

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРИ БИСТАТИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ



Институт прикладной физики РАН,  
Нижний Новгород

Титченко Юрий А., Караев В.Ю.

## 1 АННОТАЦИЯ

- Целью данной работы является расширение возможностей ранее развитого подхода к решению прямой и обратной задачи дистанционного зондирования морской поверхности на бистатистический случай с движущимся приемником и излучателем.
- В работе приведены формулы для расчета бистатистического сечения рассеяния, ширины и смещения доплеровского спектра сигнала, отраженного морской поверхностью.
- Особенностями подхода является включение в рассмотрение диаграмм направленности излучающей и приемной антенн, что позволяет получить аналитические формулы при решении обратной задачи, выбрать оптимальную схему измерений. Для описания морской поверхности используются статистические моменты второго порядка: дисперсии наклонов в двух взаимно

перпендикулярных плоскостях, дисперсия вертикальной составляющей орбитальной скорости, коэффициенты корреляции между вертикальной составляющей орбитальной скорости и наклонами в одной из плоскостей, а также коэффициент корреляции между наклонами в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

- Приводится пример схемы измерений, для которой получаются аналитические выражения для восстановления всех статистических моментов второго порядка, описывающих морскую поверхность.
- Результаты получены для сантиметровых волн излучения и могут применяться как в акустическом так и электромагнитном случае.

## 2 ВВЕДЕНИЕ

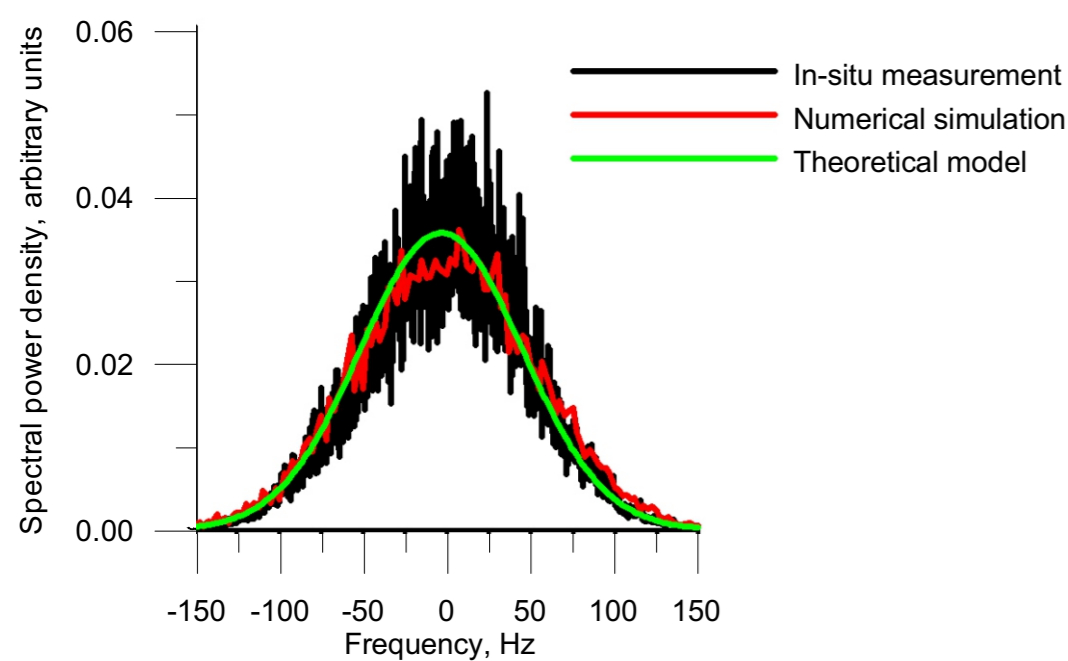
Задача расчета спектральных и энергетических характеристик зеркально отраженного излучения в моностатической постановке задачи решается в нашей научной группе довольно давно.

Были получены выражения для сечения обратного рассеяния, ширины и смещения доплеровского спектра отраженного морской поверхностью излучения для моностатического зондирования с учетом скорости движения локатора.

