
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НАКЛОНОВ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЛН ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

© 2012 г. В. Ю. Караев^{1*}, М. А. Панфилова¹, Г. Н. Баландина¹, К. Чу²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Институт океанологии Китайской академии наук, Циндао

* E-mail: volody@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 14.09.2011 г.

Для повышения достоверности извлекаемой из отраженного радиолокационного (РЛ) сигнала информации предложена оригинальная процедура обработки данных дождевого радиолокатора (Precipitation Radar (PR)). Для восстановления дисперсии наклонов одновременно используются два известных подхода: линейный угловой алгоритм и двухточечный угловой алгоритм. Оба алгоритма основаны на теоретической модели обратного рассеяния, однако отличаются подходом к обработке PR-данных. Точность алгоритмов зависит от исходных данных, поэтому в работе значительное внимание уделяется выявлению выбросов (промахов). Разработанная процедура впервые позволяет оценивать точность восстановления дисперсии наклонов крупномасштабного волнения. Одновременно алгоритмы восстанавливают сечение обратного рассеяния, соответствующее нулевому углу падения, что позволяет сформировать радиолокационное панорамное изображение поверхности. В результате обработки PR-данных построена зависимость дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния от скорости ветра и показано, что сечение обратного рассеяния при надирном зондировании сильнее коррелирует с дисперсией наклонов. Был разработан однопараметрический алгоритм восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния, измеренного при нулевом угле падения.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование, обратное рассеяние при малых углах падения, морская поверхность, алгоритмы обработки, измерение дисперсии наклонов

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные (РЛ) методы зондирования морской поверхности активно развиваются и используются для изучения процессов, происходящих на ее поверхности. Серьезным преимуществом активных РЛ-инструментов является независимость получения информации от времени суток и от состояния облачного слоя, что, к сожалению, существенно ограничивает возможности оптических и радиометрических каналов. Также затруднено проведение измерений с использованием этих каналов в области солнечной дорожки.

В настоящее время в режиме непрерывного обзора Мирового океана работают скаттерометры и радиоальтиметры, и собираемая информация активно ассимилируется в численные модели волнения и климатические модели (Hou et al., 2000a; 2000b; Lopez et al., 2000).

Скаттерометры работают в области средних углов падения, когда обратное рассеяние является резонансным. В этом случае рассеивателем является мелкая рябь, чувствительная к скорости приповерхностного ветра. Вклад крупномасштабного волнения сводится в модуляции спектральной плотности резонансной ряби вдоль профиля вол-

ны (гидродинамическая модуляция) и к изменению локального угла падения. Увеличение дисперсии наклонов ведет к росту сечения обратного рассеяния по сравнению с горизонтальной поверхностью.

Если спектральная плотность мелкой ряби тесно связана со скоростью ветра, то дисперсия наклонов крупномасштабного волнения зависит не только от скорости ветра, но и от условий формирования волнения, например, длины ветрового разгона, прихода волн зыби. В результате связь скорости ветра и сечения обратного рассеяния является неоднозначной, что приводит к ошибкам при восстановлении скорости ветра только по сечению обратного рассеяния.

С аналогичной проблемой сталкиваются при обработке радиоальтиметрических данных. Сечение обратного рассеяния при надирном зондировании зависит от дисперсии наклонов крупномасштабного волнения и от эффективного коэффициента отражения. Эффективный коэффициент отражения вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть ослабление отраженного сигнала мелкой рябью. Таким образом, зависимость сечения обратного рассеяния от скорости ветра

снова является неоднозначной, что приводит к ошибкам при восстановлении скорости ветра по сечению обратного рассеяния при радиоальтиметрических измерениях. Повысить точность восстановления скорости ветра можно за счет независимого измерения дисперсии наклонов.

Скаттерометры и радиоальтиметры выполняют непрерывное измерение скорости приповерхностного ветра. Текущая информация о поле ветра поступает пользователям для оперативного применения и хранится в архивах для последующего анализа, например, для проверки алгоритмов обработки и тестирования климатических моделей.

Независимое измерение дисперсии наклонов позволит сделать зависимость сечения обратного рассеяния от скорости ветра однозначной и, следовательно, повысит точность определения скорости приповерхностного ветра. Кроме того, расширится число измеряемых параметров морского волнения, что улучшит качество численных моделей волнения.

Задача измерения наклонов в полном объеме может быть решена с помощью перспективных радиолокаторов, работающих при малых углах падения, например (Karaev et al., 2006; 2010).

Для проверки новых алгоритмов восстановления дисперсии наклонов, разработанных для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, можно привлечь данные PR-радиолокатора, предназначенного для измерения интенсивности осадков.

Дождевой радиолокатор (Precipitation radar – далее PR-радиолокатор) был разработан в Японии и входит в состав аппаратуры американо-японского спутника, работающего в тропической и субтропической зонах Мирового океана (Tropical Rain Measuring Mission) (NASDA, 2001; Cecil et al., 2005).

В своих работах (Караев и др., 2010; 2012) мы использовали данные PR-радиолокатора для моделирования измерений радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны и были получены первые оценки дисперсии наклонов. Непосредственно задаче восстановления дисперсии наклонов по данным PR-радиолокатора в работе было уделено мало внимания и многие вопросы не обсуждались. В данной статье подробно рассматривается процедура обработки PR-данных и восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния. Разработанные алгоритмы могут использоваться для формирования поля наклонов по аналогии с полем ветра по существующим РЛ-данным.

В работе обсуждаются способы удаления недоуверенных данных (промахов), сравниваются алгоритмы обработки и рассматриваются особенности формирования панорамного РЛ-изображе-

ния морской поверхности при малых углах падения. Разработан оригинальный алгоритм определения дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния.

ХАРАКТЕРИСТИКА PR-РАДИОЛОКАТОРА

В 1997 г. стартовал совместный американо-японский проект (Tropical Rainfall Measuring Mission), целью которого является измерение пространственного распределения осадков и их вертикального профиля для определения интенсивности осадков в тропической и субтропической зонах Мирового океана (NASDA, 2001; Cecil et al., 2005). Для решения этой задачи на спутнике была установлена разнообразная измерительная аппаратура, в состав которой входит радиолокатор Кудиапазона для измерения вертикального профиля осадков, разработанный японскими учеными.

Особенностью PR-радиолокатора является то, что он работает под малыми углами падения и, в отличие от скаттерометра, потенциально способен восстанавливать недоступную ранее информацию о параметрах крупномасштабного волнения, в частности, о дисперсии наклонов.

Схема измерений PR-радиолокатора показана на рис. 1. При движении происходит сканирование в направлении, перпендикулярном направлению полета. Видно, что за счет применения режима сканирования узким лучом в интервале углов падения $\pm 17^\circ$ удается получить широкую полосу обзора даже при надирном режиме зондирования. Частота сканирования подобрана так, что смещение PR-радиолокатора за время скана составляет около 4 км, т.е. происходит полная засветка полосы обзора при размере пятна около 5 км.

PR-радиолокатор измеряет распределение осадков с высоким разрешением по высоте (250 м по дальности). Сечение обратного рассеяния, измеренное на максимальной дальности, соответствует отражению от поверхности, поэтому оно может быть использовано для определения параметров рассеивающей поверхности.

В настоящее время PR-радиолокатор успешно применяется для измерения интенсивности осадков, однако наличие потенциальной возможности восстановления по данным PR-радиолокатора дополнительной информации привлекает к себе внимание исследователей, и известно несколько попыток использования данных PR-радиолокатора для измерения дисперсии наклонов и скорости приповерхностного ветра, например (Freilich, Vanhoff, 2003; Li et al., 2004; Tran et al., 2007).

Отметим также ряд работ, посвященных восстановлению дисперсии наклонов по самолетным данным, например (Jackson et al., 1992; Hausler et al., 2008).

