

# Метод восстановления наклонов водной поверхности при полете с переменной скоростью

В.Ю. Караев, М.Б. Каневский, Е.М. Мешков

*Институт прикладной физики РАН  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
E-mail: [volody@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:volody@hydro.appl.sci-nnov.ru)*

Рассматривается новая схема проведения измерений доплеровским радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны, позволяющая восстанавливать статистические характеристики рассеивающей водной поверхности, и отличающаяся тем, что полет происходит по прямой траектории. Изменение скорости движения во время измерений позволяет получить полную систему уравнений, связывающих ширину доплеровского спектра, скорость движения носителя и статистические характеристики поверхности. Разработаны новые алгоритмы восстановления дисперсии наклонов рассеивающей поверхности, а также коэффициента корреляции вертикальной составляющей орбитальной скорости и наклона водной поверхности вдоль траектории движения. Полный алгоритм позволяет восстановить дисперсию наклонов и коэффициент корреляции при условии точного измерения скоростей движения и ширины доплеровских спектров. Линейные алгоритмы позволяют измерить только дисперсию наклонов. Точность восстановления дисперсии наклонов возрастает при увеличении скорости движения. Численное моделирование подтвердило работоспособность алгоритмов в условиях неточного задания входных параметров.

**Ключевые слова:** радиолокационное зондирование, морское волнение, алгоритмы обработки, параметры волнения.

## Введение

В ходе ранее проведенных теоретических исследований были разработаны алгоритмы восстановления дисперсии наклонов водной поверхности по ширине доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала сантиметрового диапазона при измерении с летательных аппаратов. Для измерений предполагается использовать доплеровский радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны.

Обработка данных летных экспериментов подтвердила работоспособность первых алгоритмов [1-3]. Определенным недостатком новых дистанционных методов измерения дисперсии наклонов является то, что необходимо пролететь над одним и тем же участком морской поверхности два или три раза, что не всегда представляется возможным. Это стимулировало поиск возможностей восстановления параметров волнения без значительного отклонения от направления полета за счет модификации схемы измерений и алгоритма обработки данных.

В ходе проведенных экспериментов скорость движения вертолета старались выдерживать постоянной, однако полностью избавиться от этой проблемы не удалось. Сложность практической реализации движения с постоянной скоростью подтолкнула к рассмотрению возможности использования неравномерности движения в новом алгоритме. Проведенный анализ показал, что если «управлять» изменением скорости движения, то появляется возможность восстанавливать дисперсию наклонов рассеивающей поверхности. В этом случае для обработки необходимо использовать данные о ширине доплеровского спектра, полученные не при разных азимутальных углах относительно направления распространения волнения, как в разработанных ранее алгоритмах, а полученные при разных скоростях полета при прямолинейном движении.

В данной статье обсуждаются алгоритмы восстановления дисперсии наклонов при движении радиолокатора с переменной скоростью.

## Постановка задачи

Рассмотрим схему организации эксперимента, показанную на рис. 1. Радиолокатор движется горизонтально в плоскости  $YZ$  со скоростью  $V$ . Угол падения равен нулю, и доминирующим является квазизеркальный механизм рассеяния. В данном случае расстояние до центра рассеивающей площадки  $R_0$  совпадает с высотой полета. Подробно исходная постановка задачи обсуждается, например, в [2, 3].

Приведем формулу для ширины доплеровского спектра в рассматриваемой схеме измерений [4, 5]:

$$\Delta f_{10} = \frac{4\sqrt{2 \cdot \ln 10}}{\lambda} \cdot \left[ \sigma_{tt}^2 - \frac{K_{xt}^2}{\sigma_{xx}^2} - \frac{K_{yt}^2}{\sigma_{yy}^2} + \frac{K_{xt}^2 \delta_y^2}{\sigma_{xx}^2 (5,52 \sigma_{xx}^2 + \delta_y^2)} + \frac{\delta_x^2 \sigma_{yy}^2}{(5,52 \sigma_{yy}^2 + \delta_x^2)} \cdot \left( \frac{K_{yt}}{\sigma_{yy}^2} - V \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны радиолокатора. Диаграмма направленности антенны предполагается гауссовой, где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  – ширина диаграммы направленности на уровне 0,5 по мощности вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно и  $\delta_x \gg \delta_y$ . Угол поворота антенны равен  $90^\circ$ , поэтому широкий раскрыв диаграммы направленности ориентирован вдоль оси  $Y$ .