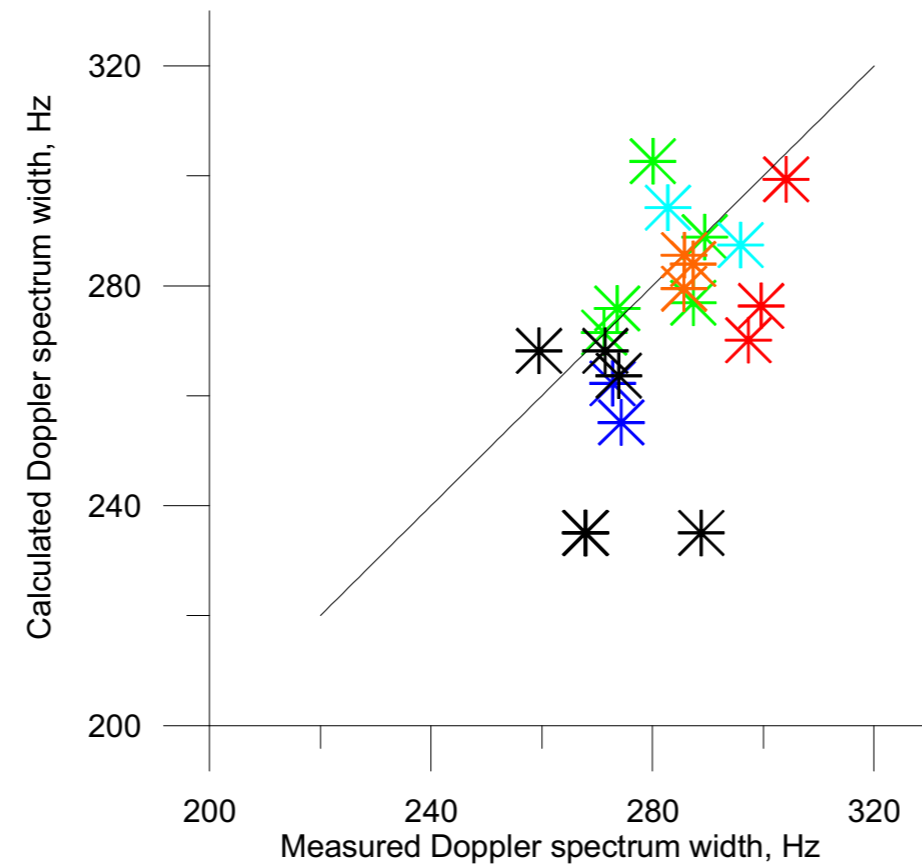
Были показаны возможности решения обратной задачи по восстановлению неизвестных параметров волнения.

Особенностями разработанного подхода является описание водной поверхности 6 статистическими параметрами и учет диаграмм направленности антенн, в том числе и не симметричных.

Предложенный подход решения прямой и обратной задачи проверялся сравнением с результатами натурных измерений.



Пример измеренного доплеровского спектра с результатами расчетов по модели и с помощью численного моделирования эксперимента.



Сравнение ширины доплеровского спектра полученной в результате натурных измерений с расчетом по модели доплеровского спектра для различных азимутальных углов зондирования радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны. Синий - 0°, Красный - 90°, Черный - 180°, Оранжевый - 210°, Голубой - 240°, Зеленый - 270°.

В данной работе рассмотрено применение данного подхода к бистатистической постановке задачи с движущимся приемником и излучателем. Например эта схема измерений соответствует работе по анализу отраженного сигнала спутниковых навигационных систем (GNSS-R), стремительно развивающейся в последнее время.

## 3 РАССЕЯНИЕ ВОЛН ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Экспериментальные измерения показали, что при рассеянии акустических и электромагнитных волн морской поверхностью можно выделить четыре области. При отражении в зеркальном направлении рассеяние имеет квазизеркальный характер и хорошо описывается в приближении касательной плоскости (приближение Кирхгофа). При отклонении от зеркального направления более 30° доминирует резонансное рассеяние, описываемое методом возмущений (так называемое Бреговское рассеяние). В промежуточной области 15-30° для описания рассеяния необходимо учитывать оба эффекта одновременно. При затенениях и многократных переотражениях используют другие подходы.

В данной работе ограничимся квазизеркальной областью отражения где характеристики отраженного сигнала могут быть рассчитаны в приближении Кирхгофа (Метод касательной плоскости).

