

## Обработка данных дождевого радиолокатора (PR-радиолокатора) с целью восстановления параметров волнения и ветра

Панфилова М.А., Караев В.Ю., Баландина Г.Н.

Институт прикладной физики РАН, г.Нижний Новгород, ул. Ульянова, д.46  
[marygo@mail.ru](mailto:marygo@mail.ru)

*В данной работе приводятся первые результаты обработки данных дождевого радиолокатора (Precipitation Radar – далее PR) [1]. В качестве исходного использовался массив, включающий данные морских буев (скорость ветра, высоту значительного волнения) и данные сканирующего PR-радиолокатора (зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения) за 2001-2009 годы. Была разработана специальная процедура восстановления дисперсии наклонов крупных волн и сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения. Дисперсия наклонов крупных волн является важной характеристикой волнения и может быть использована для усовершенствования алгоритмов восстановления скорости ветра по радиолокационным данным. В результате обработки данных получена зависимость дисперсии наклонов крупных волн от скорости ветра для электромагнитной волны длиной 2.1 см. Также получено эмпирическое выражение для восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения. Это позволит из накопленных ранее многочисленных альтиметрических данных восстановить информацию о наклонах крупных волн, что расширяет возможности построения и проверки климатических моделей.*

*Radiolocation methods for remote sensing of the sea surface are actively being developed at present, providing more and more information about sea state and near surface wind speed.*

*One can get information about near surface wind speed mainly from scatterometers having a wide swath and working at moderate incidence angles. The unique correspondence between the wind speed and the normalized radar cross section (NRCS) is presupposed. But coming swell does not depend on local wind conditions, the latter leading to the ambiguity in wind retrieving from one-parameter algorithm. Thus, the accuracy enhancement requires introducing the additional parameter that characterizes sea waves. The mean square slope (mss) can play a role of such a parameter.*

*The present study performs the first results of the Precipitation Radar (PR) [1] data processing. PR provides the dependence of NRCS on incidence angle. It allows to obtain the mean square slope of water surface. Special procedure of data processing was developed. The dependence of mss on the wind speed for radio wave length of 2.1 cm and the empirical equation for mss retrieval from the NRCS at zero incidence angle were obtained.*

Радиолокационные методы зондирования морской поверхности активно развиваются, позволяя получать всё больше информации о характеристиках волнения и скорости ветра вблизи морской поверхности. Полученные данные играют важную роль в оперативной метеорологии и в разработке современных климатических моделей.

В настоящее время основным источником информации о поле приповерхностного ветра являются скаттерометры, обладающие широкой полосой обзора и работающие при средних углах падения. Определение скорости ветра происходит по сечению обратного рассеяния. Предполагается, что существует однозначная связь скорости ветра и сечения обратного рассеяния. Однако, если спектральная плотность мелких волн тесно связана со скоростью ветра, то пришедшие волны зыби не зависят от ветра в данной области, что ведет к неоднозначной связи скорости ветра и сечения обратного рассеяния. Это является одной из основных причин ошибок однопараметрического алгоритма. Для повышения точности алгоритма восстановления ветра по радиолокационным данным необходимо ввести в алгоритм дополнительный параметр, характеризующий волнение, например, дисперсию наклонов.

PR-радиолокатор измеряет сечение обратного рассеяния в интервале углов падения

$\pm 17$  градусов. По данным PR-радиолокатора можно восстановить дисперсию наклонов и использовать ее для устранения неоднозначности при восстановлении скорости приповерхностного ветра.

В данной работе приводятся первые результаты обработки данных PR-радиолокатора, запущенного в рамках совместного американо-японского проекта (Tropical Rainfall Measuring Mission). В качестве исходного использовался массив, включающий данные морских буев (скорость ветра, высоту значительного волнения) и данные сканирующего PR-радиолокатора (сечение обратного рассеяния, углы падения) за 2001-2009 годы. Полоса обзора радиолокатора была поделена на участки диаметром 50 км, в центре каждого из участков находится буй. В пределах каждого участка волнение считалось однородным. Для каждого из участков имеется информация о зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения, скорости ветра и высоте значительного волнения. По радиолокационным данным для каждого участка можно восстановить дисперсию наклонов крупных волн и сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения.