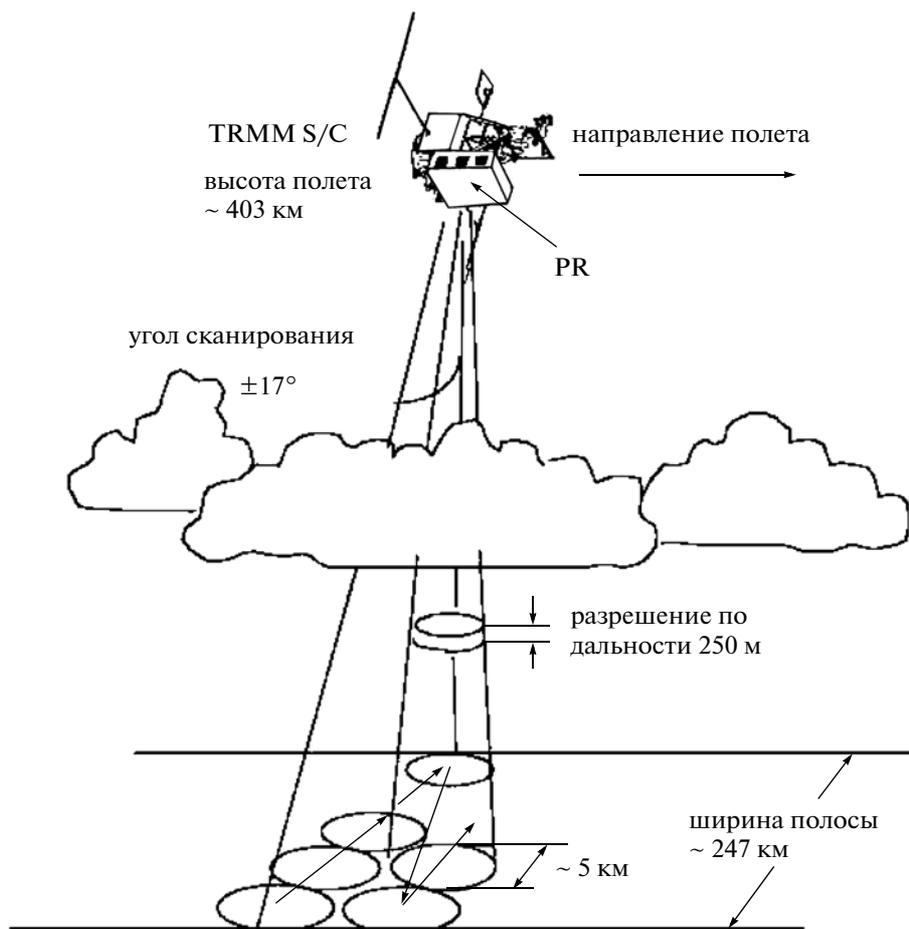


Рис. 1. Схема американско-японской спутниковой системы по измерению осадков в тропиках (The Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM). Дождевой радиолокатор (PR) измеряет в полосе обзора шириной 247 км с разрешением 5 км.

При наличии эффективного алгоритма обработки можно использовать существующие данные PR-радиолокатора для измерения дисперсии наклонов в оперативном режиме и сделать их доступными потребителям.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения данного исследования были взяты измерения сечения обратного рассеяния при малых углах падения, выполненные PR-радиолокатором. Данные были предоставлены Goddard Distributed Active Archive Center и извлечены из стандартного продукта 2A21 (версия-6).

Информация о скорости и направлении ветра, а также о параметрах волнения была получена из архива National Data Buoy Center (NDBC). NDBC-буи обеспечивают измерения скорости и направления ветра каждые 10 мин на высоте 5 м над морской поверхностью.

Последующая обработка позволила сформировать объединенный массив PR и буйковых дан-

ных, охватывающий период 2001–2009 гг. В качестве критерия использовались следующие условия: 1) расстояние между бумом и ячейкой, где измеряется сечение обратного рассеяния, не превосходит 25 км; 2) временной интервал между РЛ-и буйковыми измерениями не более 10 мин.

При первичной обработке были отсеяны измерения в области дождя, когда происходит значительное ослабление мощности отраженного сигнала.

В результате каждый элемент объединенного массива содержал следующую информацию: 1) скорость и направление ветра; 2) высоту значительного волнения и направление распространения; 3) сечение обратного рассеяния и угол падения; 4) направление движения спутника; 5) направление сканирования; 6) координаты буя и элементарной рассеивающей ячейки.

Пример угловой зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для двух последовательных сканов приведен на рис. 2. Наблюдаемые на рисунке флуктуации мощности отраженного

сигнала достаточно сильные и, следовательно, будут оказывать существенное влияние на работу алгоритмов, используемых для обработки данных. Поэтому задача предварительной подготовки данных, выполняющая удаление грубых промахов из исходных данных, является крайне важной.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ

Проведенный анализ зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения позволяет сделать вывод о соотношении вкладов квазизеркального и брэгговского механизмов рассеяния в сечение обратного рассеяния при малых углах падения (Chu et al., 2012). На рис. 3 на экспериментальные данные (звездочки) наложена теоретическая зависимость (кривая), построенная для квазизеркальной компоненты, и видно, что в подавляющем большинстве случаев вклад брэгговского рассеяния можно не учитывать при углах падения меньше 12° .

Для построения теоретической кривой использовалась хорошо известная модель сечения обратного рассеяния, полученная в приближении метода Кирхгофа. Как известно, при малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению, например (Басс, Фукс, 1972; Valenzuela, 1978; Гарнакерьян, Сосунов, 1978). В результате сечение обратного рассеяния $\sigma_0(\theta)$ при ориентации антенны вдоль оси X задается известной формулой

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{\text{эфф}}(0)|^2}{2 \cos^4 \theta \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2}} \times \exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta \sigma_{yy}^2}{2(\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)}\right], \quad (1)$$

где θ – угол падения; $R_{\text{эфф}}(0)$ – эффективный коэффициент отражения при нормальном падении; σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 – дисперсии наклонов волнения вдоль осей X и Y соответственно, а K_{xy} – взаимный ненормированный коэффициент корреляции наклонов вдоль осей X и Y (Басс, Фукс, 1972; Гарнакерьян, Сосунов, 1978).

Как видно из рис. 2, данные PR-радиолокатора для каждого скана представляют собой зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения. В связи с тем, что волнение нельзя считать однородным во всей полосе обзора, превышающей 200 км, при обработке необходимо разбить отражающую поверхность на ячейки, например, 25×25 км или 50×50 км, и восстанавливать информацию в каждой ячейке независимо. Ячейки такого размера традиционно используются в

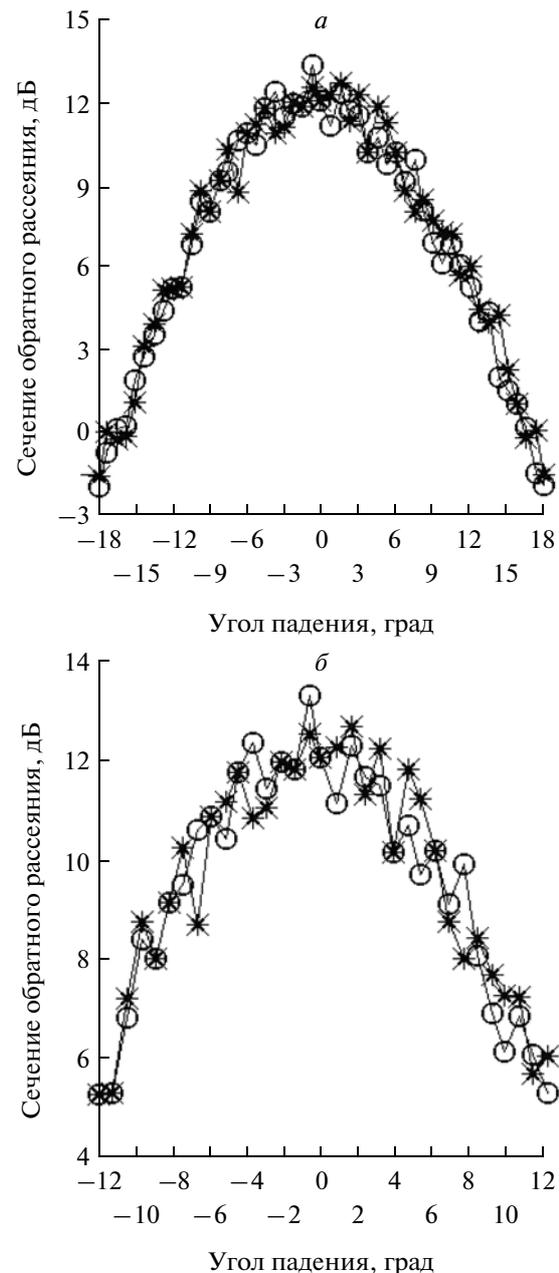


Рис. 2. Пример зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для двух последовательных сканов: *a* – все углы падения, *б* – область квазизеркального рассеяния.

скаттерометрии для восстановления скорости и направления ветра (Halpern, 2000).

Для восстановления дисперсии наклонов по PR-данным воспользуемся двумя известными алгоритмами, например (Караев и др., 2004; Hauser et al., 2008). Оба алгоритма используют угловую зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения. Первый алгоритм можно назвать двухточечным, так как входными параметрами являются сечения обратного рассеяния, измеренные под двумя углами падения.

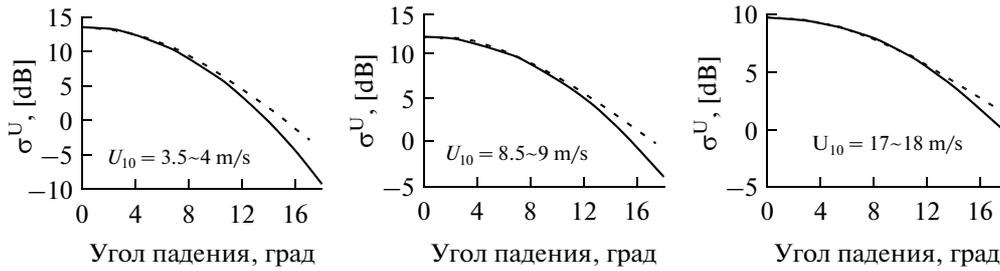


Рис. 3. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для разных скоростей ветра: звездочки – экспериментальные данные; кривая – модельные оценки.