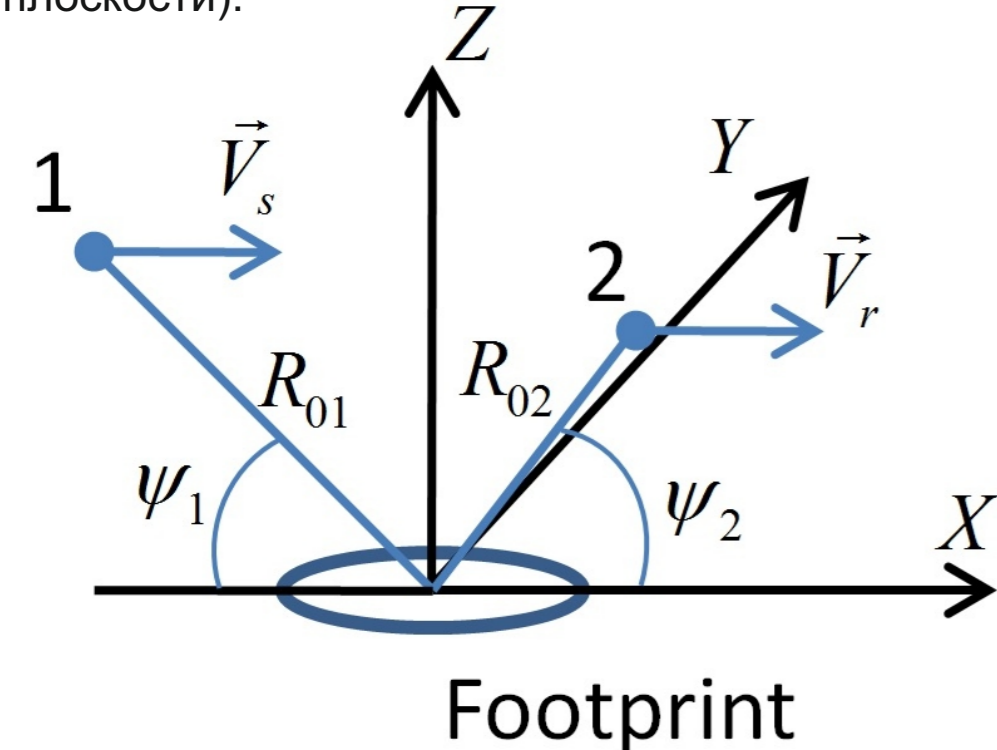


Схема измерений

- 1 - точка излучения (передатчик);
- 2 - точка приема (приемник);
- $\zeta(\vec{r})$  - отражающая поверхность;
- $\psi_1$  and  $\psi_2$  - скользящие углы излучения и приема;

Передатчик излучает сферическую волну с волновым числом  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения.

Рассмотрим несимметричную антенну ориентированную либо вдоль либо поперек направления распространения волнения.

В приближении Кирхгофа поле принятое в точке 2 может быть выражено с помощью функции Грина:

$$U(t) = \frac{U_0 q^2 V_{eff}}{4\pi R_{01}^2 R_{02}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_1(x, y) G_2(x, y) e^{ik(R_1 + R_2)} dx dy$$

$V_{eff}$  - эффективный коэффициент отражения. Дополнительно к физическим параметрам сред на границе раздела он зависит от интенсивности маломасштабных поверхностных волн учитывая ослабление квазизеркальной компоненты за счет Бреговского рассеяния на мелкой ряби расположенной на крупных волнах;  
 $U_0$  - амплитуда излученного поля;  
 $\vec{q} = -2k\nabla R_0$  - вектор рассеяния;

$R_{0i}$  - расстояние от источника ( $i=1$ ) и приемника ( $i=2$ ) до центра рассеивающей площадки (0,0,0);  
 $R_i$  - расстояние от текущей точки на поверхности  $\zeta(\vec{r})$  до излучателя при  $i=1$  или до приемника при  $i=2$ ;  
 $G_i$  - нормированные гауссовы диаграммы направленности (ДН) антенн, задающие распределение амплитуды падающего ( $i=1$ ) и отраженного ( $i=2$ ) поля на поверхности  $z=0$  в зоне Фраунгофера:

$$G_i(x, y) = \exp \left\{ -1.38 \left( \frac{\sin^2 \psi_i}{R_{0i}^2 \delta_{xi}^2} x^2 + \frac{y^2}{R_{0i}^2 \delta_{yi}^2} \right) \right\}$$

$\delta_{xi}$  и  $\delta_{yi}$  - ширины ДН антенн на уровне половинной мощности для приемной ( $i=2$ ) и излучающей ( $i=1$ ) антенн в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Нормированное бистатистическое сечение рассеяния вычисляется из корреляционной функции принятого поля:

$$\sigma_0 = \frac{|V_{eff}|^2}{2} \sqrt{\left( \sigma_{yy}^2 + \frac{C_{Ry}}{22.08 \sin^2 \psi} \right) \left( \sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}}{22.08} \right)}$$

