

УДК 621.371.165+551.446.3

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН ДЛЯ ИМИТАЦИИ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАТОРОМ С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

В. Ю. Караев¹, Е. М. Мешков¹, К. Чу², Ю. Хе²

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

² Институт океанологии Китайской академии наук, г. Циндоу, Китай

Предложен алгоритм преобразования данных радиолокатора сантиметрового диапазона длин волн, предназначенного для измерения интенсивности осадков, в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны. Это открывает возможность с высокой степенью достоверности имитировать спутниковые измерения радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны на этапе его разработки. Обработка преобразованных данных радиолокатора сантиметрового диапазона длин волн подтвердила эффективность алгоритмов восстановления дисперсии наклонов волнения. Предложена процедура формирования панорамного изображения морской поверхности, работоспособность которой подтверждена анализом данных радиолокатора сантиметрового диапазона длин волн. Она позволит обнаруживать и исследовать проявления крупномасштабных волновых процессов на морской поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

В 1997 году стартовал совместный американо-японский проект Tropical Rainfall Measuring Mission, целью которого является определение пространственного распределения осадков и их вертикального профиля, а также измерение их интенсивности в тропической и субтропической зонах Мирового океана [1–3]. Для решения этой задачи на спутнике была установлена разнообразная измерительная аппаратура. В её состав входит радиолокатор сантиметрового диапазона длин волн (РСДДВ) для измерения вертикального профиля осадков.

Особенностью РСДДВ является то, что он работает при малых углах зондирования и, в отличие от скаттерометра, способен восстанавливать недоступную ранее информацию о крупномасштабном волнении, в частности о дисперсии наклонов волнения [4].

В радиолокации для описания рассеяния электромагнитных волн с длинами порядка сантиметра вводится понятие двухмасштабной модели поверхности, в соответствии с которой волнение делится на крупномасштабное (по сравнению с длиной волны, излучаемой радиолокатором) волнение и мелкую рябь [18–21]. Граничное волновое число обычно в несколько раз больше длины электромагнитной волны и зависит от скорости ветра.

Достоверная информация о параметрах крупномасштабного волнения необходима для решения различных океанологических и метеорологических задач. Данные альтиметров о высоте поверхностного волнения используются для построения численных моделей волнения и позволяют существенно повысить их достоверность. Недостатком радиоальтиметрических измерений является то, что они выполняются только вдоль траектории движения спутника с низкими пространственным разрешением (расстояние между витками более 100 км) и недостаточной повторяемостью (период 10 и более суток) [5, 6].

Кроме того, информации только о высоте волнения недостаточно для его достоверного описания и построения высотного ветрового профиля над морской поверхностью, знание которого

необходимо для количественного описания взаимодействия атмосферы и океана. Дело в том, что, помимо высоты волнения, профиль ветра над океаном зависит от наклонов его поверхности [7]. Поэтому измерение дисперсии наклонов поверхностного волнения является важной задачей, решение которой сможет существенно повысить уровень знаний о состоянии приповерхностного слоя океана и позволит улучшить точность численных моделей волнения и прогнозов погоды.

В данной работе рассматривается вопрос об использовании данных РСДДВ для имитации (моделирования) измерений радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны, находящимся на стадии разработки. С помощью специальной процедуры полученные с РСДДВ данные будут преобразованы в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны. Это позволит проверить работоспособность нового алгоритма измерения дисперсии наклонов морской поверхности, разработанного для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны с помощью использования данных РСДДВ космического базирования. Оценка точности измерения дисперсии наклонов новым радиолокатором будет получена при сравнении с дисперсией наклонов, восстановленной с помощью известных алгоритмов по данным с РСДДВ.

Новизна данного подхода состоит в том, что впервые предполагается выполнить преобразование данных с РСДДВ в данные с радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, а также то, что при обработке происходит пересчёт сечения обратного рассеяния, измеренного при наклонном падении, в сечение обратного рассеяния, соответствующее надирному зондированию, и формируется панорамное изображение морской поверхности.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАТОРА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Таблица 1. Параметры РСДДВ [1]

Частота, ГГц	13,8
Поляризация	Горизонтальная
Угол сканирования, град	± 17
Количество лучей	49
Ширина луча, град	$0,71 \times 0,71$
Высота полёта несущего спутника, км	350
Ширина полосы обзора, км	215
Горизонтальное разрешение, км	4,3 (надир)
Разрешение по дальности, м	250
Мощность, Вт	213

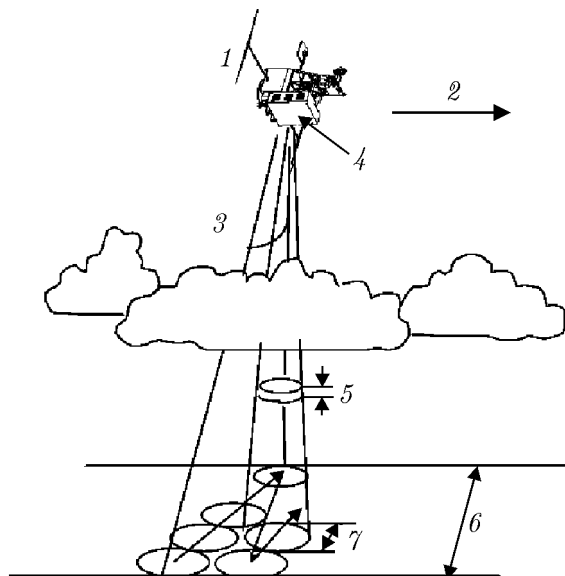
Радиолокатор сантиметрового диапазона длин волн для Tropical Rainfall Measuring Mission был разработан японскими учёными. Сводка его параметров приведена в табл. 1. Элемент разрешения РСДДВ составляет $4 \div 5$ км, однако за счёт применения режима сканирования, общая полоса обзора превышает 200 км. При увеличении высоты полёта несущего спутника, например до 800 км, полоса обзора достигнет почти 500 км.

Схема измерений с помощью РСДДВ показана на рис. 1. Антенна радиолокатора обладает узкой диаграммой направленности $0,71^\circ \times 0,71^\circ$. Во время движения спутника по траектории выполняется электронное сканирование в направлении, перпендикулярном направлению полёта. Период сканирования составляет около 0,6 с. Шаг по углу

падения равен примерно $0,75^\circ$, что исключает пропуски в направлении, перпендикулярном траектории. В течение периода сканирования проводится 49 отсчётов по углу падения.