Для описания взволнованной водной поверхности используются ключевые статистические характеристики, вычисленные для крупномасштабного, по сравнению с длиной волны падающего излучения, волнения. Это дисперсии наклонов вдоль осей  $X$  ( $\sigma_{xx}^2$ ) и  $Y$  ( $\sigma_{yy}^2$ ), дисперсия орбитальных скоростей  $\sigma_{tt}^2$  и коэффициенты корреляции наклонов вдоль осей  $X$  и  $Y$  и вертикальной составляющей орбитальной скорости  $K_{xt}(\tau)$  и  $K_{yt}(\tau)$  в точке  $\tau = 0$  (далее коэффициент корреляции).

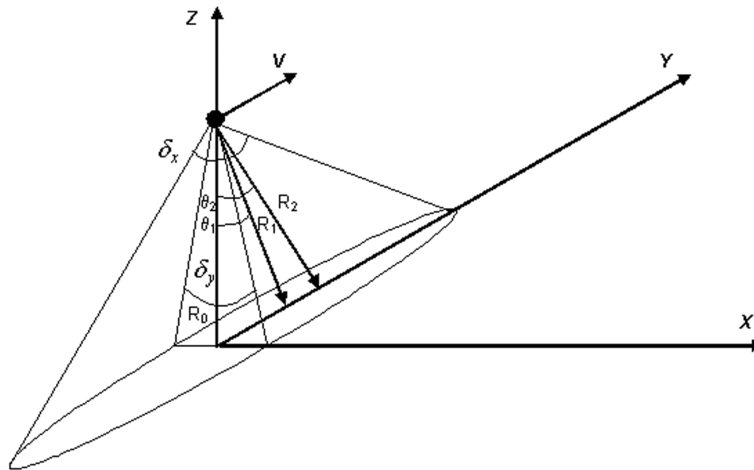


Рис. 1. Схема измерений

В формуле (1) пять неизвестных и для их нахождения необходимо иметь систему уравнений. Для увеличения числа исходных уравнений в качестве параметра используем скорость движения радиолокатора, т.е. нестабильность скорости движения радиолокатора во время полета, рассматриваемое ранее как помеха, позволит получить необходимое число уравнений.

## Полный алгоритм

Движение носителя происходит по прямой траектории и во время полета изменяется скорость движения. Предположим, что на рассматриваемом участке изменение скорости движения произошло два раза, т.е. в нашем распоряжении есть три значения ширины доплеровского спектра:  $\Delta f_{10a}$ ,  $\Delta f_{10b}$  и  $\Delta f_{10c}$ . Индексы «a», «b» и «c» отражают различие в скорости движения. Будем считать, что  $V_a < V_b < V_c$ .

После выполнения последовательных преобразований получим следующие формулы для коэффициента корреляции  $K_{yt}$  и дисперсии наклонов  $\sigma_{yy}^2$ :

$$K_{yt} = \frac{5,52 \cdot \sigma_{yy}^2 + \delta_x^2}{4\delta_x^2 \cdot (V_b - V_a)} \cdot \left[ \frac{\lambda^2 (\Delta f_{10a}^2 - \Delta f_{10b}^2)}{16 \cdot \ln 10} + \frac{2\delta_x^2 \sigma_{yy}^2 (V_b^2 - V_a^2)}{5,52 \sigma_{yy}^2 + \delta_x^2} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{A_0 \cdot \delta_x^2}{32\delta_x^2 \ln 10 \cdot (V_c - V_a)(V_b - V_a)(V_b - V_c) - 5,52 \cdot A_0}, \quad (3)$$

где

$$A_0 = \lambda^2 \cdot (\Delta f_{10a}^2 (V_b - V_c) + \Delta f_{10b}^2 (V_c - V_a) - \Delta f_{10c}^2 (V_b - V_a)).$$

Таким образом, два раза изменив скорость движения во время полета, определим дисперсию наклонов вдоль траектории движения и вычислим коэффициент корреляции наклонов и вертикальной составляющей орбитальной скорости.