$C_{Rx} = \frac{(R_{02} + R_{01})^2 \delta_{x1}^2 \delta_{x2}^2}{(R_{02}^2 \delta_{x2}^2 + R_{01}^2 \delta_{x1}^2)}$  и  $C_{Ry} = \frac{(R_{02} + R_{01})^2 \delta_{y1}^2 \delta_{y2}^2}{(R_{02}^2 \delta_{y2}^2 + R_{01}^2 \delta_{y1}^2)}$  - эффективные ширины ДН антенн. В случае равных дистанций до приемника и излучателя эффективные ширины ДН являются гармоническим средним соответствующих ширин ДН. Также в большинстве случаев работы с отраженным сигналом спутниковой навигации эффективные ширины ДН равны  $C_{Rx} = \delta_{x1}^2, C_{Ry} = \delta_{y1}^2$ ;  
 $\sigma_{xx} = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)$ ,  $\sigma_{yy} = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)$  дисперсии наклонов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Доплеровский спектр (ДС) вычисляется как Фурье преобразование корреляционной функции принятого поля. Формула для ширины ДС на уровне -10 дБ от максимума:

$$\Delta f_{10} = \frac{4 \sin \psi \sqrt{2 \ln 10}}{\lambda} \times \sqrt{\sigma_{yy}^2 + \frac{0.69 C_{Ry}}{k^2} \left( \frac{K_{yy}}{\sigma_{yy}^2 + \frac{C_{Ry}}{22.08 \sin^2 \psi}} \right) \left( \sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}}{22.08} \right)}$$

$C_{Ry} = \frac{(V_{r1})^2}{R_{01}^2 \delta_{y1}^2} + \frac{(V_{r2})^2}{R_{02}^2 \delta_{y2}^2}$  и  $C_{Rx} = \frac{(V_{r1} R_{02} + R_{01} V_{r2})^2 \delta_{x1}^2 \delta_{x2}^2}{R_{01}^2 \delta_{x1}^2 + R_{02}^2 \delta_{x2}^2}$  - некоторые коэффициенты, зависящие от постановки задачи, в большинстве случаев - анализа спутниковых навигационных сигналов, равны

$C_{Ry} = V_{r1}^2 \delta_{y1}^2$ ,  $C_{Rx} = \frac{(V_{r1})^2}{R_{01}^2 \delta_{x1}^2}$   
 $\sigma_{xx} = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)$ ,  $\sigma_{yy} = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)$  - дисперсия вертикальных скоростей отражающей поверхности;

$K_{xx} = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)$ ,  $K_{yy} = \left( \frac{\partial \zeta}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)$  коэффициенты корреляции между наклонами и вертикальной скоростью отражающей поверхности.