Из рис. 1 видно, что за счёт применения режима сканирования узким лучом в интервале углов падения $\pm 17^\circ$ (с учётом кривизны Земли угол падения увеличивается до $18,1^\circ$) удаётся получить широкую полосу обзора даже при надирном режиме зондирования. Частота сканирования подобрана так, что смещение РСДДВ за время накопления сигнала составляет менее 5 км, что исключает пропуски и вдоль траектории движения. В результате происходит полная засветка

Рис. 1. Схема измерений с помощью РСДДВ [1]. 1 — несущий спутник (высота полёта 350 км), 2 — направление полёта, 3 — угол сканирования, равный $\pm 17^\circ$, 4 — РСДДВ, 5 — разрешение по дальности, равное 250 м, 6 — ширина полосы обзора, примерно равная 220 км, 7 — горизонтальное разрешение, равное 4,3 км



полосы обзора.

Радиолокатор сантиметрового диапазона длин волн измеряет распределение осадков с большим разрешением по высоте и разрешением по дальности 250 м. Сечение обратного рассеяния (УЭПР — удельный эффективный поперечник рассеяния), измеренное при максимальной дальности, соответствует отражению от поверхности, и поэтому оно может быть использовано для определения параметров последней.

Калибровка радиолокатора, проведённая на полигоне вблизи Японии, показала, что ошибка измерения сечения обратного рассеяния не превосходит 1 дБ. Другие современные космические радиолокаторы характеризуются примерно такой же точностью.

В настоящее время РСДДВ успешно применяется для измерения интенсивности осадков, однако особое внимание привлекает наличие потенциальной возможности получения по его данным дополнительной информации. Известно несколько попыток использования данных с РСДДВ для измерения дисперсии наклонов и скорости приповерхностного ветра, см. например [4, 8]. Отметим также ряд работ, посвящённых восстановлению дисперсии наклонов волнения по данным с самолётов, например [9–11].

2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОЛОКАТОРА С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Основной целью данной работы является использование данных с РСДДВ для имитации измерений радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны и проверка работоспособности алгоритмов восстановления дисперсии наклонов волнения.

Схема измерения радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны показана на рис. 2 [12]. Как и в случае РСДДВ, сканирование происходит в направлении, перпендикулярном направлению полёта несущего спутника. Однако в случае РСДДВ каждая элементарная рассеивающая площадка наблюдается только один раз вследствие его движения. При использовании радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны за счёт ориентации диаграммы направленности вдоль направления полёта несущего спутника радиолокатор будет наблюдать каждую элементарную рассеивающую ячейку на протяжении длительного времени, что позволит существенно снизить уровень шумов и повысить точность алгоритмов восстановления.

Измерение с помощью РСДДВ сечения обратного рассеяния под разными углами зондирования открывает возможность преобразования этих данных в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, ориентированной в направлении, перпендикулярном полёту несущего спутника. Для радиолокатора, изображённого на рис. 2, это будет соответствовать ячейкам, расположенным вдоль оси x при нулевом значении координаты по оси y .

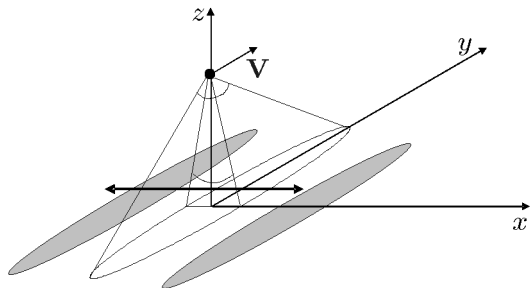


Рис. 2. Схема измерения радиолокатором со сканирующей ножевой диаграммой направленности антенны [12]

К сожалению, при такой ориентации антенны теряется основное преимущество радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, связанное с тем, что за время пролёта радиолокатора одна и та же ячейка наблюдается под разными углами падения.

При преобразовании данных с РСДДВ надо иметь в виду, что, в отличие от радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, используются разные ячейки, т.е. необходима проверка на стационарность волнения. В океанологии морское волнение обычно считается стационарным на расстоянии $25 \div 50$ км [13, 14], поэтому в большинстве случаев для преобразования в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны можно будет использовать ограниченное число лучей РСДДВ.

Отметим, что такое преобразование не позволяет получить данные, полностью идентичные данным радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны. В частности, не могут быть получены спектральные характеристики отражённого сигнала и, следовательно, не может быть проверен доплеровский алгоритм измерения наклонов волнения, а также способ измерения высоты значительного волнения [15, 16]. Тем не менее, проверка даже одного из алгоритмов обработки данных является важным результатом, подтверждающим возможность проведения требуемых измерений с помощью радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны на основе реальных данных.

Рассмотрим подробнее преимущества использования радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны по сравнению с РСДДВ.

При проведении радиолокационного зондирования морской поверхности из космоса необходимо учитывать множество факторов, оказывающих существенное влияние на алгоритмы обработки и качество восстанавливаемой информации. Наиболее существенными являются флуктуации мощности отражённого сигнала, обусловленные особенностями обратного рассеяния электромагнитных волн взволнованной водной поверхностью при малых углах падения, характеристиками приёмно-передающей аппаратуры, потерями при распространении в атмосфере. В данном случае мы не будем классифицировать возможные причины формирования шума. При обработке наличие последнего приводит к ошибкам при восстановлении информации о рассеивающей поверхности. Бороться с флуктуациями мощности отражённого сигнала можно с помощью накопления и усреднения отражённого сигнала.

Сравним уровень шумов РСДДВ и радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны при условии применения приёмно-передающей аппаратуры с одинаковыми характеристиками.

Ширина полосы обзора определяется областью квазизеркального рассеяния и поэтому будет одинаковой для обеих систем. Эксперименты показали, что рассеяние является квазизеркальным в интервале углов падения $\pm 12^\circ$ и в этой области можно не учитывать влияние брэгговского рассеяния. Таким образом, получается примерно $33 \div 34$ отсчёта по углу падения для РСДДВ.

Ширина полосы обзора определяется областью квазизеркального рассеяния и поэтому будет одинаковой для обеих систем. Эксперименты показали, что рассеяние является квазизеркальным в интервале углов падения $\pm 12^\circ$ и в этой области можно не учитывать влияние брэгговского рассеяния. Таким образом, получается примерно $33 \div 34$ отсчёта по углу падения для РСДДВ.

Будем считать, что радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны имеет такое же разрешение.

При разрешении РСДДВ 5 км для области стационарного волнения мы имеем всего $5 \div 10$ углов (элементарных рассеивающих ячеек) в направлении, перпендикулярном направлению полёта, и $5 \div 10$ отсчётов вдоль траектории движения для стандартной скаттерометрической ячейки. Чтобы снизить уровень шумов в сечении обратного рассеяния и увеличить точность измерения параметров волнения и скорости ветра, необходимо проводить усреднение отражённого сигнала.