Двухточечный угловой алгоритм

В рамках модели квазизеркального рассеяния существует возможность восстановления информации о дисперсии наклонов вдоль направления зондирования при условии проведения измерений под несколькими углами падения. Кроме того, можно вычислить сечение обратного рассеяния соответствующее вертикальному зондированию.

Из формулы (1) видно, что выражение для сечения обратного рассеяния можно записать в следующем виде:

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{\text{эфф}}(0)|^2 \exp[-\text{tg}^2 \theta b]}{\sqrt{2} \cos^4 \theta \sqrt{\sigma_{yy}^2}} \sqrt{b}, \quad (2)$$

где

$$b = \frac{\sigma_{yy}^2}{2(\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2)}.$$

Коэффициент b содержит информацию о дисперсии наклонов крупномасштабного волнения. Если ввести параметр p следующим образом:

$$p = \frac{|R_{\text{эфф}}|^2}{\sqrt{\sigma_{yy}^2}} = \frac{\sqrt{2} \sigma_0(\theta) \cos^4 \theta}{\sqrt{b}} \exp(\text{tg}^2 \theta b), \quad (3)$$

то сечение обратного рассеяния при надирном зондировании можно вычислить по простой формуле

$$\sigma_0(0) = \frac{p \sqrt{b}}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Используя измерения сечения обратного рассеяния для двух углов падения θ_1 и θ_2 можно определить коэффициент b по следующей формуле:

$$b = \frac{\ln \left(\frac{\sigma_0(\theta_1) \cos^4 \theta_1}{\sigma_0(\theta_2) \cos^4 \theta_2} \right)}{\text{tg}^2 \theta_2 - \text{tg}^2 \theta_1}. \quad (5)$$

После этого переходим от сечения обратного рассеяния, измеренного при угле падения θ , к сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения

$$\sigma_0(0) = \sigma_0(\theta) \cos^4 \theta \exp(\text{tg}^2 \theta b). \quad (6)$$

В результате мы видим, что переход от сечения обратного рассеяния при наклонном зондировании к сечению обратного рассеяния при надирном зондировании является корректным и не зависит от направления распространения волнения или ветра. Следовательно, при восстановлении скорости ветра по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения нет необходимости знать направление распространения волнения или ветра.

Параметр $1/2b$ точно равен дисперсии наклонов вдоль направления зондирования при условии распространения волнения вдоль оси X или Y , так как коэффициент корреляции K_{xy} в этом случае равен 0. При других азимутальных углах дисперсия наклонов будет восстановлена с небольшой погрешностью, величина которой зависит от значения коэффициента корреляции. Отметим, что коэффициент корреляции много меньше дисперсии наклонов, т.е. возможная ошибка будет небольшой.

Таким образом, с помощью описанной выше процедуры мы можем получить оценку дисперсии наклонов вдоль направления зондирования и вычислить сечение обратного рассеяния для нулевого угла падения.

Реальные данные сильно зашумлены, и по одной паре углов падения точно определить коэффициент b можно только случайно, поэтому необходимо рассматривать все возможные пары углов падения и проводить усреднение для вычисления среднего значения коэффициента $\langle b \rangle$.

В качестве альтернативного варианта будем также рассматривать усреднение не коэффициента b , а дисперсии наклонов, т.е.

$$\langle \sigma_{xx}^2 \rangle = \left\langle \frac{1}{2b} \right\rangle. \quad (7)$$

Условие близости средних значений дисперсии наклонов, вычисленных разными способами, будет критерием правильности полученного результата. Наличие выбросов (сильно завышенных

или заниженных значений относительно среднего уровня) приведет к тому, что дисперсии наклонов, вычисленные разными способами, будут отличаться.

Сечения обратного рассеяния, вычисленные по разным формулам (формулы (4) и (6)), тоже можно рассматривать в качестве критерия правильности результата. Применение методов выявления потенциальных ошибок (промахов) при работе алгоритмов обсуждается далее.

Линейный угловой алгоритм

Когда присутствуют значительные флуктуации мощности отраженного сигнала, то для вычисления коэффициента b можно применить другой подход (Elfouhaily et al., 1998; Hauser et al., 2008).

Представим формулу (2) в следующем виде:

$$\ln(\sigma_0 \cos^4 \theta) = \ln \left(\frac{|R_{\text{эфф}}(0)|^2 \sqrt{b}}{\sqrt{2} \sqrt{\sigma_{yy}^2}} \right) - \text{tg}^2 \theta b. \quad (8)$$

В результате зависимость сечения обратного рассеяния от квадрата тангенса угла падения становится линейной

$$\ln(\sigma_0 \cos^4 \theta) = B - ktg^2 \theta, \quad (9)$$

где

$$b = k, \quad \sigma_0(0) = \exp(B). \quad (10)$$

Для нахождения сечения обратного рассеяния $\sigma_0(0)$ и коэффициента b необходимо провести регрессионный анализ методом наименьших квадратов и найти коэффициенты для прямой. В данном случае используется исходный массив данных без усреднения по углу падения.

Завершая обсуждение алгоритмов, приведем окончательные формулы для дисперсии наклонов в предположении малости коэффициента корреляции K_{xy} .

Для двухточечного углового алгоритма дисперсия наклонов в направлении зондирования вычисляется следующим образом:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{1}{2\langle b \rangle} \quad \text{и} \quad \sigma_{xx}^2 = \left\langle \frac{1}{2b} \right\rangle, \quad (11)$$

для линейного углового алгоритма

$$\sigma_{xx}^2 = -\frac{1}{2k} = -\frac{1}{2b}. \quad (12)$$

В результате обработки получим три оценки дисперсии наклонов, и, сравнивая их, можно оценить эффективность алгоритмов.

Рассмотрим последовательность обработки данных и восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния на примере типичного массива. На рис. 4 звездочками показаны ис-

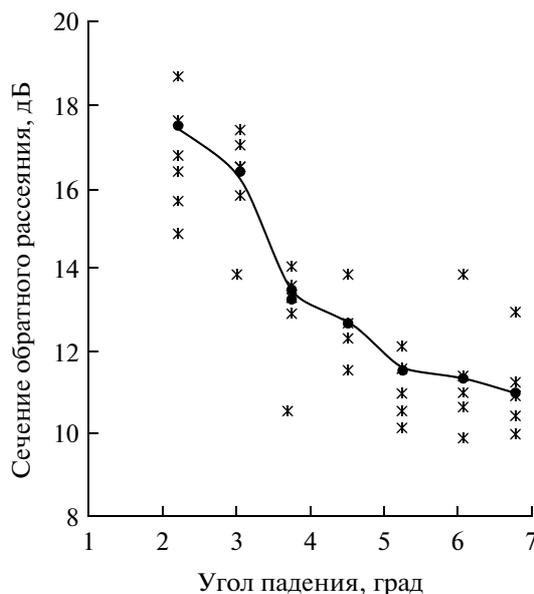


Рис. 4. Пример обрабатываемого массива PR-данных.

ходные измерения, кружками нанесены средние значения для каждого угла падения.

Из рис. 4 видно, что зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения является неоднозначной. Измерения относятся к площадке, размером примерно 35×28 км, и на таком масштабе волнение в океанологии считается однородным, поэтому предположим, что наблюдаемые флуктуации сечения обратного рассеяния не связаны непосредственно с морским волнением, а обусловлены другими причинами, не имеющими отношения к наклонам. Поэтому задача первого этапа обработки состоит в удалении промахов, которые могут оказать сильное влияние на эффективность работы алгоритмов.

Удаление промахов

Как известно, ни один из критериев удаления промахов не может гарантировать, что всегда успешно решит задачу обнаружения и удаления промахов из массива экспериментальных данных. Чтобы повысить качество данных обычно применяют несколько алгоритмов. В данном исследовании используются четыре известных критерия для обнаружения промахов, и на примере экспериментальных данных рассматривается их работоспособность.