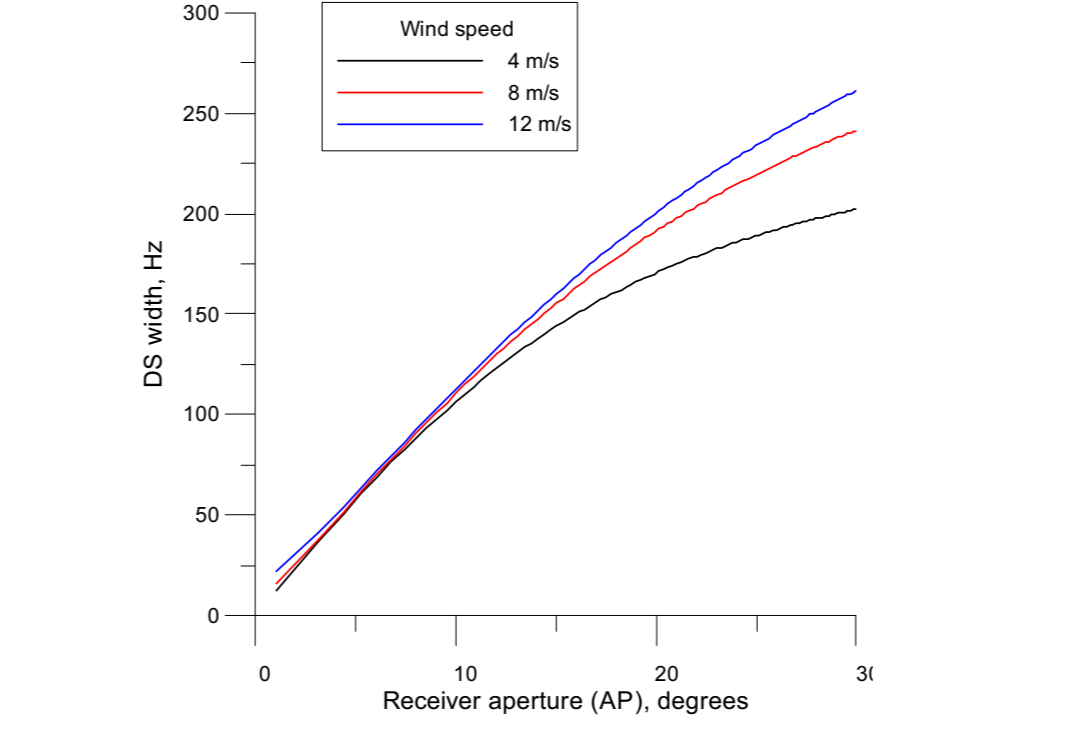
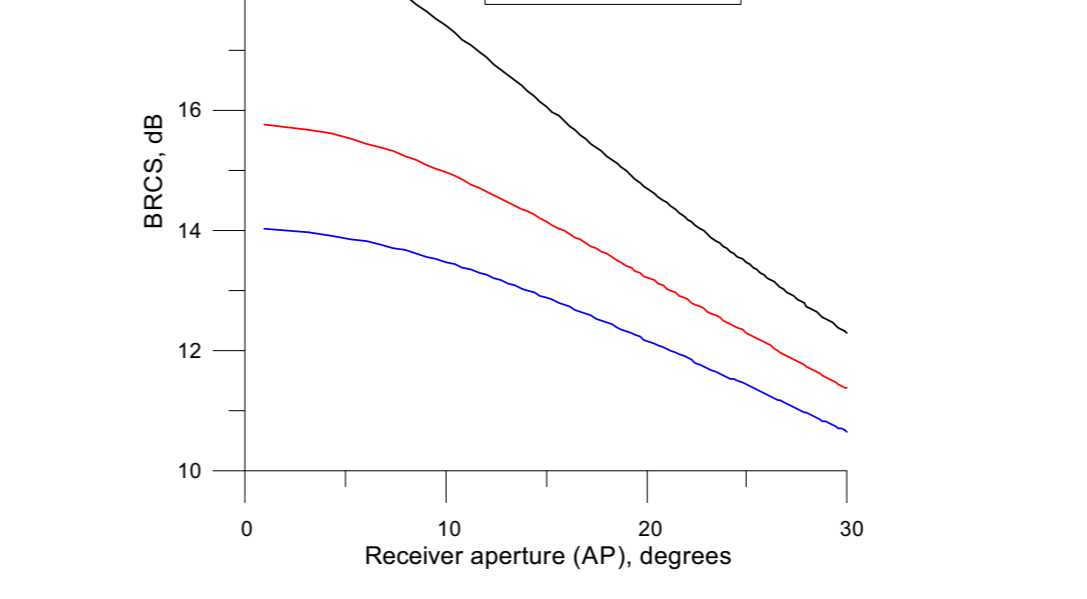
Выражение для смещения ДС выглядит следующим образом:

$$f_{sh} = \frac{k}{2\pi} \cos \psi (V_x - V_r)$$

Смещение ДС при зеркальном отражении не зависит от параметров отражающей поверхности, поэтому эта характеристика не будет использоваться для решения обратной задачи в данной схеме измерений. Однако тот факт, что смещение зависит от разности скорости приемника и излучателя, может использоваться в практических целях.