При использовании радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, ориентированной вдоль траектории полёта несущего спутника, при обработке с помощью специальной процедуры синтеза можно использовать все углы падения для каждой элементарной рассеивающей площадки [15, 17]. В результате вдоль траектории полёта сечение обратного рассеяния для каждой элементарной рассеивающей площадки будет вычислено по $33 \div 34$ отсчётам при сохранении $5 \div 10$ углов в перпендикулярном направлении.

Как уже отмечалось выше, РСДДВ выполняет только одно измерение сечения обратного рассеяния для каждой элементарной рассеивающей площадки. Следовательно, в случае радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны усреднение позволит существенно (в $5 \div 6$ раз) понизить уровень шумов по сравнению с РСДДВ, точнее определить сечение обратного рассеяния и измерить дисперсию наклонов волнения и скорость приповерхностного ветра. В качестве альтернативного варианта можно рассматривать повышение разрешения, т. е. работу с одной ячейкой с размерами 5×5 км и восстанавливать информацию с той же погрешностью, как и для площадки с размерами 25×25 км по данным с РСДДВ. Такое повышение разрешения позволит работать в прибрежной и шельфовой зоне, где присутствует сильная изменчивость параметров волнения и скорости ветра.

Каждая элементарная рассеивающая площадка наблюдается радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны под разными азимутальными углами. Поэтому дисперсия наклонов волнения в этих направлениях тоже доступна измерению. Это позволит определить направление распространения крупномасштабного волнения.

По данным с РСДДВ можно восстановить дисперсию наклонов волнения только в направлении, перпендикулярном направлению полёта несущего спутника, что ограничивает возможности РСДДВ. Таким образом, радиолокатор со сканирующей ножевой диаграммой направленности антенны является перспективным средством дистанционного зондирования океана.

Ещё одним важным преимуществом радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны является возможность измерения высоты значительного волнения в каждой элементарной рассеивающей ячейке [16, 17].

Данные с РСДДВ позволяют частично имитировать измерения радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны из космоса и получить оценки работоспособности одного из разработанных алгоритмов обработки данных.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Как известно, при малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению, см. например [18–20]. В результате сечение обратного рассеяния $\sigma_0(\theta)$ при сканировании РСДДВ вдоль оси x задаётся хорошо известной формулой

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

где θ — угол падения, σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 — дисперсии наклонов волнения вдоль осей x и y соответственно, K_{xy} — взаимный ненормированный коэффициент корреляции наклонов вдоль осей x и y [18, 20]. Отметим, что независимо от угла падения θ в формуле используется $R_{\text{эфф}}(0)$ — эффективный коэффициент отражения при нулевом угле падения, т. к. в данном случае имеется ввиду локальный угол падения.

Для описания рассеяния электромагнитного излучения сантиметрового диапазона длин волн взволнованной водной поверхностью вводится понятие двухмасштабной модели, в соответствии с которой спектр волнения делится на крупномасштабную и мелкомасштабную относительно длины волны падающего излучения составляющие [21]. Поэтому дисперсии наклонов волнения, фигурирующие в формуле (1), относятся к крупномасштабному волнению и значительно отличаются от дисперсии наклонов, измеренных в работе [22] в оптическом диапазоне.

Не существует общепринятого деления спектра волнения на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие. По данным с РСДДВ можно будет сделать прямые оценки дисперсии наклонов крупномасштабного полностью развитого ветрового волнения и построить зависимость дисперсии наклонов от скорости ветра, подобную известной зависимости [22].

В общем случае сечение обратного рассеяния зависит от скорости ветра и длины ветрового разгона, наличия волн зыби и направления зондирования относительно направления ветра. Глубина азимутальной модуляции сечения обратного рассеяния возрастает с увеличением угла падения, поэтому восстановление скорости ветра по сечению обратного рассеяния при наклонном зондировании без информации о направлении ветра невозможно. С аналогичной проблемой сталкиваются при восстановлении скорости ветра по данным радиолокатора бокового обзора или радиолокатора с синтезированной апертурой, также выполняющих измерение под одним азимутальным углом.

Для скаттерометра проблема решается с помощью наблюдения участка поверхности под несколькими азимутальными углами. Благодаря этому восстанавливается не только скорость, но и направление ветра.

Для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны эта проблема также не возникает потому, что один и тот же участок поверхности будет наблюдаться под разными азимутальными углами падения, как и в скаттерометре.

Азимутальная модуляция отсутствует при надирном зондировании при $\theta = 0^\circ$, и предлагаемый нами подход к обработке данных с РСДДВ состоит в том, чтобы пересчитать сечение обратного рассеяния, измеренное при наклоне зондирования, в сечение обратного рассеяния для надирного зондирования и использовать последнее для восстановления скорости ветра. Это снимает проблему, связанную с необходимостью определения направления ветра.

4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДАННЫХ С РАДИОЛОКАТОРА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН В ДАННЫЕ РАДИОЛОКАТОРА С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Одной из задач данной работы является разработка и проверка способа преобразования данных с РСДДВ в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны. Достоверность имитации обеспечивается тем, что используются реальные данные со спутников, поэтому с её помощью можно проверить работоспособность алгоритма восстановления дисперсии наклонов волнения по данным радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны ещё на стадии его разработки.

При работе радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны отражённый сигнал формируется всей протяжённой отражающей площадкой, размер которой определяется диа-

граммой направленности антенны.

В случае с РСДДВ сканирование происходит в широком секторе углов падения и общий размер отражающей площадки порядка размера пятна для антенны с ножевой диаграммой направленности.

При пересчёте данных с РСДДВ в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны необходимо учитывать влияние формы диаграммы направленности антенны. Диаграмма направленности антенны предполагается гауссовой и задаётся следующей формулой [20]:

$$G(\alpha, \beta) = \exp \left[-1,38 \left(\frac{\alpha^2}{\delta_x^2} + \frac{\beta^2}{\delta_y^2} \right) \right], \quad (2)$$

где δ_x и δ_y — ширины диаграммы направленности на уровне 1/2 по мощности вдоль осей x и y соответственно.

В режиме сканирования сечение обратного рассеяния $\sigma_0(\theta)$ измеряется в интервале углов падения и этот процесс можно интерпретировать как измерение радиолокатором с прямоугольной диаграммой направленности антенны. В реальной антенне за счёт конечной ширины диаграммы направленности происходит ослабление сигнала, приходящего при больших углах падения относительно оси диаграммы направленности.