Следовательно, изменение скорости полета позволяет восстановить коэффициент корреляции и дисперсию наклонов вдоль траектории движения в случае прямолинейного движения радиолокатора и неподвижной антенны с помощью «полного» алгоритма. Алгоритм назван «полным», чтобы отличить от «линейных» алгоритмов, которые будут получены дальше.

## Моделирование

Для проверки разработанного алгоритма воспользуемся численным моделированием.

Для описания ветрового волнения применяется частотно-угловая модель спектра волнения. Для расчетов заданы следующие характеристики радиолокатора: длина волны 0,03 м, ширина диаграммы направленности антенны  $1^\circ \times 20^\circ$ , угол поворота антенны –  $90^\circ$ .

По скорости ветра вычисляются статистические характеристики волнения и, задав скорость полета, вычисляем ширину доплеровского спектра для данного волнения.

На рис. 2 приведены результаты расчетов зависимости ширины доплеровского спектра от скорости движения носителя для трех скоростей ветра. Сплошная линия показывает зависимость для скорости ветра 5 м/с, пунктир – для 10 м/с и штриховой линией показаны результаты расчетов для скорости ветра 15 м/с.

Из рисунка видно, что зависимость ширины доплеровского спектра от скорости движения носителя близка к линейной, а разный угол наклона «прямых» связан с непосредственно с волнением: чем интенсивнее волнение, тем быстрее растет ширина доплеровского спектра.

## Линейные алгоритмы

Первый линейный алгоритм можно получить, если в исходной формуле (1) сразу пренебречь членом, связанным с фазовой скоростью движения волн. Тогда после выполнения преобразований, как при выводе формул «полного» алгоритма, получим следующее выражение для дисперсии наклонов:

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_x^2 \lambda^2 (\Delta f_{10b}^2 - \Delta f_{10a}^2)}{32 \delta_x^2 \ln 10 \cdot (V_b^2 - V_a^2) - 5,52 \lambda^2 (\Delta f_{10b}^2 - \Delta f_{10a}^2)} . \quad (4)$$

В этом случае для определения дисперсии наклонов требуется одно изменение скорости, т.е. всего два уравнения.

Совсем простой линейный алгоритм может быть получен, если в формуле (1) оставить только один член, содержащий скорость движения носителя, а остальными пренебречь. В этом случае получим следующую формулу для дисперсии наклонов:

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{\delta_x^2 \lambda^2 \Delta f_{10a}^2}{32 \delta_x^2 \ln 10 \cdot V_a^2 - 5,52 \lambda^2 \Delta f_{10a}^2} . \quad (5)$$

Для работы второго линейного алгоритма не требуется изменения скорости полета, но за это приходится расплачиваться невысокой точностью восстановления при малых скоростях движения.

На рис. 3 дано сравнение истинной и восстановленной по линейным алгоритмам (4)-(5) дисперсии наклонов. Расчеты выполнены для скорости ветра 5 м/с. По горизонтальной оси отложена скорость движения.

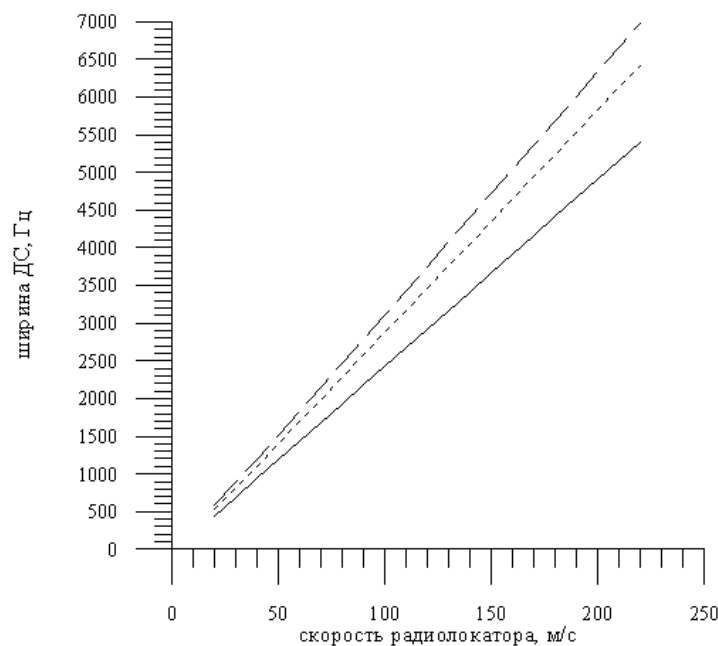


Рис. 2. Зависимость ширины доплеровского спектра от скорости движения радиолокатора для трех скоростей ветра: 1 – скорость ветра 5 м/с, 2 – 10 м/с, 3 – 15 м/с. Движение происходит по направлению распространения волнения