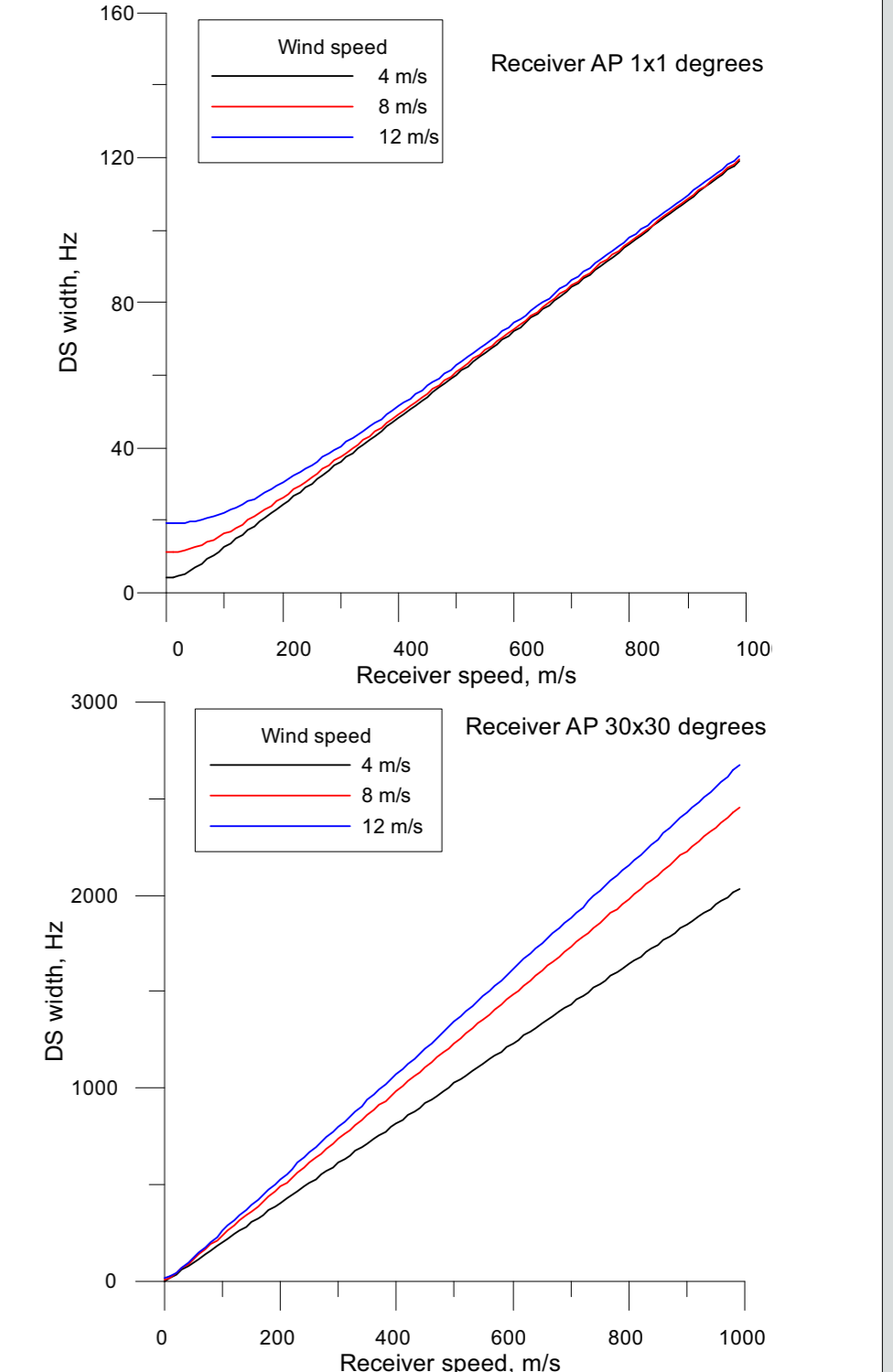
Бистатистическое сечение рассеяния и ширина ДС полностью определяются параметрами отражающей поверхности и схемой измерения. Таким образом можно выбрать схему измерений для восстановления неизвестных параметров отражающей водной поверхности. Рассмотрим некоторые зависимости характеристик рассеяния:

Зависимости получены для расстояния до излучателя 20000 км, дистанции до приемника 5 км, скорости излучателя 4 км/с и длины излученной волны 23 см.

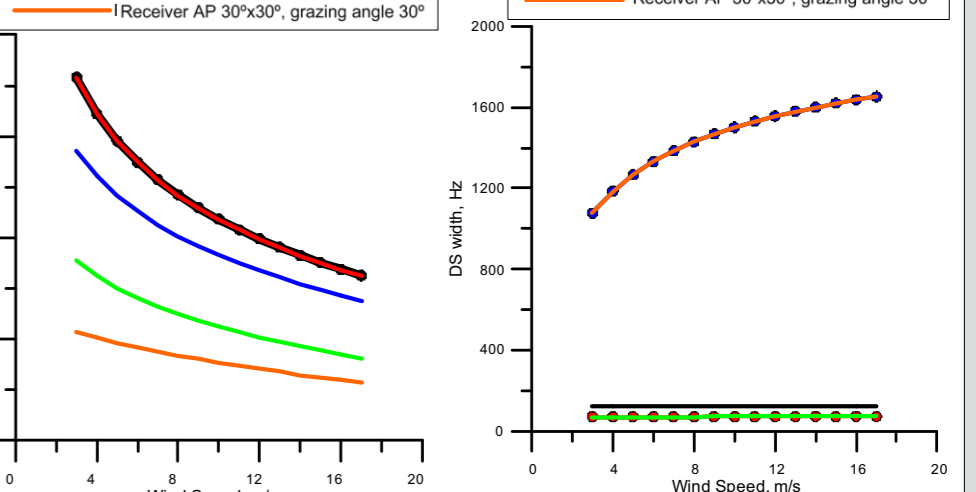


Зависимости бистатистического сечения рассеяния и ширины ДС от раскрытия симметричной ДН приемной антенны. Скорость приемника 100 м/с.