В результате с учётом ширины диаграммы направленности антенны мощность отражённого под углом θ сигнала можно представить в виде

$$P(\theta) \sim \sigma_0(\theta) \exp \left(-2,76 \frac{\theta^2}{\delta_x^2} \right) \sqrt{\frac{2,76}{\pi \delta_x^2}}, \quad (3)$$

где выражение под корнем является нормировочным коэффициентом диаграммы направленности антенны.

При малых углах падения $\theta \leq 12^\circ$ можно считать, что $\theta \approx \text{tg } \theta$, и тогда выражение (3) с учётом (1) можно записать в общем виде:

$$P(\theta) = A \exp(-k_1 \text{tg}^2 \theta), \quad (4)$$

где $k_1 = 1/(2\sigma_{xx}^2) + 2,76/\delta_x^2$. В формуле (1) коэффициент корреляции K_{xy} положен равным нулю.

С учётом этого приведём формулу (1) к виду

$$\sigma_0(\theta) \cos^4(\theta) \exp \left(-2,76 \frac{\theta^2}{\delta_x^2} \right) \sqrt{\frac{2,76}{\delta_x^2 \pi}} = A \exp(-k_1 \text{tg}^2 \theta). \quad (5)$$

Записав формулу (5) в виде

$$\ln \left[\sigma_0(\theta) \cos^4(\theta) \exp \left(-2,76 \frac{\theta^2}{\delta_x^2} \right) \sqrt{\frac{2,76}{\delta_x^2 \pi}} \right] = \ln A - k_1 \text{tg}^2 \theta, \quad (6)$$

получим линейное уравнение относительно новой переменной $\text{tg}^2 \theta$. В результате выполнения линейной аппроксимации получим значения параметров A и k_1 .

Таким образом, мы нашли распределение мощности отражённого сигнала внутри ножевой диаграммы направленности антенны, которое для вычисления сечения обратного рассеяния необходимо проинтегрировать по углу падения:

$$\sigma_{\text{нож}}(0) = \int A \exp(-k_1 \text{tg}^2 \theta) d(\text{tg } \theta). \quad (7)$$

В результате окончательная формула для сечения обратного рассеяния радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны принимает вид

$$\sigma_{\text{нож}}(0) = A \sqrt{\pi/k_1}. \quad (8)$$

Для вычисления дисперсии наклонов волнения можно использовать как коэффициент k_1 , так и найденное значение сечения обратного рассеяния.

Для того, чтобы применить алгоритм, разработанный для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, сначала по формуле (8) определяется сечение обратного рассеяния $\sigma_{\text{нож}}(0)$ и после этого вычисляется дисперсия наклонов волнения вдоль направления зондирования [15–17]:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{\sigma_{\text{нож}}^2(0) \delta_x^2}{5,52 [\sigma_0^2(0) - \sigma_{\text{нож}}^2(0)]}, \quad (9)$$

где сечение обратного рассеяния для узкой антенны при надирном зондировании $\sigma_0(0)$ вычисляется, например, по линейному угловому алгоритму для исходных данных с РСДДВ (см. Приложение).

Ещё одну оценку дисперсии наклонов волнения можно получить из выражения для параметра k_1 :

$$\sigma_{xx}^2 = - \frac{\delta_x^2}{2(k_1 \delta_x^2 + 2,76)}. \quad (10)$$

Таким образом, по данным радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны по формулам (9) и (10) определяем дисперсию наклонов волнения и по формуле (8) — сечение обратного рассеяния для нулевого угла падения.

Для преобразования сечения обратного рассеяния, измеренного РСДДВ под произвольным углом падения, в сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения $\sigma_0(0)$ надо воспользоваться известной формулой (П.10).

5. ИМИТАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЛОКАТОРОМ С НОЖЕВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ

Для имитации измерений радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны использовалась стандартная выборка 2A21 из базы данных, созданной и поддерживаемой Goddard Distributed Active Archive Center. В ней содержится информация о сечении обратного рассеяния, наличии дождя, координаты спутника, направление его полёта, направление зондирования и угол падения. Для тестирования процедуры преобразования данных использовались полные выборки данных, из которых для трансформации выбирались результаты измерений при углах падения, равных $\pm 12^\circ$.

Рассмотрим процедуру обработки данных. В качестве исходных использовались данные с РСДДВ. На рис. 3 показана одна из этих выборок.

Учёт конечной ширины диаграммы направленности антенны приводит к уменьшению мощности отражённого сигнала с увеличением угла падения. На рис. 3 соответствующим образом пересчитанные данные показаны кривой 2. В данном примере предполагалось, что ширина диаграммы направленности антенны δ_x равна 20° .

Кроме того, можно избавиться от зависимости от угла падения и перейти к сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения. Это позволяет находить среднее значение сечения обратного рассеяния не только вдоль линии (для выбранного угла падения), но и для заданной

Рис. 3. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: кривая 1 соответствует исходной выборке данных, 2 — их корректировке с учётом диаграммы направленности антенны, 3 — сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения

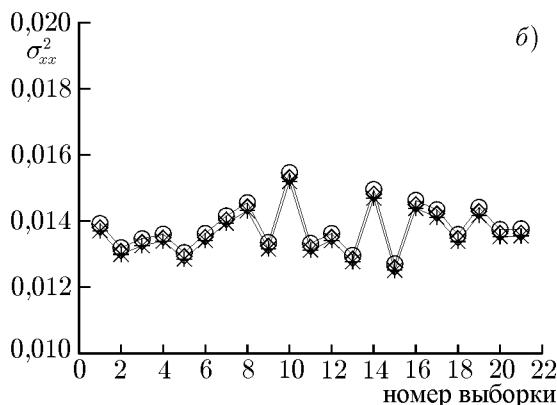
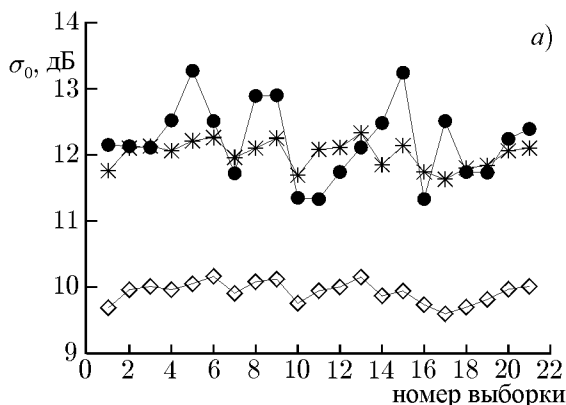
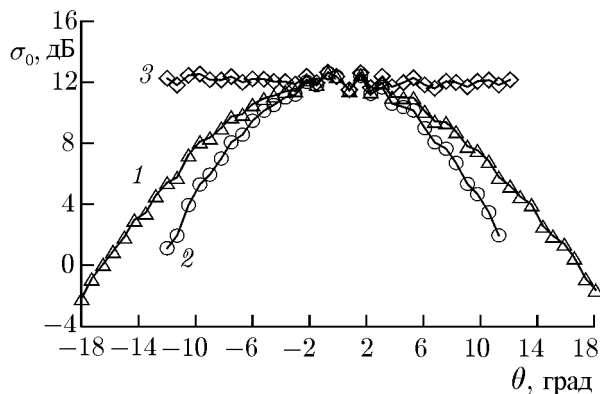