Критерий Ирвина позволяет исключать промахи из исходных данных и может быть записан в следующем виде (Шведков, 1975):

$$\lambda_i = \frac{(y_{i+1} - y_i)}{\sigma}, \quad (13)$$

Таблица 1. Параметр λ_q

N	Уровень значимости критерия 0.05, λ_q
3	2.2
10	1.5
20	1.3
30	1.2
50	1.1

Таблица 2. Параметр t_p

k	Уровень значимости 0.05, t_p	k	Уровень значимости 0.05, t_p
4	2.78	13	2.16
5	2.57	14	2.14
6	2.45	15	2.13
7	2.36	16	2.12
8	2.31	17	2.11
9	2.26	18	2.1
10	2.23	19	2.09
11	2.2	20	2.09
12	2.18		

Таблица 3. Параметр λ

N	Уровень значимости 0.05, λ
4	1.689
6	1.996
8	2.172
10	2.294
15	2.493
20	2.623
30	2.792
35	2.853

где $y_1 < y_2 < \dots < y_i < y_{i+1} < \dots < y_N$ – исходный массив данных. Дисперсия σ^2 вычисляется следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \langle y \rangle)^2. \quad (14)$$

Здесь под $\langle y \rangle$ понимается среднее значение. Максимальное значение λ_i из полученного ряда (см. формулу (13)) сравнивается с табличным значением λ_q . В данном случае значения приведены для вероятности 0.95 и разного числа точек в исходном массиве (табл. 1).

Если $\lambda_i > \lambda_q$, то мы имеем в массиве промах и эта точка удаляется. После этого вычисления по-

вторяются до тех пор, пока не будет удовлетворен критерий или количество точек не станет меньше пяти. В этом случае данный массив удаляется целиком и не используется при дальнейшей обработке.

Критерий Романовского. Другим критерием выявления грубых погрешностей является критерий, предложенный Романовским (Романовский, 1947):

$$|y_i - \langle y \rangle| \leq t_p \sigma, \quad (15)$$

где t_p – квантиль распределения Стьюдента при заданной доверительной вероятности с числом степеней свободы $k = N - 1$. Значения t_p для вероятности 95% приведены в табл. 2.

Как и в предыдущем случае, при наличии промахов сначала удаляется самый большой промах и затем вычисления повторяются.

Стандартный критерий. Следующий критерий для удаления промахов из исходного массива данных задается парой неравенств (Чашкин, 2010):

$$v_1 = \frac{y_{\max} - \langle y \rangle}{\sigma} \sqrt{\frac{N}{N-1}} \quad (16)$$

или $v_2 = \frac{\langle y \rangle - y_{\min}}{\sigma} \sqrt{\frac{N}{N-1}}$

где y_{\max} и y_{\min} соответствуют максимальному и минимальному значению в рассматриваемом массиве. Для нахождения промаха необходимо вычислить значения v_1 и v_2 и сравнить их с λ . Если параметр λ окажется меньше, то из массива удаляется максимальное или минимальное значение. Значения параметра λ для вероятности 95% приведены в табл. 3.

Критерий Граббса. Для нахождения промаха используется следующий критерий (Grubbs, 1969):

$$|y_i - \langle y \rangle| > g(\alpha, N) \sigma, \quad (17)$$

где значения параметра $g(\alpha, N)$ приведены в табл. 4 для вероятности $\alpha = 0.95$.

Как и в случае с другими критериями, при наличии промахов сначала удаляется член ряда, максимально отстоящий от среднего значения. После этого цикл повторяется до момента удовлетворения критерия или достижения пяти точек, после чего эти данные не обрабатываются.

Сравним эффективность критериев на примере приведенного выше исходного массива (см. рис. 4).

Исходный массив содержит 49 точек. После последовательного применения всех критериев было удалено четыре точки и результат показан на рис. 5.

Из рисунка видно, что используемые критерии успешно решают задачу удаления промахов. Каждый критерий по-своему определяет число про-

махов в исходных данных. Критерий Ирвина удаляет две точки, критерий Романовского – три промаха, стандартный критерий – один промах и Граббс не находит промахов. А при последовательном применении удаляется четыре промаха.

Таким образом, удаление промахов повышает качество исходных данных и увеличивается точность измерения дисперсии наклонов и определения сечения обратного рассеяния.

Критерии точности алгоритмов. Для оценки эффективности критериев обнаружения промахов в исходных данных можно использовать коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции характеризует степень зависимости случайных величин x и y и вычисляется следующим образом (Горяинов и др., 1980):

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \langle y \rangle)^2}} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (18)$$

В качестве одной из переменных используется дисперсия наклонов, а в качестве второй, в зависимости от используемого алгоритма, берется величина, пропорциональная сечению обратного рассеяния σ_0 или $\ln(\sigma_0)$. Сравнивая коэффициенты корреляции до и после удаления промахов, можно оценить эффективность процедуры по удалению промахов, например, до удаления промахов в исходном массиве коэффициент корреляции при использовании линейной регрессии составлял 0.817, а после удаления четырех промахов увеличился до 0.885.

Для получения количественных оценок погрешностей можно воспользоваться следующими формулами:

$$\sigma_{y/x} = \sigma_y \sqrt{1 - R_{xy}^2}, \quad (19)$$

$$\sigma_{x/y} = \sigma_x \sqrt{1 - R_{xy}^2}. \quad (20)$$

И, переходя к относительным погрешностям, получим следующие оценки:

$$\sigma'_{y/x} = \frac{\sigma_{y/x}}{\langle y \rangle} \times 100\%, \quad (21)$$

$$\sigma'_{x/y} = \frac{\sigma_{x/y}}{\langle x \rangle} \times 100\%. \quad (22)$$

Относительные погрешности также будут выступать в качестве критерия при обработке данных. Если коэффициент корреляции низкий и высокая относительная ошибка, то такие данные будут считаться плохими и не учитываться при восстановлении дисперсии наклонов.

Таблица 4. Параметр g (0.95, N)

N	g (0.95, N)
3	1.15
5	1.67
6	1.82
8	2.03
10	2.18
13	2.33
20	2.56
25	2.66
30	2.75
35	2.82
40	2.87
50	2.96

Еще одним критерием оценки точности алгоритмов будет выступать близость значений дисперсий наклонов или сечений обратного рассеяния, восстановленных разными алгоритмами, которую зададим следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{|f_1 - f_2|}{f_1 + f_2} \times 100\%, \quad (23)$$

где под f_1 и f_2 понимаются сравниваемые значения.

В двухточечном угловом алгоритме используются средние значения, которых немного, и применение рассмотренных выше критериев для ис-

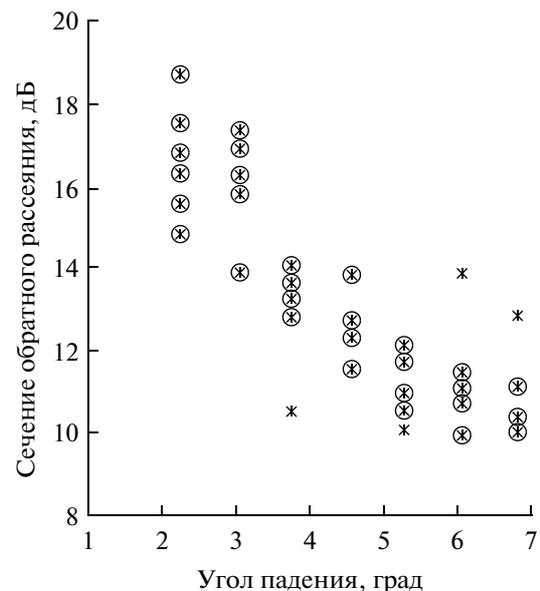


Рис. 5. Пример обрабатываемого массива PR-данных: звездочками нанесены исходные данные, кружками обведены оставшиеся после удаления промахов значения.

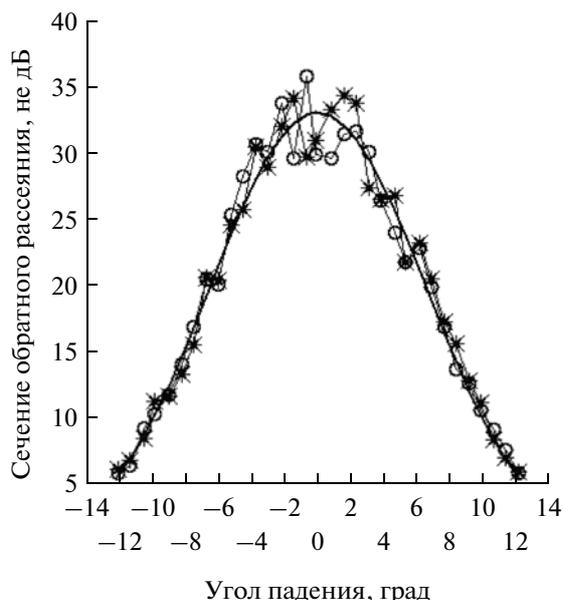


Рис. 6. Пример моделирования угловой зависимости сечения обратного рассеяния для двух последовательных сканов: кружки и звездочки. Кривой показана исходная зависимость.

ходного массива не будет эффективным. Однако при работе алгоритма формируется массив восстановленных дисперсий наклонов и сечений обратного рассеяния. Применение четырех критериев удаления промахов к найденным значениям повысит эффективность применяемых алгоритмов.