В приближении Кирхгофа сечение обратного рассеяния  $\sigma$  зависит от угла падения следующим образом [2]:

$$\sigma(\theta) = RCS_0 \frac{\exp\left[-\frac{tg^2\theta}{2mss_{xx}^2}\right]}{\cos^4\theta}, \quad (1)$$

где  $\theta$  - угол падения,  $RCS_0 = |R_{eff}(0)|^2 / 2\sqrt{mss_{xx}^2 mss_{yy}^2}$  - сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения (radar cross section at zero),  $mss_{xx}$  - дисперсия наклонов (mean square slope) вдоль направления зондирования, а  $mss_{yy}$  - дисперсия наклонов поперёк направления зондирования,  $R_{eff}(0)$  - эффективный коэффициент отражения. В дальнейшем переменную  $mss_{xx}$  будем обозначать просто  $mss$ .

Была разработана процедура восстановления  $mss$  и  $RCS_0$  по спутниковым данным, причём особое внимание уделялось точности восстанавливаемых величин. Во-первых, были отсеяны измерения при  $\theta > 12.2^\circ$ , так как при больших углах необходимо учитывать ещё брэгговскую компоненту рассеяния, и при  $\theta < 3^\circ$ , так как при малых углах  $\sigma$  слабо зависит от  $\theta$ .

Чтобы оценить точность восстановленного значения  $mss$ , был разработан специальный алгоритм. Его идея заключается в том, что дисперсия наклонов вычисляется двумя независимыми методами. Первый метод сводится к стандартной процедуре линейной регрессии. Второй предполагает, во-первых, усреднение сечения обратного рассеяния для повторяющихся углов падения в пределах одного участка, во-вторых, вычисление по всем возможным парам точек  $((\theta_1, \sigma_1); (\theta_2, \sigma_2))$  значений  $mss$ . Затем две полученные оценки сравниваются, и если разница между ними не превосходит заданную погрешность, то работа с данными продолжается, если же оценки сильно различаются, то данные для этого участка отбраковываются.

Важным этапом обработки было устранение случайных промахов измерений – выбросов. Для этого применялось четыре критерия: стандартный критерий [3], критерии Ирвина, Романовского и Граббса.

Среди всех обработанных данных были выделены те, что лежат наиболее близко к случаю полностью развитого волнения. Для каждой скорости ветра вычислялась высота полностью развитого волнения по формуле

$$H_{dev} = -0.0125 + 0.000926U_{10} + 0.02337U_{10}^2 + 0.0000006U_{10}^3 + 0.028\exp(-U_{10}), \quad (2)$$

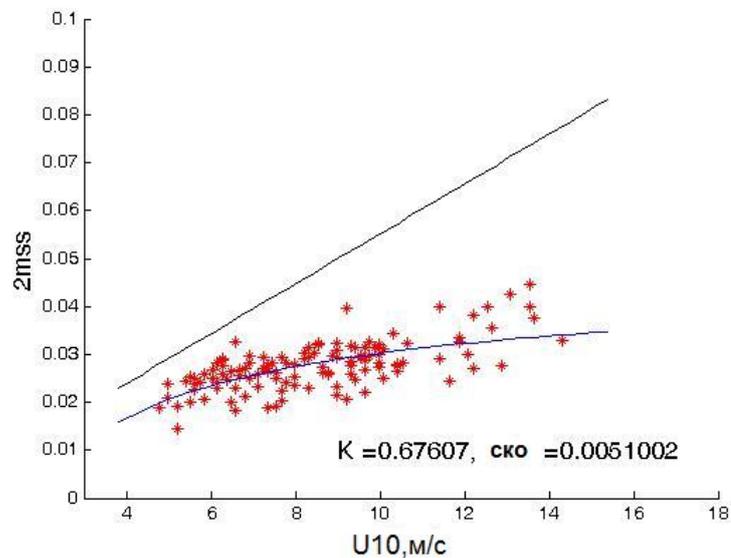
и если измеренное значение волнения отличалась от вычисленного в пределах заданного значения, в нашем случае 10% от теоретической величины, считаем волнение полностью развитым. Для этого случая была получена эмпирическая зависимость полной дисперсии наклонов от скорости ветра. Измеренная нами дисперсия наклонов  $mss$  соответствует произвольному направлению зондирования относительно направления ветра, поэтому если теперь  $mss_{xx}$  – дисперсия наклонов вдоль ветра, а  $mss_{yy}$  – дисперсия поперёк направления ветра, то удвоенное измеренное значение дисперсии лежит в интервале  $2mss_{yy} \leq 2mss \leq 2mss_{xx}$ .