Рис. 4. Изменение сечения обратного рассеяния вдоль траектории движения несущего спутника: звёздочки показывают сечение обратного рассеяния для узкой антенны, ромбы — сечение обратного рассеяния для антенны с ножевой диаграммой направленности, кружки — неусреднённое сечение обратного рассеяния (а); изменение дисперсии наклонов волнения вдоль траектории движения несущего спутника: звёздочки изображают результаты расчётов по линейному угловому алгоритму, кружки и ромбы — по двум алгоритмам для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны (б)

площадки. На рис. 3 сечения обратного рассеяния, преобразованные в сечения обратного рассеяния при нулевом угле падения $\sigma_0(0)$, изображены кривой 3. Ниже будет показано, что устранение зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения позволяет получить изображение поверхности, подобное скаттерометрическому.

Как уже говорилось ранее, дисперсию наклонов волнения для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны можно вычислить двумя способами, см. формулы (9) и (10).

Для реализации первого способа необходимо найти сечение обратного рассеяния для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, см. формулу (8). Результаты соответствующих вычислений приведены на рис. 4а. Из него видно, что при движении наблюдается изменчивость сечения обратного рассеяния. Сильнее всего флуктуирует неусреднённое сечение обратного рассеяния, которое показано кружками (угол падения $0,1^\circ$).

Звёздочками на рис. 4а показано сечение обратного рассеяния, восстановленное с помощью линейного углового алгоритма по данным с РСДДВ. За счёт усреднения его флуктуации стали существенно меньше.

Ромбами на рис. 4а показано сечение обратного рассеяния для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны с $\delta_x = 20^\circ$. Видно, что оно меньше, чем аналогичная величина для радиолокатора с узкой антенной из-за ослабления обратного сигнала при увеличении угла

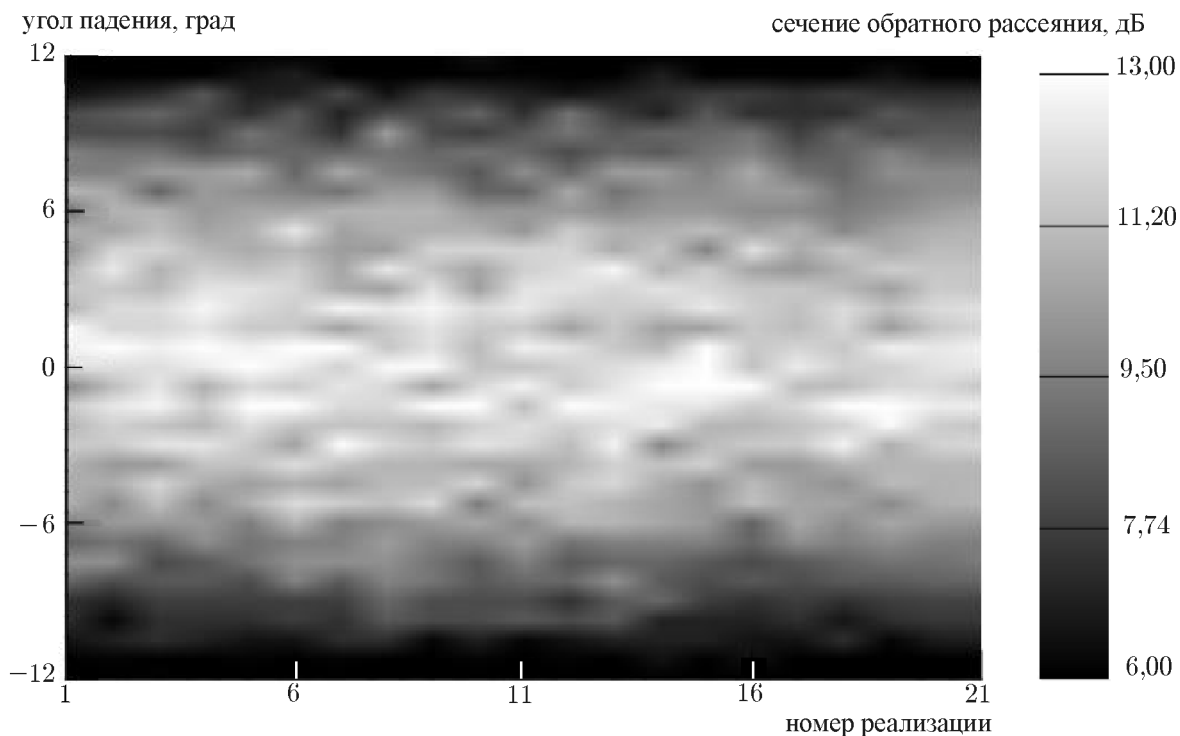


Рис. 5. Панорамное изображение морской поверхности, полученное с РСДДВ. Оттенки серого соответствуют сечению обратного рассеяния

падения.

Пример восстановления дисперсии наклонов волнения показан на рис. 4б. Для обработки использовался линейный угловой алгоритм для данных с РСДДВ (см. Приложение) и два алгоритма для преобразованных данных, см. формулы (9) и (10). Из рис. 4б видно, что все три использованных алгоритма дают близкие результаты. В Приложении показано, что алгоритмы для обработки данных с РСДДВ позволяют восстанавливать дисперсию наклонов волнения. Таким образом, близость дисперсий наклонов волнения, восстановленных по данным радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны, и по данным с РСДДВ подтверждает работоспособность алгоритма, разработанного для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

В данном случае особых преимуществ трансформация данных с РСДДВ в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны не даёт, т. к. отсутствует главное преимущество радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны — наблюдение одной и той же рассеивающей площадки в различные моменты времени на протяжении 30÷40 с. Поэтому точность алгоритмов восстановления дисперсии наклонов волнения по преобразованным данным будет такой же, как и по данным с РСДДВ, что и подтверждают результаты обработки.

Переход к использованию сечения обратного рассеяния при одном угле падения открывает возможность визуализации и, следовательно, анализа волновых процессов на поверхности, как в скаттерометрии.