Критерии будут применяться как для массива b , так и для $1/b$. После удаления промахов вычисляются средние значения, которые в общем случае не будут равны. Большое различие в дисперсиях наклонов, вычисленных по ним, будет говорить о возможной ошибке. Поэтому здесь предполагается воспользоваться условием (23).

И заключительной проверкой достоверности данных будет сравнение данных, восстановленных двухточечным и линейным угловым алгоритмами. Если использование разных алгоритмов дает близкие значения восстановленных величин, значит, алгоритмы работают правильно. Задавая значение ε , можно регулировать степень “жесткости” при отборе. С одной стороны, такие правила отбора приведут к появлению точек, в которых не удастся восстановить интересующие нас параметры с приемлемой точностью. Однако в данном случае можно будет говорить об уровне точности восстановления интересующих нас параметров.

Таким образом, впервые разработана процедура, позволяющая в процессе обработки РЛ-данных на основе заданных критериев отсеивать точки, в которых интересующие нас параметры не могут быть достоверно восстановлены. В резуль-

тате точность восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния будет выше, чем без ее применения.

Для обработки радиоальтиметрических и скатерометрических данных таких процедур не существует, и обрабатываются все точки за исключением области дождя. В результате, когда выполняется сравнение с данными контактных наблюдений, не менее 2–4% данных оказываются расположенными за пределами 3σ . Обнаружить такие точки в процессе стандартной обработки невозможно, поэтому такие значительные ошибки оставались в восстановленных данных, приводя в дальнейшем к ошибочным выводам.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проверить эффективность работы алгоритмов можно, только сравнивая восстановленные значения с данными контактных измерений. Современные морские буи позволяют измерять скорость и направление ветра, высоту значительного волнения. Дисперсия наклонов крупномасштабного волнения не может быть найдена по данным буюв, и прямое сравнение измеренной и восстановленной дисперсии наклонов по имеющимся данным буюв провести невозможно. В качестве варианта проверки точности разработанных алгоритмов можно использовать численное моделирование.

Моделировалось полностью развитое ветровое волнение, и вычислялась зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения по формуле (1) в интервале от -18° до 18° . Это соответствует данным РР-радиолокатора. Для дальнейшей обработки будут использоваться углы падения в интервале $\pm 12.2^\circ$, где работает квазизеркальная модель рассеяния.

На полученную зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения накладывается шум заданной интенсивности $I_{\text{шум}}$, которая задавалась в процентах. Шум предполагался равномерным на интервале $\pm I_{\text{шум}}$.

Сечение обратного рассеяния с учетом шума для угла падения θ вычислялось по следующей формуле:

$$\sigma_{0\text{шум}}(\theta) = \sigma_0(\theta)(1 + I_{\text{шум}}/100). \quad (24)$$

Пример “зашумленных” данных приведен на рис. 6. Сплошной линией показана исходная зависимость. При вычислении был задан шум интенсивностью 10%, что близко к экспериментальным данным.

Как и при обработке реальных данных, использовались углы падения, меньше 12.2° . При дальнейшем росте углов падения в модель необходимо включать брэгговскую компоненту, свя-

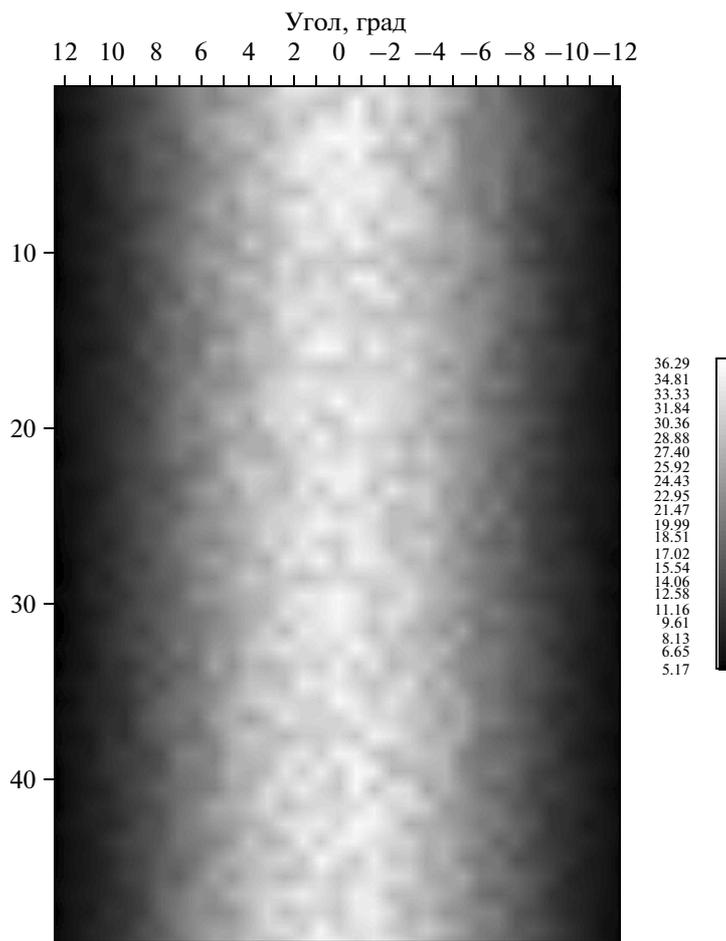


Рис. 7. Полутоновое изображение полосы обзора PR-радиолокатора.

занную с обратным рассеянием на мелкой резонансной ряби.

В качестве примера приведем результаты численного моделирования для случая полностью развитого ветрового волнения: скорость ветра $U_{10} = 5$ м/с, направление распространения — вдоль оси X , спектр волнения задается нашей моделью (Karaev, 1999; Karaev et al., 2008).

На рис. 7 приведены полутоновое изображение для 50 последовательных сканов и 32 углов падения. На рис. 7 сечение обратного рассеяния задано не в дБ. Два скана из этого изображения были приведены на рис. 6.

Дисперсия наклонов для всей моделируемой поверхности одна и та же: $\sigma_{xx}^2 = 0.0121$. В условиях зашумленности данных размер площадки оказывает сильное влияние на точность работы алгоритмов, поэтому вычисления выполнялись для двух размеров площадок: 5×5 и 8×8 . Размер элементарной ячейки около 5 км, сдвиг между сканами также около 4 км, поэтому размер обрабатываемых площадок примерно 25×20 км и 40×32 км.

При обработке проходим по полосе обзора площадкой (5×5 или 8×8) со сдвигом в одну элементарную ячейку и вычисляем дисперсию для центральной точки площадки, формируя тем самым новый массив, содержащий вместо сечения обратного рассеяния дисперсию наклонов.

В результате обработки были получены массивы данных, содержащие: 1) дисперсию наклонов, восстановленных с использованием линейного углового алгоритма; 2) дисперсию наклонов, восстановленную с помощью двухточечного углового алгоритма; 3) дисперсию наклонов, восстановленную линейным угловым алгоритмом после удаления промахов; 4) дисперсию наклонов, восстановленную двухточечным угловым алгоритмом, после удаления промахов; 5) среднюю дисперсию наклонов по линейному угловому и двухточечному алгоритму.

Из исходного массива (рис. 7) были выбраны типичные сканы, которые использовались для иллюстрации процедуры обработки данных.

На рис. 8 приведены результаты восстановления дисперсии наклонов: звездочки относятся к

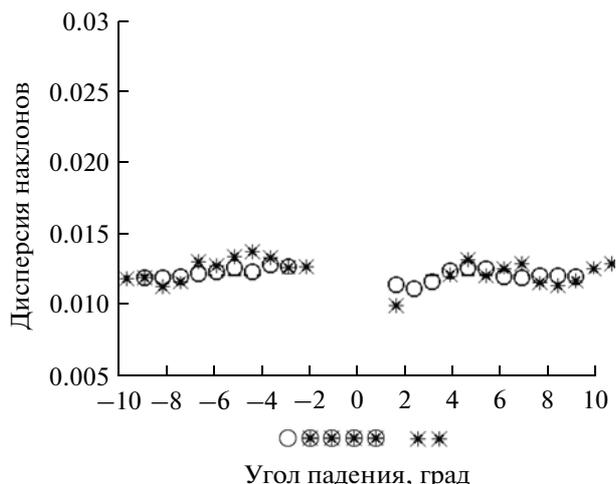


Рис. 8. Пример восстановления дисперсии наклонов с использованием двух алгоритмов: звездочки — для площадки 5×5 и кружки — для площадки 8×8 . Под графиком показаны отсеянные значения при заданной 15% погрешности.

площадке 5×5 , кружки — к площадке 8×8 . Видно, что дисперсия наклонов восстановлена с высокой точностью для обеих усредняющих площадок. Линией показано истинное значение дисперсии наклонов. Проблемы с точностью восстановления дисперсии наклонов возникают при малых углах падения, когда интенсивный шум полностью маскирует зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения.