Пунктиром (прямая) показано истинное значение дисперсии наклонов, восстановленное с помощью полного алгоритма, а две кривые соответствуют восстановленным с помощью «линейных» алгоритмов величинам. Результаты восстановления первым линейным алгоритмом показаны сплошной кривой, а пунктиром показаны результаты работы второго линейного алгоритма.

Из рисунка видно, что погрешность уменьшается при увеличении скорости движения носителя. При скорости 30 м/с ошибка составляет примерно 10,5%, а при 100 м/с всего 3,5% (1 линейный алгоритм). Второй линейный алгоритм может применяться только при высокой скорости движения носителя.

В целом, являясь более простыми, линейные алгоритмы могут применяться для первичной оценки дисперсии наклонов, если помнить о присущих им ограничениях. Их преимуществом, по сравнению с полным алгоритмом, является то, что для их работы достаточно одного изменения скорости движения во время полета (первый линейный алгоритм) или необходимо быстро двигаться с постоянной скоростью (второй линейный алгоритм).

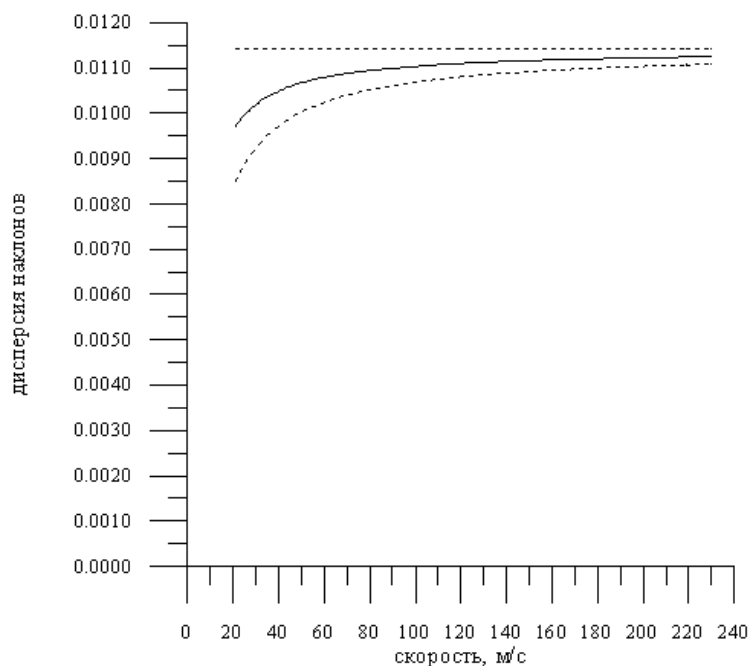


Рис. 3. Зависимость «восстановленной» дисперсии наклонов от скорости движения носителя. Сплошная кривая - первой линейный алгоритм, пунктир - второй линейный алгоритм. Горизонтальная прямая – истинное значение дисперсии наклонов (скорость ветра 5 м/с)

### Заключение

В ходе проведенного теоретического анализа свойств доплеровского спектра радиолокационного сигнала, отраженного взволнованной водной поверхностью, были разработаны новые алгоритмы восстановления дисперсии наклонов рассеивающей поверхности, а также коэффициента корреляции вертикальной составляющей орбитальной скорости и наклона водной поверхности вдоль траектории движения.

Для организации измерений предложен новый подход, использующий изменение скорости движения радиолокатора во время полета над водной поверхностью по прямой траектории.