На рис. 5 показана полоса обзора РСДДВ. По вертикали отложен угол падения в диапазоне $-12^\circ \div 12^\circ$ (33 точки), а по горизонтали — номер выборки (21 точка). Из него видно, сечение обратного рассеяния наиболее существенно зависит от угла падения. Вследствие его изменения сечение обратного рассеяния изменяется от 4 до 14 дБ, т. е. на порядок. Вследствие этого ма-

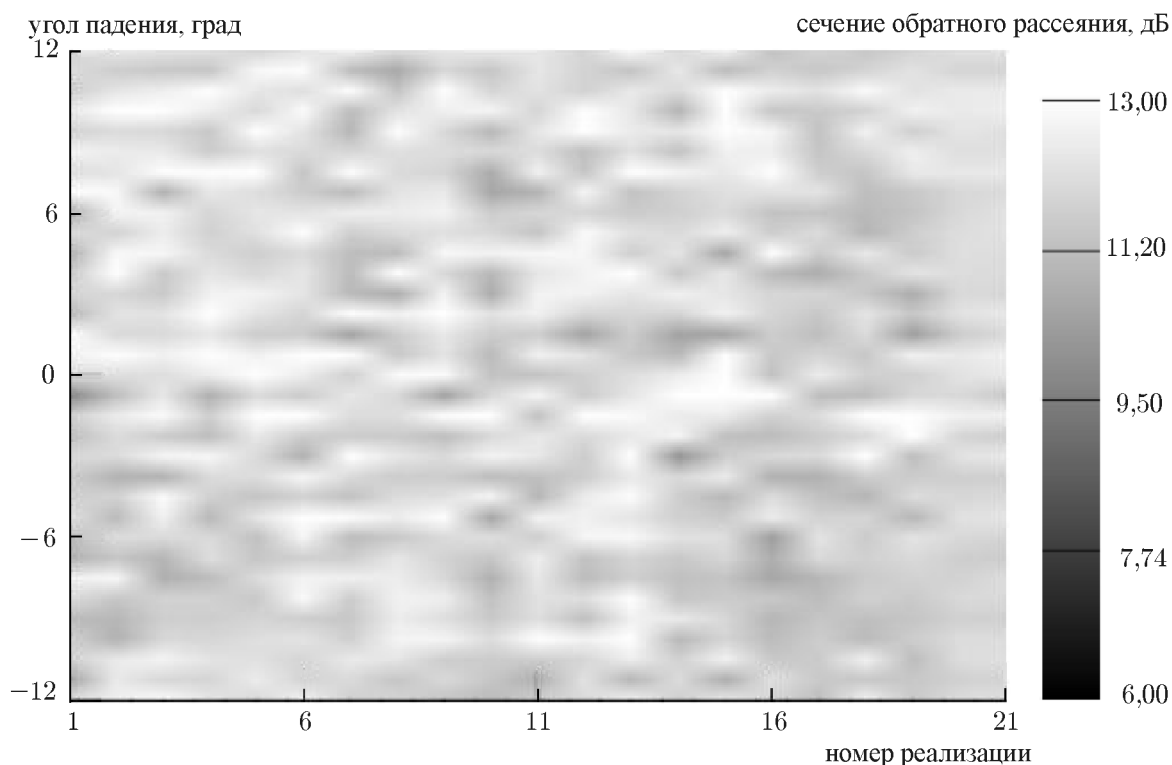


Рис. 6. Панорамное изображение морской поверхности при нулевом угле падения. Оттенки серого соответствуют сечению обратного рассеяния

локонтрастные процессы на поверхности не будут заметны на такой панораме, т.к. они будут маскироваться угловым трендом. Надо также иметь в виду, что достигаемое разрешение равно 5 км, т.е. будет визуализироваться не поверхностное волнение, а лишь более крупномасштабные процессы.

На рис. 5 явно просматривается разделение изображения на полосы в соответствии с углом падения вдоль траектории полёта несущего спутника.

Перейдём к сечению обратного рассеяния при нулевом угле падения (см. рис. 6). Из него видно, что интервал изменения сечения обратного рассеяния существенно уменьшился и стал равным всего 4 дБ: от 10 до 14 дБ. В этом случае можно будет обнаружить неоднородности крупномасштабных волновых процессов.

В рассмотренном примере на морской поверхности не наблюдается проявлений крупномасштабных процессов, т.е. волнение является однородным. Данный подход будет в дальнейшем применён к исследованию проявления течений, штормовых областей и других крупномасштабных волновых процессов на поверхности океана в панорамном изображении, получаемом с помощью РСДДВ.

При использовании радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны возможно построение панорамного изображения не только для сечения обратного рассеяния, но и для других величин, например наклонов волнения и скорости ветра.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В области малых углов падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. В результате отражённый сигнал содержит информацию о параметрах крупномасштабного волнения: дисперсии наклонов и направлении распространения волнения.

Был разработан алгоритм преобразования данных с РСДДВ, работающего при малых углах падения, в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны. Трансформация реальных данных наблюдений со спутника в данные радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны позволяет впервые провести полноценную имитацию измерений новым космическим радиолокатором ещё на стадии его разработки. Преобразованные данные использовались для проверки алгоритмов восстановления дисперсии наклонов волнения для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

Были рассмотрены два алгоритма восстановления дисперсии наклонов по данным с РСДДВ, использующие зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: двухточечный угловой алгоритм и линейный угловой алгоритм. Проведённая обработка тестового массива данных подтвердила работоспособность этих алгоритмов.

Последующая обработка преобразованных данных с РСДДВ подтвердила работоспособность алгоритма, разработанного для радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

Был рассмотрен способ исключения зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения и получения панорамного изображения морской поверхности на основе данных с РСДДВ. Такое изображение будет подобно скаттерометрическому изображению морской поверхности.

В настоящее время в метеорологии при изучении океана широко используются изображения полей ветра, получаемые с помощью скаттерометра, и полей высот значительного волнения, даваемые альтиметром. Обработка данных с РСДДВ позволяет построить изображение поля наклонов волнения и таким образом расширить объём информации о состоянии приповерхностного слоя океана.

Работа поддержана РФФИ (проекты 10-05-00181-а и 11-05-97014-регион_Поволжье-а) и программой ОФН РАН «Радиофизика».

ПРИЛОЖЕНИЕ

Алгоритмы восстановления дисперсии наклонов волнения по данным с радиолокатора сантиметрового диапазона длин волн

Рассмотрим известные алгоритмы восстановления дисперсии наклонов волнения по данным с РСДДВ. Как видно из рис. П1, эти данные для каждой выборки 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, то при обработке необходимо разбить отражающую поверхность на ячейки с размерами, например, 25×25 км или 50×50 км и восстанавливать информацию о каждой ячейке независимо. Ячейки такого размера традиционно используются в скаттерометрии для восстановления скорости и направления ветра [23, 24].