При обработке была задана точность 15% в соответствии с (23). Критерий не является строгим, тем не менее, он позволяет избавиться от части неправильных значений.

При разработке алгоритма восстановления дисперсии наклонов исходили из условия получения максимально достоверных оценок, т.е. удалялись все подозрительные значения. Считаем, что лучше не иметь для данной элементарной рассеивающей ячейки информации о дисперсии наклонов, чем восстановить ее со значительной ошибкой. Изменять “точность” алгоритма можно задавая величину ε .

Таким образом, в результате проведенного моделирования было показано, что предложенная процедура обработки позволяет отсеивать промахи и с высокой точностью восстанавливать дисперсию наклонов.

В заключение обсуждения на рис. 9 приведем восстановленные значения сечения обратного рассеяния для нулевого угла падения $\sigma_0(0)$. Если на рисунке перейти к дБ, то размах составит менее 0.25 дБ для площадки 8×8 .

В данном случае от спадающей зависимости сечения обратного рассеяния с увеличением угла падения (см. рис. 6) происходит переход к сечению

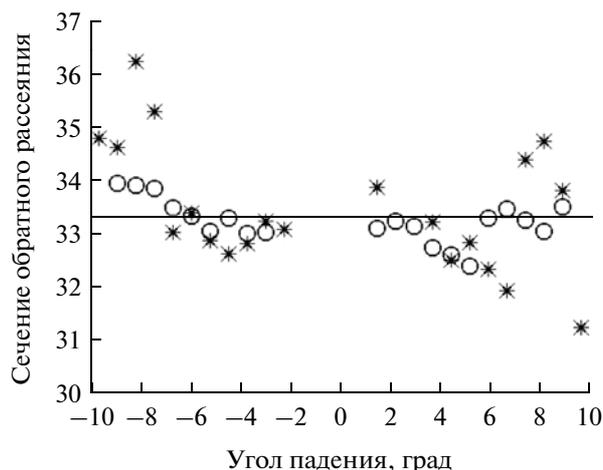


Рис. 9. Пример восстановления сечения обратного рассеяния, соответствующее вертикальному зондированию: звездочки — для площадки 5×5 и кружки — для площадки 8×8 . Прямая соответствует истинному значению сечения.

обратного рассеяния при вертикальном зондировании, т.е. к горизонтальной линии. При малых углах не удается восстановить сечение обратного рассеяния с помощью разработанных алгоритмов из-за высокого уровня шумов.

Увеличение размера анализируемой площадки ведет к уменьшению ошибки. Однако в обоих случаях она не превосходит заданных 15% и существенно ниже точности абсолютной калибровки, которая для РР-радиолокатора составляет около 1 дБ. Для восстановленных значений сечения обратного рассеяния можно применять алгоритмы определения скорости ветра, используемые для радиоальтиметров.

Задача восстановления скорости ветра выходит за рамки данной работы и будет рассмотрена в следующей статье.

Приведем результат преобразования исходного полутонового изображения для сечения обратного рассеяния (см. рис. 7) в сечение обратного рассеяния при надирном угле падения. Таким образом, формируем панорамное РЛ-изображение поверхности.

Результат приведен на рис. 10 (черный цвет соответствует области, где не была достигнута требуемая точность). Переход к сечению обратного рассеяния при надирном зондировании $\sigma_0(0)$ избавил исходное изображение (см. рис. 7) от зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения. Получившееся полутоновое изображение может быть использовано для анализа крупномасштабных процессов на морской поверхности, например, тайфунов. Истинное значение сечения обратного рассеяния, найденное по модели, равно 33.3 или 15.22 дБ.

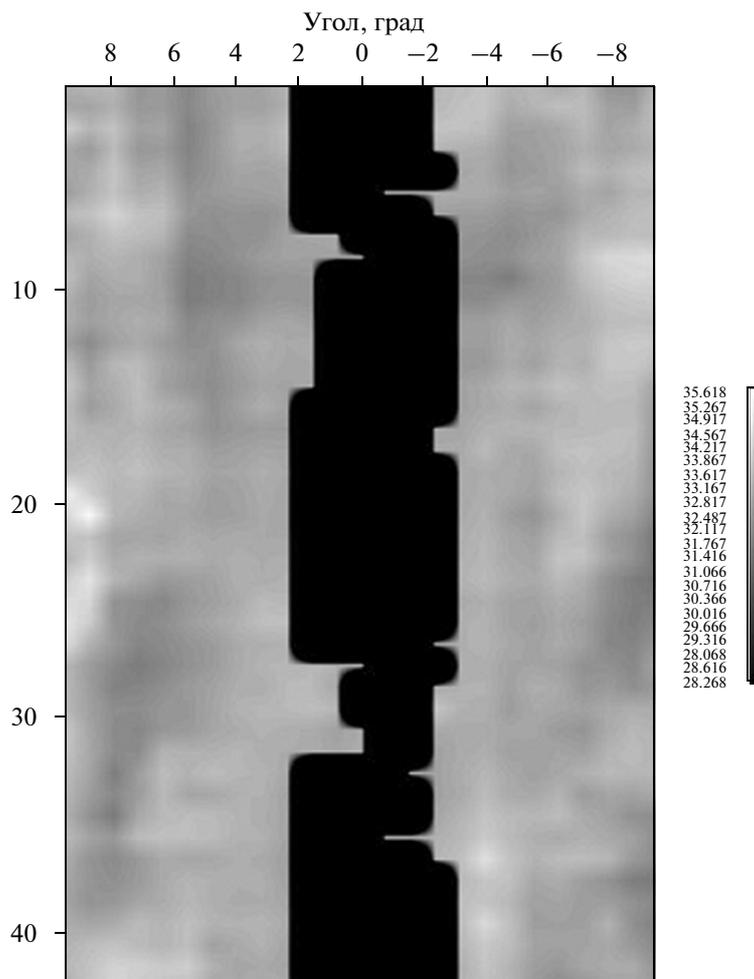


Рис. 10. Полутонное изображение полосы обзора PR-радиолокатора после обработки.

В данном изображении не присутствует проявлений каких-либо крупномасштабных процессов, что соответствует модельным данным.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НАКЛОНОВ

После проверки эффективности разработанной процедуры восстановления дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния перейдем к обработке реальных данных. Описание данных приведено выше, поэтому переходим непосредственно к обработке.

Исходный массив данных состоял из 3340 точек и после отсева данных, не удовлетворяющих формальным критериям (углы падения, минимальное число точек – 25), осталось 1844 точки.

К полученному массиву применялась разработанная процедура обработки. В результате обработки были восстановлены дисперсия наклонов и сечение обратного рассеяния для 1038 точек.

Как уже отмечалось, при скорости ветра ниже порогового значения не происходит генерации волн и, следовательно, нельзя говорить о связи параметров волнения с ветром. Поэтому были удалены точки, в которых скорость ветра U_{10} была ниже 3 м/с, и окончательный массив содержал 905 точек.

На рис. 11 приведена зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения от скорости ветра U_{10} . Частично наблюдаемый разброс обусловлен тем, что неизвестно направление распространения волнения.

Как обсуждалось выше, происходит восстановление дисперсии наклонов вдоль направления зондирования. Для определения полной дисперсии наклонов необходимо провести второе измерение под углом 90° относительно первого, и тогда полная дисперсия будет равна

$$\sigma_{\text{накл}}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2.$$

В нашем распоряжении нет второго измерения, поэтому в качестве оценки полной диспер-

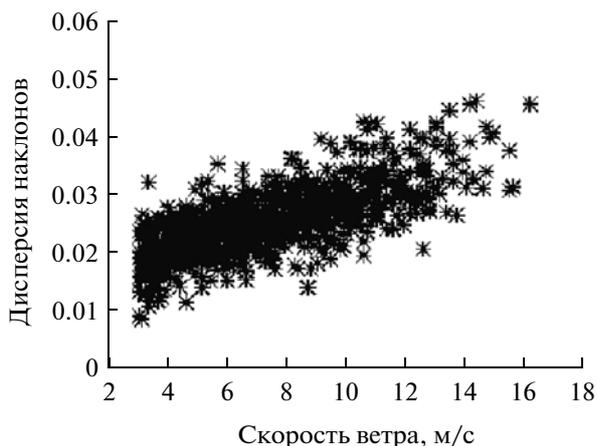


Рис. 11. Зависимость дисперсии наклонов от скорости ветра.

сии наклонов будем использовать следующую величину:

$$\sigma_{\text{накл}}^2 = 2\sigma_{xx}^2.$$

Если предположить, что $\sigma_{yy}^2 = 0.7\sigma_{xx}^2$ (Сох, Munk, 1954), то интервал изменения определенной таким образом полной дисперсии наклонов $\sigma_{\text{накл}}^2$ составит от $1.4\sigma_{xx}^2$ до $2\sigma_{xx}^2$, при условно правильном значении $1.7\sigma_{xx}^2$.