Полный алгоритм в качестве входных параметров использует три различные скорости движения и соответствующие им ширины доплеровских спектров. Это позволяет восстановить дисперсию наклонов и коэффициент корреляции при условии точного измерения скорости движения и ширины доплеровских спектров. Погрешности определения входных параметров алгоритма сильнее всего влияют на восстановление коэффициента корреляции и, в большинстве случаев, точность будет низкой. Однако отметим, что коэффициент корреляции является знакопеременным и смена знака происходит вблизи истинного значения скорости движения. Дисперсия наклонов, восстановленная при этом значении скорости движения, близка к правильной. Следовательно, вариация по скорости движения носителя позволит оценить истинное значение скорости движения и определить дисперсию наклонов при выполнении условия равенства нулю коэффициента корреляции.

Оценки показали, что чем выше скорость полета, тем точнее восстанавливается дисперсия наклонов.

Для работы первого линейного алгоритма достаточно измерений на двух скоростях движения. Алгоритмы являются достаточно устойчивыми к погрешностям входных параметров: скорости движения и ширины доплеровского спектра. Однако для выбора наиболее точного значения необходимо брать значение, соответствующее «смене» знака коэффициента корреляции в полном алгоритме. Отметим, что при полете перпендикулярно направлению распространения волнения, линейный алгоритм является не приближенным, а точным.

При высокой скорости движения все алгоритмы демонстрируют хорошую точность восстановления дисперсии наклонов.

Дополнительным критерием правильности восстановления дисперсии наклонов является близость величин, вычисленных разными алгоритмами.

В разработанных ранее алгоритмах, использующих изменение направления движения, с высокой точностью восстанавливается коэффициент корреляции, поэтому использование двух алгоритмов позволяет восстановить с хорошей точностью дисперсию наклонов и коэффициент корреляции, используя при обработке только ширину доплеровского спектра.

Для проверки алгоритмов будет выполнен натурный эксперимент, и результаты обработки будут обсуждаться в нашей следующей работе.

Работа поддержана научной школой НШ-1244.2008.2.

## Литература

1. Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М., Титов В.И. Применение доплеровского спектра отраженного СВЧ-сигнала для восстановления параметров взволнованной водной поверхности. Препринт ИПФ РАН, № 725, Нижний Новгород, 2007, 20 с.
2. Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М., Титов В.И., Гольдблат В.Ю., Зуйкова Э.М., Баландина Г.Н. Проверка алгоритмов восстановления дисперсии наклонов поверхностного волнения в вертолетном эксперименте. Препринт ИПФ РАН № 715, Нижний Новгород, 2006, 24 с.
3. Караев В., Каневский М., Мешков Е. Восстановление параметров поверхностного волнения по результатам радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса, 2008. №1. С. 1-12.
4. Караев В.Ю., Каневский М.Б. К вопросу о радиолокационном определении параметров морского волнения // Исследование Земли из космоса, 1999. №4. С.14-21.
5. Мешков Е.М., Караев В.Ю. Определение параметров морского волнения по доплеровскому спектру радиолокационного СВЧ-сигнала, отраженного водной поверхностью // Изв. Вузов, сер. Радиофизика, 2004. Т. 47. №3. С. 231-244.

## Measurement of variance of water surface slopes from a platform moving with variable speed

V.Yu. Karaev, M.B. Kanevsky, E.M. Meshkov

*Institute of applied physics RAS, Nizhny Novgorod*

The new scheme of measurement of statistical parameters of rough water surface by the Doppler microwave radar with knife-beam antenna is analyzed. Scheme differs from others than flight occurs along straight line. Use of variable speed of movement during measurements allows to receive a full system of the equations containing width of a Doppler spectrum, speed of movement of the radar and statistical parameters of a water surface. New algorithms of retrieval of a variance of backscattering surface slopes, and also a coefficient of correlation of vertical component of orbital velocity and a slope along a movement direction are developed. The full algorithm allows to restore a variance of slopes and coefficient of correlation under condition of exact measurement of speeds of movement and width of Doppler spectra. Linear algorithms allow to measure only a variance of slopes. Accuracy of retrieval of a variance of slopes increases with increase of speed of movement. Numerical modeling has confirmed working capacity of algorithms in the conditions of the inexact definition of entrance parameters.

**Keywords:** radar probing, sea waves, retrieval algorithm, parameters of sea waves.