Увеличение ДН антенны приемника приводит к увеличению чувствительности ширины ДС к скоростям ветра. Одновременно увеличение ДН приемной антенны уменьшает чувствительность бистатистического сечения рассеяния к скорости ветра.



Зависимости ширины ДС от скорости приемника.



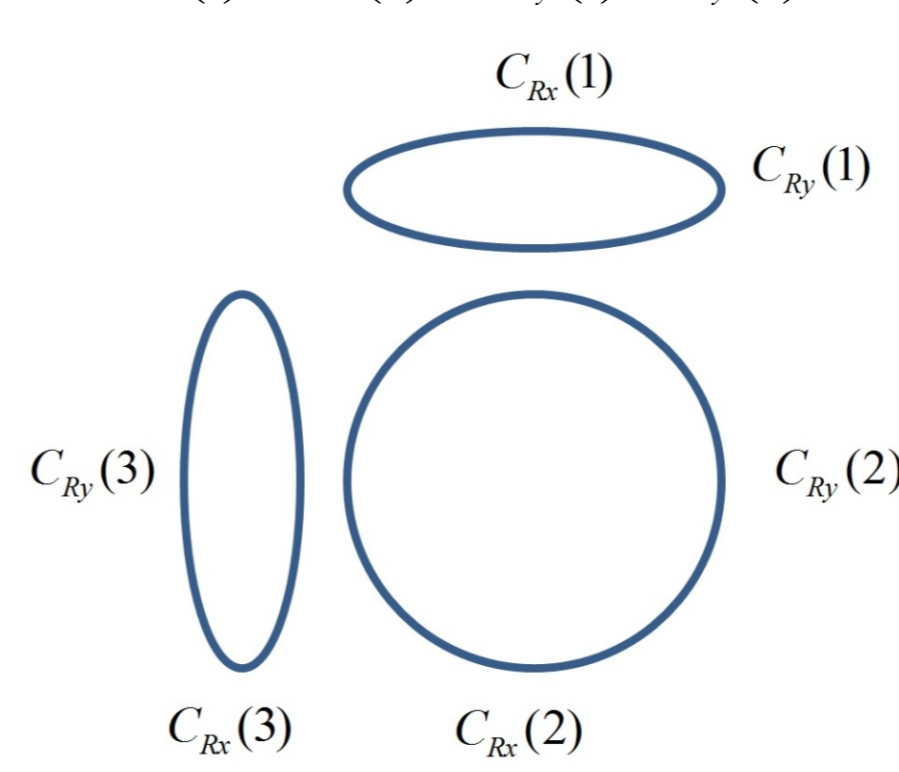
Зависимости бистатистического сечения рассеяния и ширины ДС от скорости ветра для различных приемных антенн (раскрытие диаграммы вдоль оси X/раскрытие диаграммы вдоль оси Y) и скользящего угла приема и излучения. Скорость приемника 4 км/с.

## 4 РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Рассмотрим случай одной излучающей антенны и трех приемных с различными ДН. Одна из приемных антенн симметрична, а две другие ориентированы перпендикулярно друг другу, так чтобы:

$$C_{Rx}(1) = C_{Rx}(2), \quad C_{Ry}(1) \neq C_{Ry}(2),$$

$$C_{Rx}(1) \neq C_{Rx}(3), \quad C_{Ry}(1) = C_{Ry}(3)$$



Здесь и далее номер в скобках соответствует номеру приемной антенны. Начнем с анализа системы уравнений для бистатистического сечения рассеяния. Для рассматриваемого случая можно выразить неизвестные следующим образом:

$$\sigma_{yy}^2 = \frac{C_{Ry}(2) - C_{Ry}(1) \left( \frac{\sigma_0(1)}{\sigma_0(2)} \right)^2}{22.08 \sin^2 \psi \left( \left( \frac{\sigma_0(1)}{\sigma_0(2)} \right)^2 - 1 \right)}$$

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{C_{Rx}(3) - C_{Rx}(1) \left( \frac{\sigma_0(1)}{\sigma_0(3)} \right)^2}{22.08 \left( \left( \frac{\sigma_0(1)}{\sigma_0(3)} \right)^2 - 1 \right)}$$

$$|V_{eff}|^2 = 2\sigma_0(1) \sqrt{\left( \sigma_{yy}^2 + \frac{C_{Ry}(1)}{22.08 \sin^2 \psi} \right) \left( \sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}(1)}{22.08} \right)}$$

В результате, анализируя бистатистическое сечение рассеяния, возможно восстановить дисперсии наклонов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и эффективный коэффициент отражения. Эффективный коэффициент отражения связан со скоростью приповерхностного ветра что может использоваться для оценки скоростей ветра.