Традиционно по сечению обратного рассеяния восстанавливается скорость приповерхностного ветра. Связь сечения обратного рассеяния с высотой значительного волнения слабая, а другие ста-

тистические параметры не измеряются существующими морскими буями с необходимой точностью.

В результате проведенной обработки РР-данных были измерены наклоны крупномасштабного волнения, поэтому есть возможность построить зависимость сечения обратного рассеяния от дисперсии наклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны падающего излучения, волнения.

На рис. 12а показана связь скорости ветра, измеренной морским буюм, и сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения $\sigma_0(0)$, определенного по РР-данным. Наблюдаемый разброс говорит о том, что точность определения скорости ветра по сечению обратного рассеяния не будет высокой.

Зависимость сечения обратного рассеяния от дисперсии наклонов крупномасштабного волнения показана на рис. 12б. Видно, что корреляция дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния существенно выше, т.е. по измеренному сечению обратного рассеяния надо восстанавливать не скорость ветра, а дисперсию наклонов.

Такой вывод прогнозируем, если посмотреть на формулу (1). Сечение обратного рассеяния зависит от дисперсии наклонов, а зависимость от скорости ветра проявляется более сложным образом: через крупномасштабные наклоны ветровых волн и через интенсивность мелкой ряби, влияющей на эффективный коэффициент отражения.

Измерение сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения выполняется радиоальти-

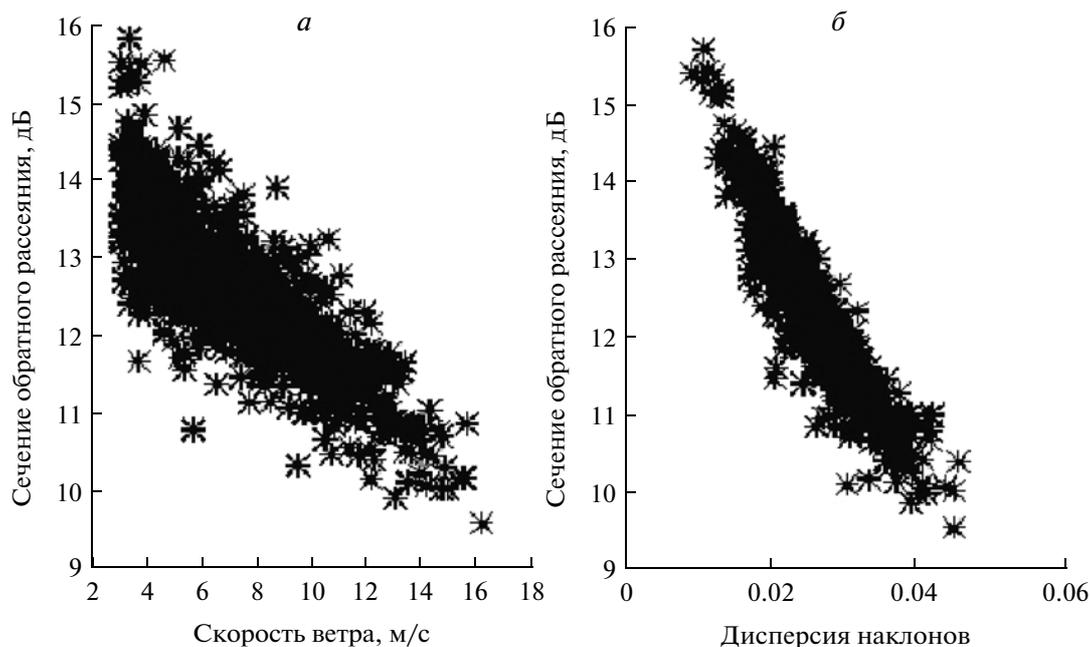


Рис. 12. Зависимость сечения обратного рассеяния: а – от скорости ветра, б – от дисперсии наклонов.

метрами, поэтому помимо скорости ветра по имеющимся радиоальтиметрическим данным можно определять дисперсию наклонов.

Разработка полноценного алгоритма представляет собой отдельную задачу, поэтому здесь приведем оценки возможностей восстановления дисперсии наклонов в рамках простой модели, связывающей дисперсию наклонов и сечение обратного рассеяния.

Предположим, что зависимость сечения обратного рассеяния и дисперсии наклонов задается следующим выражением:

$$\sigma_{\text{накл}}^2 = A + B/\sigma_0(0) + C/\sigma_0^2(0) + D/\sigma_0^3(0),$$

где коэффициенты можно найти с помощью регрессии. В результате регрессионной обработки получим следующую формулу для вычисления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния:

$$\sigma_{\text{накл}}^2 = -0.00591 + 0.74352/\sigma_0(0) - 4.07817/\sigma_0^2(0) + 13.7317/\sigma_0^3(0).$$

Результаты восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния $\sigma_0(0)$ приведены на рис. 13. Дисперсия наклонов, восстановленная по сечению обратного рассеяния, сравнивалась с дисперсией наклонов, восстановленной по PR-данным, которые предполагаются истинными.

Для получения количественной оценки точности алгоритма было вычислено среднеквадратическое отклонение СКО = 0.00209. Таким образом, по сечению обратного рассеяния, измеренного при надирном зондировании, можно восстановить полную дисперсию наклонов с высокой точностью.

Радиоальтиметры измеряют высоту значительного волнения, поэтому совмещение информации о высоте волнения и дисперсии наклонов улучшит описание морского волнения.

Интересные возможности диагностики состояния приповерхностного слоя связаны с вычислением эффективного коэффициента отражения. Это вопрос будет рассмотрен при разработке двухпараметрического алгоритма восстановления скорости ветра в следующей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время данные космических радиолокаторов активно используются для получения информации о состоянии приповерхностного слоя над морской поверхностью, в частности, скаттерометры восстанавливают поле ветра (скорость и направление ветра), радиоальтиметры измеряют высоту значительного волнения и определяют скорость ветра.

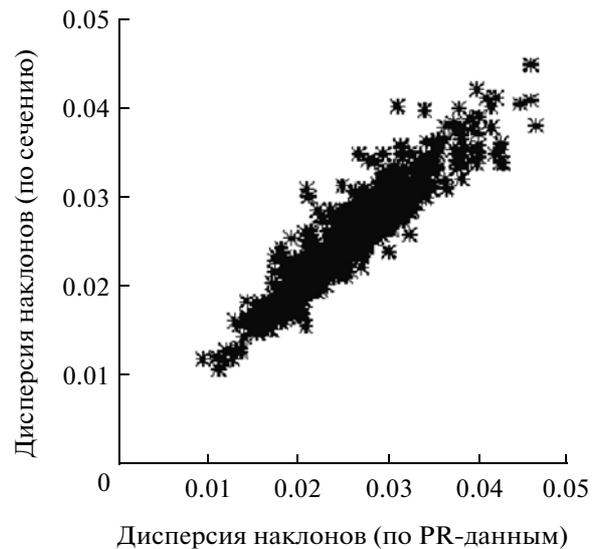


Рис. 13. Сравнение дисперсии наклонов, восстановленных по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения с дисперсией наклонов, восстановленных по PR-данным.

Из активных радиолокаторов непрерывные измерения осуществляет также PR-радиолокатор, измеряющий интенсивность осадков. Радиолокатор обладает высоким разрешением по дальности и формирует высотный профиль для сечения обратного рассеяния с разрешением по дальности 250 м и отраженный сигнал на максимальной дальности связан с отражением от земной поверхности. В результате выполнения сканирования в направлении, перпендикулярном траектории движения, формируется массив данных, содержащий информацию о сечении обратного рассеяния под разными углами падения.

Известны алгоритмы, которые позволяют по PR-данным определить дисперсию наклонов и скорость приповерхностного ветра. Наличие пространственных масштабов изменчивости морского волнения приводит к ограничению размера массива данных, используемых для обработки, что может приводить к существенным ошибкам при решении обратной задачи. В настоящий момент не существует процедур обработки, позволяющих выявлять при обработке такие точки и удалять ошибочные значения.

В нашей работе подробно рассматривается новая процедура обработки PR-данных. Для восстановления дисперсии наклонов одновременно используются два известных подхода: линейный угловой алгоритм и двухточечный угловой алгоритм. Оба алгоритма основаны на теоретической модели обратного рассеяния и отличаются только подходом к обработке PR-данных.

На точность алгоритмов влияет качество исходных данных, поэтому в работе большое вни-

мание уделяется выявлению выбросов (промахов). Причина их образования в работе не рассматривается, а решается задача их удаления. В линейном угловом алгоритме удаление промахов происходит в исходном массиве, а при использовании двухточечного алгоритма промахи удаляются из восстановленных дисперсий наклонов. Последующее сравнение результатов обработки двумя алгоритмами позволяет отсеять значения, которые не удовлетворяют заданной точности. Разработанная процедура впервые позволяет оценивать точность восстановления дисперсии наклонов. Это приводит к уменьшению числа точек, для которых восстанавливается дисперсия наклонов, однако задача повышения достоверности восстанавливаемой информации является приоритетной.