Как показал проведённый анализ данных с РСДДВ [25], азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния начинает проявляться при углах падения больших $7^\circ \div 8^\circ$, поэтому вместо

формулы (1) часто используют следующее выражение [26, 27]:

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{\text{эфф}}(0)|^2}{\cos^4(\theta)\sigma_{\text{total}}^2} \exp\left(-\frac{\text{tg}^2 \theta}{\sigma_{\text{total}}^2}\right), \quad (\text{П.1})$$

где под $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2$ понимается полная дисперсия наклонов поверхности волнения в предположении изотропного волнения. Особых преимуществ такая формула при обработке данных с РСДДВ не даст, а недостатком является то, что она приводит к ошибкам при углах падения больше 9° . Поэтому для разработки алгоритмов будем использовать формулу (1).

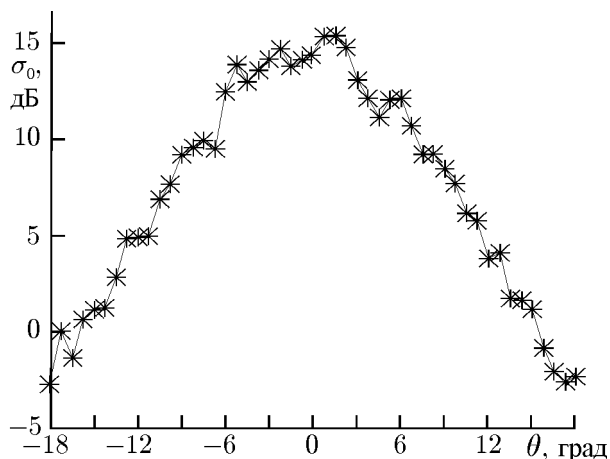


Рис. П1. Пример зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения для одной выборки данных с РСДДВ

Двухугловой алгоритм

Покажем, что в рамках модели квазизеркального рассеяния существует возможность восстановления информации о дисперсии наклонов волнения вдоль направления зондирования и можно вычислить сечение обратного рассеяния для надирного зондирования.

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

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

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 согласно формуле

$$p = \frac{|R_{\text{эфф}}(0)|^2}{\sigma_{yy}} = \frac{\sqrt{2} \sigma_0(\theta) \cos^4(\theta)}{\sqrt{b}} \exp[\text{tg}^2(\theta) b], \quad (\text{П.3})$$

то сечение обратного рассеяния при надирном зондировании можно найти из соотношения

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

Имея измерения сечения обратного рассеяния для двух углов падения θ_1 и θ_2 , можно определить коэффициент b по формуле

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

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

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

В результате мы видим, что переход от сечения обратного рассеяния при наклонном зондировании к сечению обратного рассеяния при надирном зондировании является корректным, причём последнее не зависит от направления распространения волнения. 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 волнения вдоль направления зондирования при условии распространения волнения вдоль осей x или y , т.к. коэффициент корреляции K_{xy} в этом случае равен нулю. При других азимутальных углах дисперсия наклонов волнения будет восстановлена с небольшой погрешностью, величина которой зависит от коэффициента корреляции. Отметим, что коэффициент корреляции много меньше дисперсии наклонов волнения.

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

Реальные данные обычно бывают сильно зашумлены, и по одной паре точно определить коэффициент b можно только случайно, поэтому необходимо проводить усреднение. В нашем распоряжении имеются данные для многих углов падения, и для вычисления среднего значения коэффициента b , $\langle b \rangle$, необходимо перебрать все пары углов.

В качестве альтернативного варианта можно рассмотреть усреднение не коэффициента b , а дисперсии наклонов волнения, т.е.

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

Условие близости средних значений дисперсии наклонов волнения, вычисленных разными способами, может стать критерием правильности полученного результата. Дело в том, что наличие выбросов, т.е. сильно завышенных или заниженных относительно среднего уровня значений, приведёт к тому, что дисперсии наклонов волнения, вычисленные разными способами, будут отличаться.

Близость сечений обратного рассеяния, найденных по разным формулам (см. (П.4) и (П.6)), тоже можно рассматривать в качестве критерия правильности результата.

Выявление потенциальных ошибок при работе алгоритмов является важной задачей, без решения которой ценность получаемой информации сильно снижается.

Линейный алгоритм

Когда имеются значительные флуктуации мощности отражённого сигнала, для вычисления коэффициента b можно применить другой подход [26, 27].

Представим формулу (П.2) в следующем виде:

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

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

$$\ln(\sigma_0 \cos^4 \theta) = B - k \text{tg}^2 \theta, \quad (\text{П.9})$$

где

$$b = k, \quad \sigma_0(0) = \exp(B). \quad (\text{П.10})$$

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

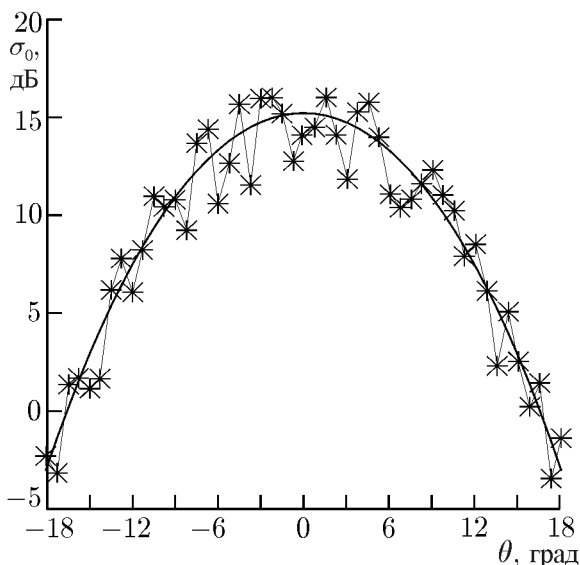


Рис. П2. Пример искажения зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения равномерным шумом. Сплошная линия показывает исходную зависимость

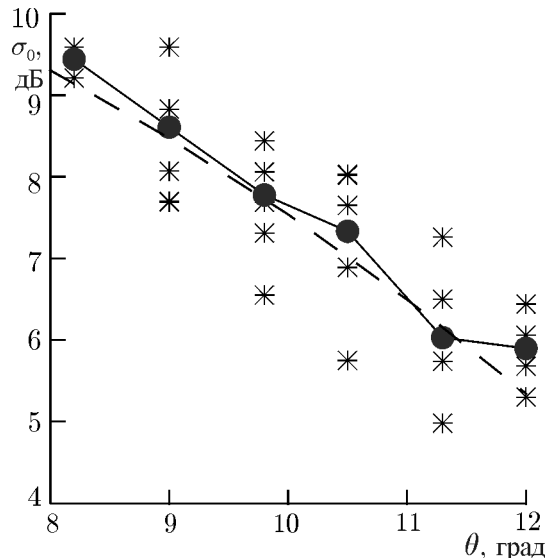


Рис. П3. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: звёздочки соответствуют исходным данным, кружки — усреднённым значениям, пунктирная линия — линейной аппроксимации

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

Для двухточечного углового алгоритма дисперсия наклонов волнения в направлении зондирования вычисляется с помощью формул

$$\sigma_{xx}^2 = 1/(2 \langle b \rangle), \quad \sigma_{yy}^2 = \langle 1/(2b) \rangle, \tag{П.11}$$

а для линейного углового алгоритма

$$\sigma_{xx}^2 = -1/(2k) = -1/(2b). \tag{П.12}$$

В результате получим три оценки дисперсии наклонов волнения, для нахождения которых используются различные подходы к обработке данных.