Далее перейдем к анализу системы уравнений для ширин ДС. Дисперсия вертикальных скоростей и коэффициенты корреляции между наклонами и вертикальной скоростью вычисляются следующим образом:

$$K_{yy} = \sqrt{\frac{22.08 \lambda^2 \Delta f_{10}^2 (1) - \Delta f_{10}^2 (2) \left( \sigma_{yy}^2 + \frac{C_{Ry}(2)}{22.08 \sin^2 \psi} \right) \left( \sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}(1)}{22.08 \sin^2 \psi} \right)}{32 \ln 10 C_{Ry}(1) - C_{Ry}(2) \left( \sigma_{yy}^2 + \frac{C_{Ry}(2)}{22.08 \sin^2 \psi} \right) \left( \sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}(1)}{22.08 \sin^2 \psi} \right)}}$$

$$K_{xx} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

$$b = \frac{4 \sqrt{C_{Ry}(1) C_{Rx}(1)} - 4 \sqrt{C_{Ry}(3) C_{Rx}(3)}}{\left( 22.08 \sigma_{xx}^2 + C_{Rx}(1) \right) \left( 22.08 \sigma_{xx}^2 + C_{Rx}(3) \right)},$$

$$a = \frac{1}{\sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}(1)}{22.08}} - \frac{1}{\sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}(3)}{22.08}},$$

$$c = \frac{\left( \frac{\Delta f_{10}(1) \lambda}{4 \sin \psi \sqrt{2 \ln 10}} \right)^2 - \left( \frac{\Delta f_{10}(3) \lambda}{4 \sin \psi \sqrt{2 \ln 10}} \right)^2 - \frac{0.69 C_{Ry}(1)}{k^2} + \frac{0.69 C_{Ry}(3)}{k^2} - \frac{2 \sigma_{xx} \sqrt{C_{Ry}(1) C_{Rx}(1)}}{\left( 22.08 \sigma_{xx}^2 + C_{Rx}(1) \right)} + \frac{2 \sigma_{xx} \sqrt{C_{Ry}(3) C_{Rx}(3)}}{\left( 22.08 \sigma_{xx}^2 + C_{Rx}(3) \right)},$$

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{\left( \frac{\Delta f_{10}(1) \lambda}{4 \sin \psi \sqrt{2 \ln 10}} \right)^2 - \frac{0.69 C_{Ry}(1)}{k^2} + \frac{(K_{yy})^2}{\left( \sigma_{yy}^2 + \frac{C_{Ry}(1)}{22.08 \sin^2 \psi} \right)} + \frac{(K_{xx})^2 + \frac{2 \sqrt{C_{Ry}(1)}}{22.08} (2 K_{xx} \sqrt{C_{Ry}(1)} - \sqrt{C_{Ry}(1) \sigma_{xx}^2})}{\left( \sigma_{xx}^2 + \frac{C_{Rx}(1)}{22.08} \right)}$$

При расчете последних параметров используются вычисленные ранее значения дисперсии наклонов, таким образом, вычисление параметров волнения должно осуществляться последовательно.

В результате по измерениям бистатистического сечения рассеяния и ширины доплеровского спектра с помощью трех приемных антенн возможно восстановить все неизвестные параметры взволнованной водной поверхности включая эффективный коэффициент отражения.

## 5 ВЫВОДЫ

- Предлагаемый подход расчета характеристик отраженного в квазизеркальной области излучения позволяет создавать новые схемы измерений параметров водной поверхности и бистатистической постановке задачи с движущимся приемником и излучателем.
- Полученные выражения для решения обратной задачи могут использоваться для расширения числа измеряемых параметров в перспективных системах бистатистического дистанционного зондирования. Это могут быть подводные,

наземные, самолетные и космические системы. Полученные формулы применимы как к акустическому, так и к электромагнитному случаю без принципиальных изменений. Это приводит к тому, что с помощью акустических и электромагнитных локаторов могут измеряться одни те же характеристики волнения при выборе одинаковых длин волн. Планируется использовать разработанный подход для анализа данных спутниковых навигационных систем.

## 6 БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-10125)