Помимо дисперсии наклонов, по PR-данным можно найти сечение обратного рассеяния, соответствующее нулевому углу падения и сформировать РЛ-панорамное изображение поверхности. При наличии на поверхности крупномасштабных процессов они могут быть обнаружены и исследована их структура.

С помощью численного моделирования был создан тестовый массив данных, для которого была известна дисперсия наклонов и сечение обратного рассеяния. На исходные данные был наложен равномерный шум интенсивностью 10% и получившийся массив был использован для тестирования процедуры обработки. Результаты обработки показали, что предложенная процедура эффективно работает и удаляет точки, где дисперсия наклонов восстанавливается с большой погрешностью.

Для дальнейшего тестирования алгоритмов обработки был сформирован массив данных, включающий в себя РЛ-данные и данные буев: 1) скорость и направление ветра; 2) высота значительного волнения и направление распространения; 3) сечение обратного рассеяния и угол падения; 4) направление движения спутника; 5) направление сканирования; 6) координаты буя и элементарной рассеивающей ячейки. В результате обработки была получена зависимость дисперсии наклонов и сечения обратного рассеяния от скорости ветра.

Проведенный анализ показал, что сечение обратного рассеяния значительно сильнее коррелирует с наклонами и, следовательно, по сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения надо восстанавливать не скорость ветра, а дисперсию наклонов. Был разработан однопараметрический алгоритм для восстановления дисперсии наклонов по сечению обратного рассеяния, измеренному при нулевом угле падения. В этом случае среднеквадратическое отклонение составит всего 0.00209. Данный алгоритм может ис-

пользоваться для обработки радиоальтиметрических данных, и впервые будут одновременно измерены высота значительного волнения и дисперсия наклонов, что открывает новые возможности для мониторинга состояния приповерхностного слоя океана.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 10-05-00181а и № 11-05-97014-р-п-а) и программой ОФН РАН "Радиофизика".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басс Ф., Фукс И.* Рассеяние волн статистически неровной поверхностью. М.: Наука, 1972. 424 с.
- Гарнакерыян А., Сосунов А.* Радиолокация морской поверхности. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1978. 144 с.
- Горяинов В., Журавлев А., Тихонов В.* Статистическая радиотехника: Примеры и задачи / Под ред. Тихонова В. М.: Сов. радио, 1980. 544 с.
- Караев В., Каневский М., Баландина Г., Мешков Е., Челленор П., Срокоз М., Гомменджинджер К.* Новые средства дистанционной диагностики океана: радиолокатор СВЧ-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 41–52.
- Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М., Чу К.* Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабного волнения по данным PR радиолокатора // Восьмая все-рос. конф. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 15–19 ноября 2010, Москва, ИКИ РАН. 2010. С. 186.
- Караев В., Мешков Е., Чу Х., Хе У.* Применение данных PR-радиолокатора для имитации натуральных измерений обратного рассеяния радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны // Изв. вузов. Радиофизика. (В печати).
- Романовский В.И.* Основные задачи теории ошибок. М.: Гостехиздат, 1947. 116 с.
- Чашкин Ю.Р.* Математическая статистика: Анализ и обработка данных. Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. 236 с.
- Шведков Е.* Элементарная математическая статистика в экспериментальных задачах материаловедения. Киев: Наук. думка, 1975. 111 с.
- Cecil D.J., Goodman S.J., Boccippio D.J., Zipser E.J., Nesbitt S.W.* Three Years of TRMM Precipitation Features. Part I: Radar, Radiometric, and Lightning Characteristics // Month. Weather Rev. 2005. V. 133. № 3. P. 543–566.
- Chu X., He Y., Karaev V., Chen G.* Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2012, in press.
- Cox C., Munk W.* Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Opt. Soc. America. 1954. V. 44. № 11. P. 838–850.
- Elfouhaily T., Vandemark D., Goussion J., Chapron B.* Estimation of wind stress using dual-frequency Topex data // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № C11. P. 25101–25108.
- Freilich M.H., Vanhoff B.A.* The relation between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence

- angles from TRMM Precipitation Radar measurements // *J. Atm. Ocean. Tech.* 2003. V. 20. № 4. P. 549–562.
- Grubbs F.* Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples // *Technometrics*. 1969. V. 11. № 1. P. 1–21.
- Halpern D.* *Satellites, Oceanography and Society*. Amsterdam: Elsevier, 2000. 368 p.
- Hauser D., Caudal G., Guimard S., Mouche A.* A study of the slope probability density function of the ocean waves from radar observations // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № C02006. doi:10.1029/207JC004264.
- Hou A.Y., Ledvina D.V., da Silva A.M., Zhang S.Q., Joiner J., Atlas R.M., Huffman G.J., Kummerow C.D.* Assimilation of SSM/I-Derived Surface Rainfall and Total Precipitable Water for Improving the GEOS Analysis for Climate Studies // *Month. Weather Rev.* 2000. V. 128. № 3. P. 509–537.
- Hou A.Y., Zhang S.Q., da Silva A.M., Olson W.S.* Improving Assimilated Global Datasets Using TMI Rainfall and Columnar Moisture Observations // *J. Clim.* 2000. V. 13. № 23. P. 4180–4195.
- Jackson F.C., Walton W.T., Hines D.E.* Sea surface mean square slope from Ku-band backscatter data // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 11411–11427.
- Karaev V.* The new model of the directional frequency spectrum and remote sensing // XXVI General Assembly of the URSI. 13–21 August 1999. Univ. of Toronto, Canada. FP. 65.
- Karaev V., Kanevsky M., Balandina G., Meshkov E., Challenor P., Srokosz M., Gommenginger C.* A rotating knife-beam altimeter for wide-swath remote sensing of the ocean: wind and waves // *Sensors*. 2006. V. 6. P. 260–281. www.mdpi.org/sensors/list06.htm#new
- Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E.* The effect of sea surface slicks on the Doppler spectrum width of a backscattered microwave signal // *Sensors*. 2008. V. 8. P. 3780–3801. DOI:10.3390/s8063780. http://www.mdpi.org/sensors/papers/s8063780.pdf
- Karaev V., Kanevsky M., Meshkov E., Kovalenko A.* The concept of the advanced space microwave radar for remote sensing of the ocean at small incidence angles // PORSEC 2010. 18–23 October 2010. National Taiwan Ocean Univ., Keelung, Taiwan. 2010. P. 23.
- Li L., Im E., Connor L., Chang P.S.* Retrieving ocean surface wind speed from the TRMM precipitation radar measurements // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2004. V. 42. № 6. P. 1271–1282.
- Lopez J.W., Kantha L.H.* A Data-Assimilative Numerical Model of the Northern Indian Ocean // *J. Atm. Ocean. Tech.* 2000. V. 17. № 11. P. 1525–1540.
- NASDA. TRMM Data Users Handbook / Eds. Earth Observation Center. National Space Development Agency of Japan. 2001.
- Tran N., Chapron B., Vandemark D.* Effects of long waves on Ku-band ocean radar backscatter at low incidence angles using TRMM and altimeter data // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2007. V. 4. № 4. P. 542–546.
- Valenzuela G.R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review // *Boundary-Layer Meteorol.* 1978. V. 13. P. 61–86.

Retrieval of the Slope Variance by Microwave Measurements

V. Yu. Karaev¹, M. A. Panfilova¹, G. N. Balandina¹, X. Chu²

¹ *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

² *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Quindao, China*

For increasing of reliability of the information obtained from the microwave signal backscattered from the ocean surface, the original procedure of data processing of the precipitation radar (PR) has been developed. For retrieval of variance of surface slopes the two known approaches are simultaneously used: 1) linear angular algorithm and 2) point-to-point angular algorithm. Both algorithms are based on theoretical model of backscattering, however they differ by the approach to processing of PR-data. Accuracy of retrieval algorithms depends on quality of initial data, therefore in our paper the considerable attention is given to finding of outlyings (blunders). In linear angular algorithm the removal of outlyings occurs in an initial data set, and at using of point-to-point algorithm outlyings are removed from the restored variance of slopes. The developed procedure allows estimating for the first time the accuracy of retrieval of a variance of surface slopes caused by large-scale waves. Simultaneously algorithms restore the normalized radar cross section corresponding to a vertical probing. It allows obtaining the panoramic radar image of a sea surface. As a result of processing of PR data the dependences of a variance of slopes and normalized radar cross section on wind speed has been obtained and is shown, that the radar cross section for vertical incidence angle correlates with a variance of slopes more strongly. The one-parametrical retrieval algorithm of a variance of slopes on backscattered radar cross section measured at zero incidence angle has been developed.

Keywords: radar probing, backscattering at small incidence angles, sea surface, data processing algorithm, measurements of variance of slopes