Но нас интересует полная дисперсия наклонов  $mss_{tot} = mss_{xx} + mss_{yy}$ . Причём она также лежит в пределах  $2mss_{yy} < mss_{tot} < 2mss_{xx}$ .

Экспериментальная зависимость удвоенной дисперсии наклонов от скорости ветра на высоте 10 м представлена на рис.1. В предположении, что азимутальные углы между направлением ветра и направлением зондирования распределены равномерно, мы получили, проведя регрессию по экспериментальным данным, эмпирическое выражение для полной дисперсии наклонов:

$$mss_{tot} = 0.05357 - 0.07384U_{10}^{-1/2}, \quad (3)$$

Данная зависимость представлена на рис.1 нижней кривой и соответствует длине волны излучения радиолокатора 2.1 см. Для сравнения приводится зависимость, полученная Коксом и Манком [4] для длин волн оптического диапазона, которая проходит выше на рис.1. Экспериментальные данные характеризуются коэффициентом корреляции  $K$ , а качество проведённой регрессии – величиной среднеквадратического отклонения  $ско$  восстановленных значений от реальных, значения которых также приведены на рис.1.



**Рис.1. Зависимость удвоенной дисперсии наклонов крупных волн от скорости ветра на высоте 10 метров**

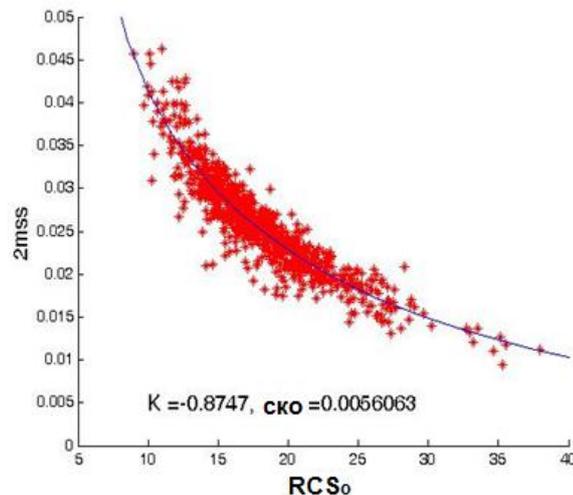
Было обнаружено, что пересчитанные значения  $RCS_0$  хорошо коррелируют с дисперсией наклонов. Это значит, что можно восстанавливать полную дисперсию наклонов непосредственно по значениям  $RCS_0$  по эмпирической формуле, полученной для всех случаев

$$mss_{tot} = -0.00591 + 0.74352 / RCS_0 - 4.07817 / RCS_0^2 + 13.7317 / RCS_0^3. \quad (4)$$

Экспериментальная зависимость дисперсии наклонов от сечения обратного

рассеяния приведена на рис.2 звёздочками, а эмпирическая зависимость - сплошной линией. Для этих данных также приводятся значения  $K$  и  $ско$ .

Полученный результат имеет важное значение, так как позволит из накопленных ранее многочисленных альтиметрических данных восстановить информацию о наклонах крупных волн, что расширяет возможности построения и проверки климатических моделей.



**Рис. 2. Зависимость дисперсии наклонов крупных волн от сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения**

В результате проведённых исследований был предложен алгоритм восстановления дисперсии наклонов крупных волн и сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения по данным сканирующего PR-радиолокатора. По данным, полученным в результате обработки, найдена зависимость дисперсии наклонов крупных волн в случае полностью развитого волнения от скорости ветра для электромагнитных волн длиной 2.1 см. Также получено эмпирическое выражение для восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения. В будущем планируется использовать значения дисперсий наклонов крупных волн для разработки алгоритмов восстановления скорости ветра.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 10-05-00181-а и 11-05-97014-р-п-а) и программы ОФН РАН «Радиофизика».*

#### **Литература**

1. TRMM Data Users Handbook, National Space Development Agency of Japan Earth observation center, 2001
2. Ф.Г. Басс, И.М. Фукс, Рассеяние волн на статистически неровной поверхности, «Наука», 1972
3. Ю.Р. Чашкин, Математическая статистика. Анализ и обработка данных, Ростов н/Д: Феникс, 2010, с. 89
4. Ch. Cox, W. Munk, Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter, Journal of the Optical Society of America, 1954, Vol.44, N 11, pp. 838-850