальной зависимости уклонов зададим следующие параметры:

$$A_x = 0,01114,$$

$$B_x = 0,0003,$$

$$C_x = 0,003.$$

Новая азимутальная зависимость дисперсии уклонов показана на рисунке красной кривой.

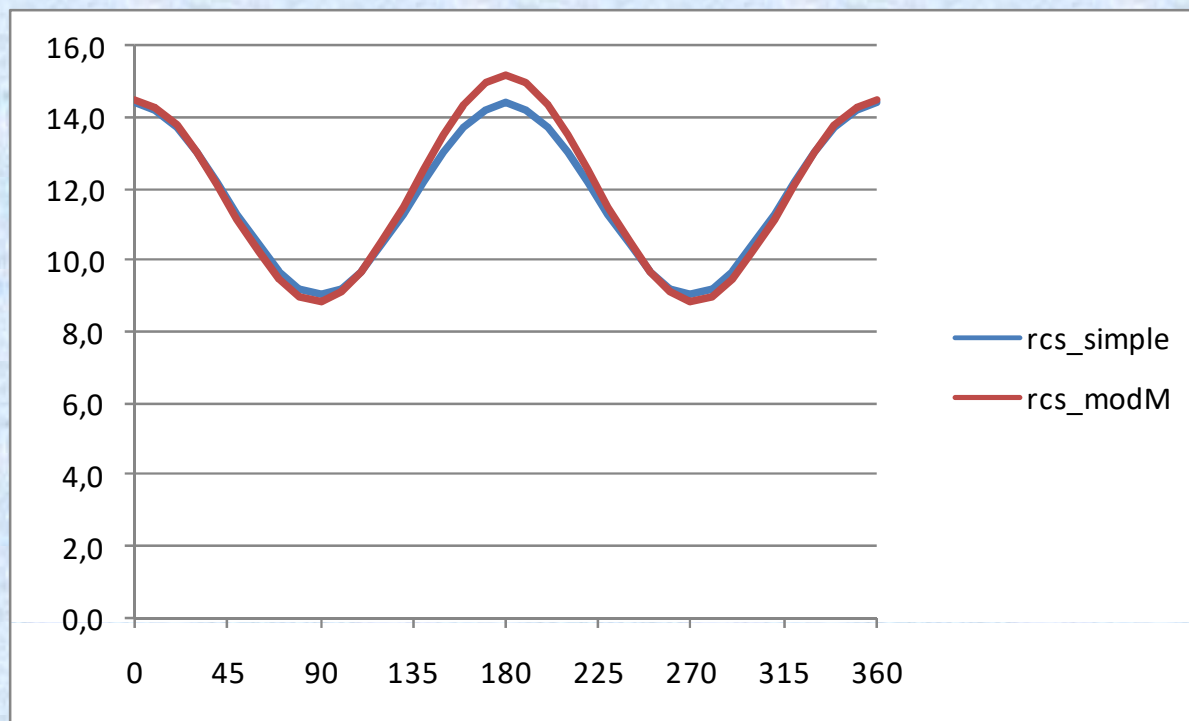


Зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения mss_{xx} от направления распространения волнения

Модель рассеяния

Исходная зависимость сечения обратного рассеяния для угла падения 8° и направления зондирования по оси X от направления распространения волнения (ветра) показана на рисунке синей кривой.

Новая модель дисперсии уклонов крупномасштабного волнения использовалась для вычисления сечения обратного рассеяния, показанного на рисунке красной кривой.



Зависимость сечения обратного рассеяния (нат. ед.) от направления распространения волнения при угле падения 8° и направлении зондирования по оси X .

Таким образом, применение для дисперсии уклонов крупномасштабного волнения новой модельной функции, описывающей азимутальную зависимость, позволяет отразить в модели рассеяния наблюдаемые в экспериментах особенности азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния.

Выводы

Для объяснения азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния при углах падения больше 6° - 7° предложен подход, предполагающий новое описание угловой зависимости дисперсии уклонов.

Азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения может быть описана модельной функцией следующего вида:

$$mss_{xx} = A_x + B_x * \cos(\varphi_w) + C_x * \cos(2\varphi_w)$$

Применение новой модели азимутальной зависимости дисперсии уклонов для вычисления сечения обратного рассеяния позволяет получить обнаруженный в экспериментах эффект неравенства сечений обратного рассеяния от переднего и заднего склона волнового профиля.

В ходе дальнейших исследований будут уточнены значения коэффициентов и их зависимость от скорости приводного ветра.