Работоспособность всех описанных алгоритмов проверялась на модельных и экспериментальных данных. В частности, моделировалось полностью развитое ветровое волнение и вычислялась зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения по формуле (1) в интервале углов от -18° до 18° . Это соответствует данным с РСДДВ. На полученную зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения накладывался шум заданной интенсивности $I_{\text{шум}}$, которая задавалась в процентах. Шум предполагался равномерным в интервале $\pm I_{\text{шум}}$.

Сечение обратного рассеяния для угла падения θ с учётом шума вычислялось по формуле

$$\sigma_{0\text{шум}} = \sigma_0 (1 + I_{\text{шум}}/100). \tag{П.13}$$

Пример «зашумлённых» данных приведён на рис. П2. Сплошной линией показана исходная зависимость. Обработка результатов моделирования показала, что при равномерном шум дисперсия наклонов волнения восстанавливается с высокой точностью при значительном уровне шума, большем $30 \div 50 \%$, с помощью всех рассмотренных алгоритмов.

Как и при обработке реальных данных, использовались углы падения меньше 12° . При дальнейшем росте углов падения в модели необходимо учитывать брэгговскую компоненту рассеянного сигнала, связанную с обратным рассеянием на мелкой резонансной ряби.

На рис. ПЗ приведён пример исходного массива данных с РСДДВ (звёздочки), а сплошной линией с кружками показана усреднённая зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения.

Видно, что в исходном массиве данных с РСДДВ присутствует существенный разброс значений сечения обратного рассеяния. Поэтому с помощью двухточечного алгоритма можно обрабатывать только усреднённый массив данных. Пунктиром на рис. ПЗ показан результат применения линейной регрессии в линейном угловом алгоритме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. TRMM data users handbook. National Space Development Agency of Japan, 2001.
2. Chang A. T. C., Chiu L. S., Kummerow C., Meng C. J., Wilheit T. T. // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 2379.
3. Kummerow C., Barnes W., Kozu T., et al. // *J. Appl. Meteor.* 2000. V. 39. P. 1965.
4. Freilich M. H., Vanhoff B. A. // *J. Atmos. Oceanic Technology.* 2003. V. 20, No. 4. P. 549.
5. *Satellite altimetry and Earth sciences.* Academic Press, 2001. 464 p.
6. Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Международный институт океана, 2005. 366 с.
7. Taylor P. K., Yelland M. // *J. Phys. Oceanogr.* 2001. P. 572.
8. Li L., Im E., Connor L., et al. // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2004. V. 42, No. 6. P. 1271.
9. Jackson F. C., Walton W. T., Hines D. E. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 11411.
10. Hauser D., Caudal G., Guimard S., Mouche A. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Art. no. C02006.
11. Caudal G., Hauser D., Quentin C., Said M. // *Joint Topex/Poseidon and Jason-1 Science Working Team Meeting, 25–27 October 1999, Saint-Raphael, France.* P. 82.
12. Караев В., Каневский М., Мешков Е., Коваленко А. // *Всерос. научно-практическая конф. «Космическая радиолокация», Муром, 28.06–01.07.2010: Тр. конф. Муром: МИВлГУ, 2010. С. 35.*
13. Halpern D. *Satellites, oceanography and society.* Elsevier, 2000. 368 p.
14. Arnús M. *Wind field retrieval from satellite radar systems: PhD thesis.* University of Barcelona, 2002, 200 p.
15. Караев В., Каневский М., Баландина Г. и др. // *Исследование Земли из космоса.* 2003. № 5. С. 51.
16. Караев В., Каневский М., Баландина Г. и др. // *Исследование Земли из космоса.* 2004. № 2. С. 41.
17. Караев В., Каневский М., Мешков Е. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* ИКИ РАН, 2010. Т. 7, № 2. С. 249.
18. Басс Ф. Г., Фукс И. М. *Рассеяние волн на статистически шероховатой поверхности.* М.: Наука, 1972. 424 с.
19. Valenzuela G. R. // *Boundary-Layer Meteorology.* 1978. V. 13. P. 61.
20. Зубкович С. *Статистические характеристики радиосигналов, отражённых от земной поверхности.* М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
21. Курьянов Б. Ф. // *Акуст. журн.* 1962. Т. 8. С. 325.
22. Cox C., Munk W. // *J. Opt. Soc. America.* 1954. V. 44, No. 11. P. 838.

23. Missions — SeaWinds on QuikSCAT. <http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/index.cfm>.
24. ERS scatterometer product user manual.
http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/ears_pm_ers_1.6.pdf.
25. Chu X., He Y., Karaev V., Chen G. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. (в печати).
26. Elfouhaily T., Vandemark D., Gourrion J., Chapron B. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, No. C11. P. 25 101.
27. Tran N., Chapron B., Vandemark D. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 4, No. 4. P. 542.

Поступила в редакцию 14 марта 2011 г.; принята в печать 28 декабря 2011 г.

**SIMULATION OF FULL-SCALE BACKSCATTERING MEASUREMENTS
OF A RADAR WITH A KNIFE-EDGE BEAM BY USING RADIO PROBING DATA
IN THE CENTIMETER WAVELENGTH BAND**

V. Yu. Karaev, E. M. Meshkov, X. Chu, and Y. He

We propose an algorithm for conversion of the data obtained by using a centimeter-wave radar designed to measure precipitation intensity to the data obtained by using a radar with a knife-edge beam. This opens the way for simulation of satellite-based measurements with a knife-edge beam radar at the development stage with high confidence. Processing of the converted centimeter-wave radar data confirmed the efficiency of the algorithms used to reconstruct the dispersion of swelling tilts. A technique is proposed to form a panoramic image of the sea surface, and its feasibility is proved by analysis of the centimeter-wave radar data. This technique will allow one to reveal and study manifestations of large-scale wave processes on the sea surface.